

Thème

L'amélioration de performance énergétique relevant des bâtiments du patrimoine culturel bâti « cas d'étude musée Bordj Moussa »

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

« Spécialité : Architecture » « coloration : Architecture, environnement et technologie »

Préparé par :

LAIDALI Amel

Dr. BELHOCINE Ouahiba	Département architecture de Bejaia	Présidente de jury
Dr. DJERMOUNE Hocine	Département architecture de Bejaia	Rapporteur
Dr. BOUMEZOUED Sara	Département architecture de Bejaia	Examinatrice

Année Universitaire 2024 - 2025

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 : LAIDALI

Prénom : Amel

Matricule : 202033020183

Spécialité et/ou Option : Architecture, environnement et technologie

Département : Architecture

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024/2025

Chargée de préparer un mémoire de (Master) :

Intitulé L'amélioration de performance énergétique relevant des bâtiments du patrimoine
culturel bâti « cas d'étude musée Bordj Moussa »

Je déclare sur mon 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 Bejaia le
09/07/2025

Signature de l'intéressée
Lu et approuvé

Remerciement

Je tiens d'abord à remercier Dieu le Tout-Puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais, dans un premier temps, remercier à mon encadreur Dr. Djermoune, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont Contribué à alimenter ma réflexion et pour son soutien et encouragement.

Mes remerciements sont destinés également aux membres de jury qui ont accepté et qui vont évaluer ce modeste travail.

Je tiens à remercier tous les enseignants du département d'architecture de Bejaia, qui ont contribué à ma formation, pour pouvoir réaliser ce travail.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Madame MEDJMEDJ Sakina, pour m'avoir reçu à la direction de la culture pendant la phase de collecte de données.

Enfin je présente mes vifs remerciements à tous ceux et celles qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

À Ma Mère

Celle qui, depuis le premier jour, m'a porté avec amour, élevé avec courage et accompagné avec une infinie bienveillance.

Sans ton soutien indéfectible, tes sacrifices silencieux, tes prières et tes encouragements constants, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Ce travail est le reflet de ton amour et de ta foi en moi.

Merci pour tout ce que tu es et tout ce que tu fais. Ce mémoire t'est dédié, avec tout mon amour et ma reconnaissance éternelle.

À Mon Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eus pour toi.

Rien au monde ne vaut les efforts que tu as fournis, jour et nuit, pour mon éducation et mon bien-être.

Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation.

Merci papa d'être toujours à mes côtés

À ma sœur et mon frère

*À ma chère sœur Samira et à mon précieux frère Lotfi,
qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenue sans relâche.*

*Merci d'avoir été présents à chaque étape, Votre amour et votre confiance ont
été ma force d'avancer*

À mes copines

*Asma, Imane, Nassima, Yasmine, Sarah et Fatima Merci pour votre présence,
vos rires partagés, vos paroles réconfortantes et votre soutien constant.*

*Votre amitié a été un rayon de soleil dans les moments sombres et une force
dans les instants de doute.*

Je vous suis profondément reconnaissante de faire partie de mon chemin

Résumé

L'Algérie possède un patrimoine architectural important, qui reflète sa richesse culturelle et historique. La ville de Béjaïa, en particulier, garde de nombreux monuments anciens hérités des différentes civilisations qui s'y sont installées. Mais aujourd'hui, ce patrimoine est en danger : plusieurs de ces bâtiments se détériorent ou risquent de disparaître, faute d'entretien et de protection suffisante. Parmi eux, le musée Bordj Moussa, un ancien édifice militaire transformé en musée, illustre à la fois la richesse du patrimoine défensif algérien et les défis posés par sa reconversion contemporaine. Ce bâtiment souffre d'un manque d'adaptation à sa nouvelle fonction muséale, notamment sur le plan énergétique et sa transformation en musée n'a pas été accompagnée d'une étude énergétique, ce qui a mené à une inadéquation des espaces et un inconfort pour les usagers et la préservation des collections exposées. Dans cette optique, cette recherche s'inscrit dans une démarche d'amélioration des performances énergétiques dans les trois volets confort thermique, éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelables du musée Bordj Moussa.

L'étude est composée de deux parties complémentaires. La partie théorique pose les bases des notions liées au patrimoine, aux musées, ainsi qu'à la performance énergétique des bâtiments patrimoniaux. Elle traite en particulier du confort thermique, de l'éclairage artificiel adapté et de l'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments patrimoniaux. La partie pratique, elle est centrée sur l'analyse du cas d'étude : une étude historique et architecturale, accompagnée d'une étude quantitative reposant sur un bilan énergétique du confort thermique, un diagnostic visuel de l'éclairage naturel et artificiel, des mesures réalisées sur site, ainsi que des simulations numériques d'éclairage artificiel à l'aide du logiciel DIALux Evo. À partir de ces analyses, des solutions concrètes sont proposées pour améliorer la performance énergétique du musée Bordj Moussa par la suite ses solutions seront intégrées dans le projet architectural.

Ce travail s'inscrit dans une volonté de revalorisation durable du patrimoine de Béjaïa, à travers une amélioration énergétique adaptée du musée Bordj Moussa, en vue de renforcer sa fonction culturelle, améliorer l'expérience des visiteurs, et assurer sa transmission aux générations futures.

Mots clés : Patrimoine architectural, Performance énergétique, Conservation, Confort thermique, Énergies renouvelables, éclairage artificiel

Abstract :

Algeria possesses a significant architectural heritage that reflects its cultural and historical richness. The city of Béjaïa, in particular, preserves many ancient monuments inherited from the various civilizations that once settled there. However, this heritage is now at risk : many of these buildings are deteriorating or threatened with disappearance due to a lack of maintenance and proper protection. Among them, the Bordj Moussa Museum, a former military building converted into a museum, illustrates both the richness of Algeria's defensive heritage and the challenges posed by its modern reuse. This building suffers from a lack of adaptation to its new museum function, particularly in terms of energy performance. Its transformation into a museum was not accompanied by an energy study, which led to unsuitable interior spaces, discomfort for users, and inadequate preservation conditions for the displayed collections. In this context, this research aims to improve the energy performance of the Bordj Moussa Museum through three key aspects : thermal comfort, artificial lighting, and the integration of renewable energy.

The study is composed of two complementary parts. The theoretical part lays the conceptual foundations related to heritage, museums, and the energy performance of historic buildings. It focuses specifically on thermal comfort, appropriate artificial lighting, and the integration of renewable energy in heritage buildings. The practical part focuses on the case study analysis: a historical and architectural study, combined with a quantitative study including an energy assessment of thermal comfort, a visual diagnosis of natural and artificial lighting, on-site measurements, and lighting simulations using the DIALux Evo software. Based on these analyses, concrete solutions are proposed to improve the energy performance of the Bordj Moussa Museum. Subsequently, these solutions will be integrated into the architectural project.

This work is part of a broader effort for the sustainable enhancement of Béjaïa's heritage, through targeted energy improvements of the Bordj Moussa Museum, with the aim of strengthening its cultural role, enhancing the visitor experience, and ensuring its transmission to future generations.

Keywords : Architectural heritage, Energy performance, Conservation, Thermal comfort, Renewable energy, Artificial lighting

الملخص

تمتلك الجزائر تراثاً معمارياً غنياً يعكس تاريخها وثقافتها. تحتفظ مدينة بجاية بعدد كبير من المعالم التاريخية التي ورثتها عن حضارات متعددة، إلا أن هذا التراث يواجه خطر التدهور والانقراض بسبب نقص الصيانة والحماية. من بين هذه المعالم، يمثل متحف برج موسى، المبنى العسكري القديم الذي تحول إلى متحف، مثالاً على التراث الدفاعي الجزائري والتحديات التي تواجه إعادة تأهيله. يعاني المتحف من عدم التكيف مع وظيفته الجديدة، خاصة من الناحية الطاقية، إذ لم يُجرَ له أي دراسة طاقية عند تحويله، ما أدى إلى عدم ملائمة المساحات وتسبب في عدم راحة المستخدمين وصعوبة الحفاظ على المجموعات المعروضة.

تركز هذه الدراسة على تحسين الأداء الطاقى للمتحف في ثلاثة محاور: الراحة الحرارية، الإضاءة الصناعية، ودمج الطاقات المتجددة. وتتألف الدراسة من جزأين: الجزء النظري الذي يستعرض مفاهيم التراث والمتاحف والأداء الطاقى للمباني التراثية، مع التركيز على الراحة الحرارية، والإضاءة الصناعية المناسبة، ودمج الطاقات المتجددة. أما الجزء العملي فيشمل دراسة حالة متحف برج موسى من خلال دراسة تاريخية ومعمارية، وتحليل كمي يتضمن تقييم الأداء DIALux الحراري، تشخيص الإضاءة الطبيعية والصناعية، قياسات ميدانية، ومحاكاة رقمية للإضاءة باستخدام برنامج بناءً على هذه التحليلات، تم اقتراح حلول عملية لتحسين الأداء الطاقى للمتحف، والتي سيتم دمجها لاحقاً في Evo. المشروع المعماري.

يهدف هذا العمل إلى إعادة تأهيل مستدام لتراث بجاية من خلال تحسين الأداء الطاقى لمتحف برج موسى، بهدف تعزيز دوره الثقافي، تحسين تجربة الزوار، وضمان استمرارية حفظه للأجيال القادمة.

الكلمات المفتاحية: التراث المعماري، الأداء الطاقى، الحفظ، الراحة الحرارية، الطاقات المتجددة، الإضاءة الصناعية.

Sommaire

Résumé	i
Sommaire	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv

Introduction générale

Introduction	1
Problématique :	2
Hypothèse :	3
Objectif de recherche :	3
Méthodologie de recherche	4
Structure de mémoire	4

Chapitre 01 : Notions de patrimoine et des musées

Introduction :	6
I.1 Le patrimoine	6
I.1.1 Définition du patrimoine	6
I.1.2 Les différentes catégories du patrimoine	7
Les biens culturels immobiliers	7
I.2 Patrimoine monumental	8
I.2.1 Définition du monument	8
I.2.2 Les valeurs des monuments	9
I.2.3 La sauvegarde des monuments	9
I.2.4 La conservation-restauration des monuments :	10
I.3 Les musées :	12
I.3.1 La définition de musée :	12
I.3.2 La naissance des musées	12
I.3.3 Le rôle des musées :	13
I.3.4 Types des musées :	13
I.3.5 La mise en réserve des collections de musée :	14
Conclusion	17

Chapitre 02 : la performance énergétique dans les bâtiments patrimoniaux

Introduction	18
II.1 La performance énergétique	18
II.1.1 Qu'est-ce que la performance énergétique :	18

II.1.2	Principes clés pour la préservation énergétique des bâtiments patrimoniaux	19
II.2	Le confort thermique dans les bâtiments patrimoniaux.....	19
II.2.1	Qu'est-ce que le confort thermique :.....	19
II.2.2	Comportement thermique et hygrométrique des bâtiments patrimoniaux	19
II.2.3	L'amélioration thermique des bâtiments patrimoniaux	24
II.3	L'éclairage artificiel au service du patrimoine culturel :	28
II.3.1	Qu'est-ce que l'éclairage artificielle :	28
II.3.2	Type d'éclairage artificielle :	28
II.3.3	Importance de la Lumière artificielle dans les services du patrimoine culturel :	29
II.3.4	Techniques d'éclairage artificiel pour les bâtiments patrimoniaux :.....	30
II.3.5	Système de fibres optiques STARFLEX :	30
II.3.6	Projecteurs à LED (ARCOS) :	31
II.4	Solutions d'énergie renouvelable pour les bâtiments patrimoniaux.....	33
II.4.1	Énergie solaire et le patrimoine :	33
II.4.2	Importance de l'énergie solaire :	33
II.4.3	Compatibilité des installations solaires avec l'architecture patrimoniale	33
II.4.4	Les panneaux solaires.....	34
II.4.5	Les panneaux solaires photovoltaïques :	34
II.5	L'analyse des exemples	38
II.5.1	Exemple 01: museum of Islamic art:.....	38
II.5.2	Exemple 02 : hôtel particulier du 18 ^{ém} siècle (France).....	41
Conclusion	43

Chapitre 03 : cas d'étude« Musée Bordj Moussa »

III.1	Le cas d'étude « musée bordj moussa » :	45
III.1.1	Justification de Choix de cas d'étude :	45
III.1.2	Présentation de l'aire d'étude « Bejaia » :	45
III.1.3	Présentation de bordj moussa :	47
III.1.4	La situation du musée bordj moussa	48
III.1.5	Étude historique de Bordj Moussa :	49
III.1.6	Étude architecturale de Bordj Moussa :	50
III.1.7	Étude constructive :	52
III.1.8	Les matériaux de construction.....	54
III.2	Étude quantitavie :	56

III.2.1	Bilan énergétique :.....	56
III.2.2	Diagnostic visuel de l'éclairage artificiel et naturel de Bordj Moussa.....	58
III.2.3	Les mesures de l'éclairage artificiel.....	60
III.2.4	Simulation numérique :	63
III.2.5	Validation du choix du logiciel dia lux evo :	69
III.2.6	Intervention sur l'amélioration des performances énergétiques du musée bordj.....	70
III.2.7	Simulation de l'éclairage artificiel proposer pour le musée bordj moussa :	73
Conclusion.....		74

Chapitre 04 : le projet « musée d'art et d'histoire »

Introduction	76
IV.1 Présentation de projet	76
IV.2 Choix de projet :	77
IV.3 L'objectif du projet.....	77
IV.4 Analyse de site « Sidi Ali Lebhar » :	77
IV.4.1 Situation géographique de site :	77
IV.4.2 Choix de site :	78
IV.4.3 Accessibilité et environnement immédiat :	78
IV.4.4 Climatologie de site :	79
IV.4.5 Ensoleillement.....	79
IV.4.6 Les vents :	81
IV.4.7 La topographie de site	82
IV.4.8 Synthèse de l'analyse de site :	82
IV.5 Sheema du principe de projet	83
IV.6 Genèse de projet	84
IV.7 Plan de masse.....	85
IV.8 L'organisation spatiale.....	86
IV.9 Lecture architecturale de la façade :	88
IV.9.1 Concepts de la façade :	89
IV.10 Techniques de performance thermique appliquer dans le projet :	90
IV.11 Éclairage artificiel intégré dans le projet :	91
IV.11.1 Simulation de l'éclairage artificiel de projet :	91
IV.12 Intégration de l'énergie renouvelable dans le projet.....	93
Conclusion.....	93

Conclusion générale

Introduction	95
---------------------------	-----------

Résultats de recherche	95
Limite de recherche.....	96
Perspective de la recherche.....	97
Conclusion :	97
La Bibliographie.....	98
Annexes	100

Liste des figures

Figure 01: Les différents catégories de patrimoine.....	7
Figure 02 : Comparaison entre le bâti ancien et le bâti moderne	20
Figure 03 : les pertes thermiques dans le bâtiment ancien	21
Figure 04 : Gestion de l'humidité : comparaison entre bâti ancien et bâti contemporain	22
Figure 05 : Impact de l'isolation sur le comportement hygrométrique des murs traditionnels	23
Figure 06 : Effet de l'isolation thermique du toit	25
Figure 07 : Exemple de renforcement du vitrage	26
Figure 08 : Exemple de double fenêtre	27
Figure 09 : Étapes de restauration d'un mur	27
Figure 10 : éclairage indirecte	28
Figure 11 : Éclairage ponctuel.....	29
Figure 12 : Lampe STARFLEX	30
Figure 13 : Les lampe LED ARCOS	31
Figure 14 : L'effet photovoltaïque	35
Figure 15 : Principe de l'énergie photovoltaïque	35
Figure 16 : Cellules en silicium monocristallin	36
Figure 17 : Cellules en silicium polycristallin	36
Figure 18 : Cellule au Silicium amorphe	37
Figure 19 : Musée d'Art Islamique.....	38
Figure 20 : Situation de musée.....	38
Figure 21 : Situation de musée.....	38
Figure 22 : Façade du musée d'art islamique.....	39
Figure 23 : Façade de musée d'art islamique.....	39
Figure 24 : Lampe STARFLEX dans le musée d'art islamique.....	40
Figure 25 : L'hôtel particulier	41
Figure 26 : Situation de l'hôtel particulier	41
Figure 27 : Fenêtre restaurer	42
Figure 28 : Toiture isolée.....	42
Figure 29 : Situation de Bejaia	47
Figure 30 : Musée Bordj Moussa	48
Figure 31 : Situation de Bordj Moussa.....	48
Figure 32 : Façade du palais de l'étoile dessin	49
Figure 33 : Plan de masse du fort impérial espagnol,	49
Figure 34 : Fort Barral pendant la colonisation française	50
Figure 35 : le musée Bordj Moussa.....	50
Figure 36 : Accessibilité de musée	51
Figure 37 : Schéma de la volumétrie.....	51
Figure 38 : Double appareillage en grosse pierres	53
Figure 39 : Assemblage de pierres quadrangulaires	53
Figure 40 : Double appareillage de brique	53
Figure 41 : Revêtement de la terrasse	53
Figure 42 : Voutes en berceau	54
Figure 43 : La brique pleine	54
Figure 44 : La pierre.....	55

Figure 45 : Liant traditionnel	55
Figure 46 : La pierre bleue	55
Figure 47 : Granito	56
Figure 48 : Photo de thermo-hygromètre	57
Figure 49 : Ensemble d'images sur l'éclairage artificiel dans le musée	59
Figure 50 : Ensemble d'images sur les ouvertures du musée.....	59
Figure 51 : Le luxmètre	60
Figure 52 : Grille de mesure de la salle d'exposition de musée Bordj Moussa	61
Figure 53 : Résultats de prise de mesure de la salle d'exposition.....	62
Figure 54 : Logiciel DIALUX evo 06	64
Figure 55 : Capture de l'étape de l'importation de projet	65
Figure 56 : Capture de l'étape de l'ouverture de fichier	65
Figure 57 : Capture de la détermination de nord.....	65
Figure 58 : Capture de l'étape modélisation de projet	66
Figure 59 : Capture de l'étape positionnement de projet	66
Figure 60 : Capture de l'étape modélisation de l'environnement immédiat	66
Figure 61 : Capture de l'étape le choix de type de ciel, l'heure et la journée	67
Figure 62 : Capture de l'étape importation et positionnement des luminaire	67
Figure 63 : Capture de l'étape résultats de calcul	67
Figure 64 : Résultats de la simulation de l'éclairage artificiel	68
Figure 65 : Plan d'éclairage artificiel proposer pour le musée bordj moussa	71
Figure 66 : Résultat de simulation de l'éclairage artificiel proposer	73
Figure 67 : Image de projet (musée d'art et d'histoire).....	76
Figure 68 : Situation géographique de site	77
Figure 69 : Accessibilité et environnement immédiat du site	78
Figure 70 : Résultats de l'ensoleillement sur le site.....	79
Figure 71 : Résultat d'analyse des vents sur site.....	81
Figure 72 : Coupe schématique du terrain.....	82
Figure 73 : Synthèse de l'analyse de site	82
Figure 74 : Schéma du principe.....	83
Figure 75 : Genèse de projet	84
Figure 76 : Plan de masse.....	85
Figure 77 : Plan de rez de chaussée.....	86
Figure 78 : Plan de premier étage.....	87
Figure 79 : Plan de deuxième étage	87
Figure 80 : Plan de toiture	88
Figure 81 : Façade Est	88
Figure 83 : Ensemble de photos de 3 D de projet	88
Figure 84 : Ensemble de photos de 3D de projet	89
Figure 85 : Plan d'éclairage de la salle d'exposition.....	91
Figure 86 : Résultats de la simulation de l'éclairage artificiel	92

Liste des tableaux

Tableau 01 : Humidité et température : précautions à prendre pour la conservation	16
Tableau 02 : Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque	37
Tableau 03 : analyse de l'éclairage artificiel de musée d'art islamique	40
Tableau 04 : l'analyse d'amélioration thermique hôtel particulier du 18 ^{ém} siècle (France)	43
Tableau 05 : Analyse historique de Bordj Moussa	50
Tableau 06 : Technique de construction de bordj moussa	54
Tableau 07 : Résultats de bilan à l'intérieurs au musée Bordj Moussa (le 7 mai 2025).....	57
Tableau 08 : diagnostic visuel de l'éclairage naturel et artificiel	59
Tableau 09 : comparaison des résultats obtenus.....	69

Introduction générale

Introduction

L'Algérie possède un riche patrimoine architectural qui témoigne de son histoire et de sa diversité virtuelle. Ce patrimoine est une source d'inspiration inestimable pour les architectes et les passionnés d'histoire. Il offre également une fenêtre sur le passé, permettant aux générations actuelles de mieux comprendre l'évolution du pays à travers ses édifices emblématiques. À travers ses mosquées, ses palais, ses kasbahs et ses bâtiments coloniaux, l'architecture en Algérie reflète l'influence des différentes civilisations qui ont façonné le pays au fil des siècles. Des styles variés, tels que l'architecture mauresque, ottomane, française et berbère se côtoient harmonieusement dans le paysage architectural algérien.

Selon Jean-Pierre Babelon et André Chastel dans leur ouvrage *« le patrimoine est une notion toute récente, qui couvre de façon nécessairement vague tous les biens, tous les « trésors » du passé. En fait, cette notion comporte un certain nombre de couches superposées qu'il peut être utile de distinguer »*. (Babelon & Chastel, 2022, p.11)

Grâce à sa situation stratégique, la ville de Béjaïa a attiré l'implantation de nombreuses civilisations au fil des siècles. Elle est reconnue comme l'une des anciennes colonies romaines d'Afrique, la deuxième capitale des Hammadides durant l'époque islamique, et l'une des grandes villes sous domination espagnole. Son patrimoine bâti témoigne de son riche héritage historique.

Aujourd'hui, ce patrimoine bâti est menacé par des risques de disparition et de dégradation, ce qui entraîne un appauvrissement préjudiciable de l'héritage pour l'humanité tout entière. Il est donc nécessaire de réfléchir aux interventions appropriées afin de préserver et de valoriser cet héritage, en respectant son identité et en l'intégrant dans des démarches de développement durable. Il s'agit d'un patrimoine à inscrire dans une perspective de durabilité, afin de garantir sa pérennité pour les générations futures. Parmi ces actions, l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment appartenant au patrimoine culturel constitue l'un des leviers essentiels pour assurer cette durabilité.

La performance énergétique se définit comme l'énergie requise pour satisfaire les besoins essentiels liés au fonctionnement normal d'un bâtiment, tout en permettant d'améliorer le confort des occupants et, par conséquent, de réduire la consommation énergétique. L'amélioration de la performance énergétique du patrimoine bâti constitue l'intervention la plus

pertinente, car elle répond à l'exigence du confort énergétique tout en assurant une consommation d'énergie modérée et rationnelle.

Actuellement, on recommande de trouver un équilibre entre le confort, l'économie d'énergie et le respect de l'environnement, afin de contribuer à l'effort d'amélioration de la performance énergétique et de maîtrise de la consommation d'énergie dans le patrimoine, tout en offrant un confort optimal aux usagers et en préservant son identité patrimoniale.

Problématique :

Au fil de l'histoire, Béjaïa a connu la succession de plusieurs civilisations ; sa création et son développement sont étroitement liés à sa situation stratégique, longtemps considérée comme la porte d'entrée vers le continent africain. Aujourd'hui, la ville de Béjaïa demeure le témoin vivant de ce riche passé, incarné par ses paysages naturels, ses vestiges et ses monuments historiques, qui constituent un patrimoine de grande valeur.

Ce patrimoine constitue non seulement un moteur pour le développement économique de la ville, mais aussi un lien intergénérationnel précieux au sein de la société bougiéotes. Ce patrimoine est souvent insuffisamment pris en charge et quelque fois laissé à l'abandon, ce qui met en péril sa sauvegarde et pourrait conduire à sa disparition.

Sa préservation et sa mise en valeur sont donc essentielles pour assurer sa transmission aux générations futures.

Bordj Moussa, l'un des principaux vestiges du patrimoine de la ville de Béjaïa, a été transformé en musée en 1987. Cependant, cette transformation n'a pas été accompagnée par un conditionnement énergétique nécessaire pour l'amélioration de l'ajustement des espaces aux besoins de la mise en valeur et de l'exposition des collections.

Dans cette optique, Nous avons opté pour l'étude de ce bâti patrimoniale afin d'identifier les problèmes liés à son confort énergétique en tant que musée et de proposer des solutions visant à améliorer sa performance énergétique dans ces trois volets le confort thermique, l'éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelables.

Afin d'atteindre cet objectif, nous posons la problématique suivante :

- Quelle est la démarche méthodologique et opérationnelle pour l'améliorer des performances énergétiques du Bordj Moussa tout en sauvegardant sa valeur patrimoniale ?

Hypothèse :

Notre recherche est consacrée à l'amélioration de la performance énergétique de Bordj Moussa. Nous en analysons les points faibles en tant que musée et proposons des stratégies énergétiques adaptées, dans le respect de l'authenticité et des apports significatifs de toutes les époques ayant contribué à l'édification de Bordj Moussa. Pour répondre à notre problématique, nous avançons l'hypothèse suivante

L'amélioration des performances énergétiques des trois volets : le confort thermique, l'éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelables contribue à l'amélioration de la performance énergétique et l'expérience muséal du Fort Bordj Moussa

Objectif de recherche :

Le principal objectif de notre étude est d'identifier les stratégies à mettre en œuvre pour résoudre les différents problèmes d'inconfort énergétique au sein du musée Bordj Moussa à Béjaïa, et parvenir à garantir la performance énergétique de ce musée tout en préservant son identité patrimoniale. Les objectifs visés dans notre travail sont les suivants :

- Rendre le musée Bordj Moussa énergétiquement plus performant par la proposition de techniques et technologies qui assurent la performance énergétique de ce dernier tout en préservant son identité patrimoniale.
- Améliorer le confort énergétique du musée pour assurer le bien-être des usagers tout en garantissant les conditions idéales pour la conservation des collections exposées.

Méthodologie de recherche

Pour mieux cerner la problématique posée et arriver aux résultats attendus, notre travail s'appuie sur quatre chapitres complémentaires : deux chapitres théoriques et deux chapitres pratiques

Les chapitres théoriques :

Le premier chapitre consiste la notion du patrimoine, leur importance pour la mémoire collective, ainsi que les principes de leur sauvegarde. Elle aborde également les généralités sur les musées, leurs fonctions et la mise en réserve des collections.

Le deuxième chapitre consiste les techniques et les solutions de la performance énergétique dans le bâtiment d'intérêt patrimonial de trois volets confort thermique, éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelable

Les chapitres pratiques :

le premier chapitre a traité tous les points relatifs au cas d'étude (Bordj Moussa), à travers une étude historique et architecturale qui nous a permis de mieux le comprendre sur le plan architectural et historique, par la suite une étude quantitative par un bilan énergétique de confort thermique, diagnostic visuel sur l'éclairage artificiel et naturel, des prises de mesure et une simulation numériques de l'éclairage artificiel avec DIALux evo ont été effectuées afin d'analyser la performance énergétique de Bordj Moussa. On a terminé ce chapitre par la proposition des techniques et des solutions pour améliorer sa performance énergétique.

Le deuxième chapitre consiste l'analyse de mon projet architectural (analyse de site, présentation des plans des façades) et par la suite on a indiqué les solutions et les techniques de la performance énergétique intégrée dans le projet.

Structure de mémoire :

Notre travail de recherche se compose d'une Introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale :

Introduction générale : comporte l'introduction, la problématique générale, l'hypothèse et les objectifs ainsi que la méthodologie de recherche.

Premier chapitre : consiste une conceptualisation qui a suivi de fondement théorique pour la compréhension des différents concepts et notions clés liées à notre recherche, elle découle d'une recherche bibliographique et archivistique sur la notion du patrimoine, leur importance pour la mémoire collective, ainsi que les principes de leur sauvegarde. Elle aborde également les généralités sur les musées, leurs fonctions et la mise en réserve des collections sur

Deuxième chapitre : consiste également une recherche bibliographique et archivistique sur les techniques et les solutions de la performance énergétique dans le bâtiment d'intérêt patrimoniale de trois volets confort thermique, éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelable puis nous réaliserons une étude de deux exemples traitant notre sujet de recherche.

Troisième Chapitre : traite tous les points relatifs au cas d'étude (Bordj Moussa), à travers une étude historique et architecturale qui nous permettra de mieux le comprendre sur les plans architectural et historique. Par la suite, une étude quantitative sera réalisée, comprenant un bilan énergétique du confort thermique, un diagnostic visuel de l'éclairage artificiel et naturel, des prises de mesures, ainsi qu'une simulation numérique de l'éclairage artificiel à l'aide du logiciel DIALux Evo, afin d'analyser la performance énergétique du musée Bordj Moussa. Ce chapitre se termine par la proposition de techniques et de solutions visant à améliorer sa performance énergétique.

Quatrième chapitre : comprend l'analyse de mon projet architecturale (analyse de site, présentation des plans des façade.) et par la suite on indique les solutions et les techniques de la performance énergétique intégrée dans le projet.

Conclusion générale : comporte une introduction, résultats de recherche, limite de recherche, perspective de recherche et une conclusion

Chapitre 01 : Notions de patrimoine et des musées

Introduction :

Le patrimoine constitue un repère essentiel de l'identité culturelle et collective. Il regroupe l'ensemble des biens matériels et immatériels transmis de génération en génération, et dont la valeur historique, artistique ou symbolique justifie la préservation. Ce chapitre présente un cadre théorique permettant de mieux comprendre les notions fondamentales liées au patrimoine.

Dans un premier temps, on présente les définitions et les différentes catégories du patrimoine. Ensuite, nous aborderons les valeurs attribuées aux monuments, ainsi que les principes de conservation, restauration et réhabilitation. Enfin, une attention particulière sera portée aux musées, notamment à leur rôle dans la conservation préventive des objets patrimoniaux.

Ce chapitre permet de mieux entourer les enjeux de préservation du patrimoine, en lien avec les pratiques professionnelles et les politiques culturelles.

I.1 Le patrimoine

I.1.1 Définition du patrimoine

Selon Françoise Choay le patrimoine est défini comme « *L'expression qui désigne un fonds destiné à la jouissance d'une communauté élargie aux dimensions planétaires et constitué par l'accumulation continue d'une diversité d'objets que rassemble leur continue appartenance au passé : œuvres et chefs-œuvres des beaux-arts et des arts appliqués, travaux et produits de tous les savoir-faire des humains.* » (Choay, 1996,p.09)

La définition du patrimoine culturel selon la loi 98-04 du 15 juin 1998 :
« *Le patrimoine culturel de la nation tous les biens culturels immobiliers, immobiliers par destination et mobiliers existant sur et dans le sol des immeubles du domaine national, appartenant à des personnes physiques ou morales de droit privé, ainsi que dans le sous-sol des eaux intérieures et territoriales nationales légués par les différentes civilisations qui se sont succédées de la préhistoire à nos jours* ». (République Algérienne, 1998,art.02)

Le patrimoine constitue un héritage qui établit un lien entre les générations d'hier, d'aujourd'hui et de demain. Il représente un élément central de l'identité et de la mémoire

collective d'un pays, d'une région ou d'une communauté à une période donnée. Il s'exprime principalement à travers leur architecture, leurs modes de vie et leurs traditions.

I.1.2 Les différentes catégories du patrimoine

Le patrimoine consiste plusieurs catégories, chacune joue un rôle essentiel dans la préservation de l'identité d'une société.

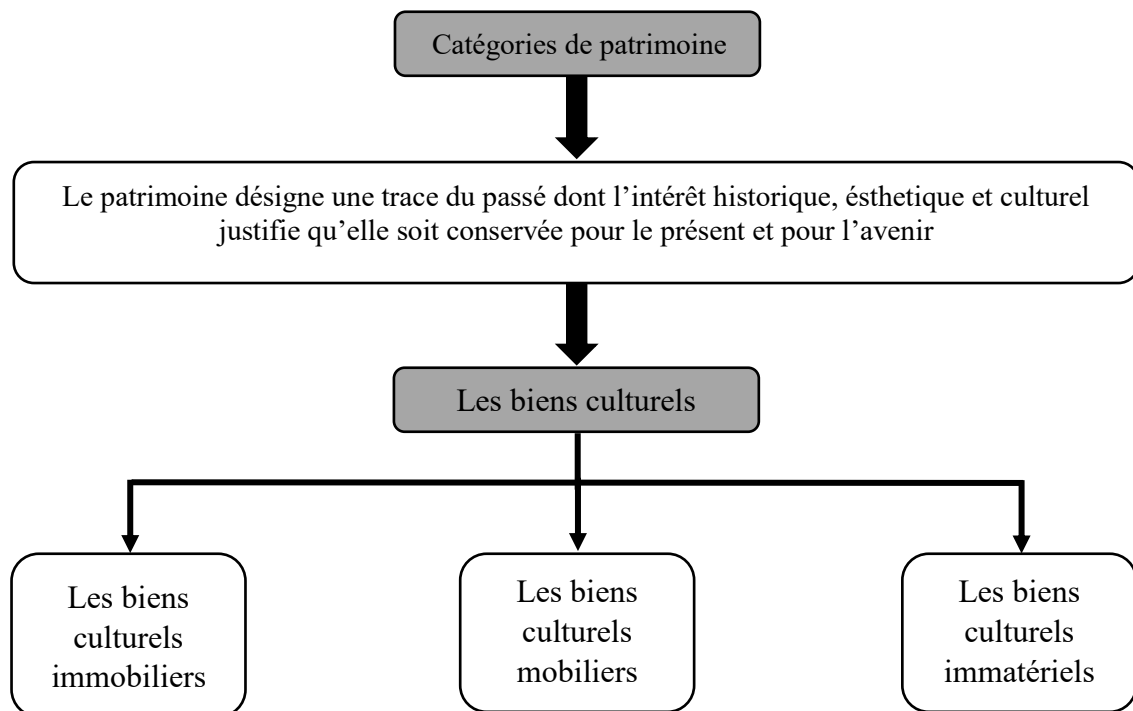


Figure 01: Les différents catégories de patrimoine
Source : l'auteur 2025

Les biens culturels immobiliers

Les biens culturels immobiliers englobent divers éléments du patrimoine bâti. Ils comprennent notamment les monuments historiques, les sites archéologiques ainsi que les ensembles urbains ou ruraux, qui témoignent de la richesse culturelle et historique d'un territoire (République Algérienne, 1998, art.02)

Les biens culturels mobiliers

Les biens culturels mobiliers comprennent :

Les oobjets archéologiques : Résultats de fouilles terrestres et sous-marines

Les antiquités et artéfacts : Bijoux, habits traditionnels, sceaux.

Le patrimoine anthropologique et ethnologique : Témoins des cultures et sociétés passées.

Les biens liés à l'histoire : Sciences, techniques, évolution sociale, économique et politique.

Les œuvres d'art : Peintures, dessins, estampes originales, affiches, photographies artistiques.

Les documents anciens et rares : Manuscrits, incunables, livres, archives, cartes, enregistrements sonores et films.

Les objets de collection : Monnaies, médailles, timbres.(République Algérienne, 1998,art.02)

Les biens culturels immatériels

Les biens culturels immatériels se définissent comme un ensemble de connaissances, de représentations sociales, de savoirs, de savoir-faire, de compétences et de techniques fondés sur la tradition, dans divers domaines du patrimoine culturel, représentant les véritables significations de rattachement à l'identité culturelle détenues par une personne ou un groupe de personnes.(République Algérienne, 1998,art.02)

I.2 Patrimoine monumental

I.2.1 Définition du monument

Selon la loi 98-04 du 15 juin 1998 les monuments historiques sont définis comme : « toute création architecturale, qu'elle soit isolée ou groupée, témoignant d'une civilisation donnée, d'une évolution significative ou d'un événement historique.(République Algérienne, 1998,art.02)

Selon Aloïs Riegl dans son ouvrage Un monument, au sens originel du terme, désigne une œuvre érigée dans l'intention précise de garder vivants dans la mémoire des générations futures des événements ou faits humains particuliers (ou un ensemble de ces éléments). Il peut s'agir soit d'un monument d'art, soit d'un monument écrit, selon que l'événement à perpétuer est transmis au spectateur par des moyens artistiques plastiques ou par une inscription. Le plus

souvent, ces deux formes se combinent et ont une valeur équivalente. L'érection et la préservation de tels monuments « voulus » remontent aux premiers temps de la civilisation humaine et se poursuivent encore aujourd'hui. (Riegl, 2013, p.69)

I.2.2 Les valeurs des monuments

Nous avons identifié trois valeurs des monuments, telles que définies par Aloïs Riegl dans son ouvrage « Le culte moderne des monuments », comme suit :

- **La valeur d'ancienneté :**

Elle est exprimée à travers le caractère non moderne du monument. Son esthétique réside dans les empreintes laissées par la dégradation naturelle de l'œuvre au fil du

- **La valeur historique :**

Elle résulte du fait que le monument détermine un moment précis de l'évolution dans un domaine particulier de l'activité humaine. Dans cette perspective, l'intérêt se concentre sur l'état originel de l'œuvre plutôt que sur les marques de sa dégradation naturelle.

- **La valeur commémorative :**

Elle s'applique aux monuments intentionnellement construits pour transmettre un message aux générations futures, bien qu'ils soient rares. Elle repose sur l'exigence d'immortalité du monument, avec une permanence de son état originel et un éternel présent. (Riegl, 2013, p.90)

I.2.3 La sauvegarde des monuments

Il s'agit de préserver la vie des monuments ou ensembles monumentaux en maintenant leurs fonctions d'origine ou en y introduisant de nouvelles fonctions de même nature. (Feilden & Jokilehto, 1996, p.37)

La sauvegarde consiste à protéger, conserver, restaurer, réhabiliter les ensembles historiques tout en gardant leur identité

I.2.4 La conservation-restauration des monuments :

- **La définition de la conservation :**

La conservation consiste à maintenir un bien patrimonial intact ou dans son état initial, à le protéger contre la destruction ou toute modification, et désigne ainsi l'ensemble des interventions destinées à empêcher sa dégradation et à prolonger sa durée de vie (Feilden, 1982). Ce concept global englobe différents types de traitements visant à préserver les édifices, sites ou villes historiques, incluant la maintenance, la réparation, la consolidation et le renforcement.(Feilden & Jokilehto, 1996,p.38)

- **La définition de la restauration :**

La restauration consiste à remettre en bon état un monument historique ou un bâtiment de style qui est endommagé ou vétuste.(Feilden & Jokilehto, 1996,p.39)

Selon Cesare Brandi la restauration définit comme :

Par restauration, on entend généralement toute intervention visant à remettre en état un produit de l'activité humaine. La restauration représente ainsi une étape méthodologique essentielle qui consiste à reconnaître l'œuvre d'art dans sa réalité matérielle et dans sa double dimension esthétique et historique, dans le but de la transmettre aux générations futures.(Brandi, 2001,p.15)

- **Les principes de la conservation-restauration :**

On distingue 7 principes de la conservation-restauration

Examen diagnostique :

Toute intervention de conservation-restauration nécessite une connaissance approfondie des matériaux de l'objet, l'évaluation de leur degré d'altération, compréhension des causes probables des altérations qu'on observe et l'appréciation des risques encourus par l'objet en l'absence de tout traitement. En somme, toute intervention commence par un examen diagnostique de l'objet et de sa signification culturelle.(Berducou, 1990,p.36)

Enregistrement des interventions :

Dès le premier examen et jusqu'à la fin de l'intervention, tout ce qui est fait, tout ce qui est observé au cours du travail doit être consigné dans un dossier, incluant les informations technologiques relevées et l'appréciation de l'état de conservation, comprenant dessins, photographies et compte-rendu des éventuels prélèvements ou analyses effectués.(Berducou, 1990,p.40)

Intervention minimum :

Il est nécessaire d'agir avec des méthodes et des produits éprouvés, dont l'impact, à la fois immédiat et à long terme, sur les matériaux originaux de l'objet peut être évalué. Puisque cet impact est rarement nul et rarement entièrement prévisible, il convient de justifier la nécessité de chaque intervention et d'en limiter l'ampleur, en particulier en justifiant toute addition aux matériaux d'origine, tout en veillant à préserver leur intégrité.(Berducou, 1990,p.40)

Conservation préventive :

Toute intervention doit être menée en tenant compte des conditions de conservation dans lesquelles sera placé l'objet après traitement. La mise en œuvre de conditions adaptées de conservation préventive permet de diminuer le degré d'intervention directe sur l'objet et de prolonger l'efficacité de la plupart des traitements.(Berducou, 1990,p.41)

Lisibilité des interventions :

Les interventions de conservation-restauration doivent éviter toute altération indétectable de l'objet et respecter son histoire matérielle. Toute restitution ou réintégration doit être justifiée, documentée et permettre de distinguer clairement les ajouts(Berducou, 1990,p.38)

Réversibilité des interventions :

Autant qu'il est possible, toute intervention doit être réversible, ce qui signifie, au sens strict, que tout ce qui a été fait doit pouvoir être défait, sans que l'objet en soit aucunement affecté.(Berducou, 1990,p.40)

Compatibilité des matériaux introduits :

Les matériaux qui sont placés au contact direct des matériaux originaux constitutifs de l'objet doivent être compatibles avec eux, sur les plans mécanique, chimique, physique et éventuellement optique. Cela vaut pour les produits et matériaux utilisés brièvement sur un objet à une étape du traitement (solvants, désinfectants, etc.).(Berducou, 1990,p.41)

Réhabilitation :

La réhabilitation englobe les améliorations matérielles nécessaires pour permettre une utilisation adéquate d'une structure vide ou sous-utilisée. Elle devrait toujours viser une réutilisation aussi proche que possible de la fonction originale, afin de minimiser l'intervention et la perte de valeur culturelle, tout en s'inscrivant dans une démarche économique raisonnable.(Feilden & Jokilehto, 1996,p.93)

I.3 Les musées :

I.3.1 La définition de musée :

Selon l'ICOM Un musée est une institution permanente à but non lucratif, au service de la société et de son développement, ouverte au public. Il acquiert, conserve, étudie, transmet et expose le patrimoine matériel et immatériel de l'humanité ainsi que son environnement, dans un but d'étude, d'éducation et de plaisir.(International Council of Museums (ICOM), 2017)

I.3.2 La naissance des musées

Au début de leur création les musées faisaient principalement office d'entrepôts destinés à conserver des trésors, des butins de guerre et des objets précieux, exposés au public à des fins de divertissement.

Dans les civilisations anciennes, les temples jouaient souvent le rôle de dépôts pour divers artefacts et offrandes précieuses destinées aux divinités. Progressivement, ces lieux ont dépassé leur fonction religieuse pour devenir des espaces de contemplation et de découverte.

À l'époque byzantine, certaines églises étaient dotées de salles où l'on exposait des peintures religieuses, des ornements, des textiles, voire même des maquettes de bateaux. De manière similaire, sous les califats abbasside et andalou, les souverains attachaient une grande importance à la collecte et à la préservation d'objets rares, souvent conservés dans les palais ou des trésors dissimulés.

À la fin du XVe siècle et au début du XVIe siècle, les familles royales et aristocratiques commencèrent à collectionner des statues antiques, en particulier celles issues de l'époque romaine. Cet engouement mena à la création des premières salles d'art et des cabinets de curiosités, dès la seconde moitié du XVIe siècle. On y rassemblait une vaste diversité d'objets,

allant des antiquités ethnographiques aux spécimens naturels (animaux, plantes, artefacts métalliques, etc.).

Au XVIII^e siècle, l'intérêt grandissant des érudits et intellectuels pour la peinture et la sculpture contribua à l'émergence des galeries d'art et des premières formes d'expositions ouvertes au public.(Tony Bennett, 1999,p.52)

I.3.3 Le rôle des musées :

Le musée est considéré comme l'un des meilleurs espaces pour exposer les objets anciens, les œuvres d'art et les éléments du patrimoine culturel. Il exerce une influence importante sur le public, car il constitue à la fois un moyen de comprendre le passé et une source d'inspiration pour le développement et l'épanouissement de la société.

Il existe plusieurs rôles du musée. Selon le Conseil international des musées (ICOM), un musée a cinq fonctions principales : la recherche, l'acquisition, la conservation, la communication et la présentation.(Conseil international des musées (ICOM), 2022)

Les fonctions essentielles du musée consistent dans : l'exposition, la protection et la conservation, le stockage et la maintenance des objets du patrimoine, la communication et l'animation pour les visiteurs

I.3.4 Types des musées :

On distingue les collections suivantes selon la provenance et le type de pièces exposées (Neufert, 2014).

- **Le musée d'art** : il regroupe des œuvres issues des arts plastiques, incluant les arts graphiques et l'artisanat d'art.
- **Le musée d'histoire culturelle** : il présente des objets, armes, vêtements, documents écrits, etc., illustrant l'évolution culturelle d'une région donnée. Cela comprend les musées des traditions populaires, les musées en plein air ou encore ceux dédiés à la culture populaire.
- **Le musée ethnographique** : il conserve des pièces représentatives du patrimoine culturel des peuples traditionnels et des cultures premières.
- **Le musée des sciences** : ses collections incluent du matériel éducatif et d'observation lié aux sciences naturelles et aux technologies(Neufert et al., 2014)

I.3.5 La mise en réserve des collections de musée :

- **La conservation préventive :**

La conservation des objets vise à la protection des dommages causés par l'homme ou l'environnement. Un contrôle strict des conditions (humidité, température, lumière, pollution, poussière, ventilation) est essentiel, que les objets soient en réserve ou exposés. Ces facteurs jouent un rôle clé dans la préservation des collections et doivent être surveillés dans l'ensemble du musée. (Johnson & Horgan, 1980b)

- **La climatisation :**

La climatisation des musées contrôle la température, l'humidité, la ventilation et la filtration des polluants pour protéger les collections. Les changements de température et d'humidité peuvent provoquer plusieurs sortes de dégâts, activer le vieillissement des matériaux et peut leur faire perdre diverses propriétés mécaniques. Les matériaux réagissent différemment à l'humidité et à la température : bois, papier et textiles se déforment, tandis que les métaux rouillent et les peintures se fissurent.

Donc Il est essentiel de choisir un taux de l'humidité et température qui convienne à tous les éléments d'un objet de matériaux composites et maintenir des conditions stables, avec des changements progressifs adaptés aux saisons et aux transferts d'objets. (Conseil international des musées (ICOM), 2022)

Humidité et température : normes à respecter :

Le tableau 1 présente les principes à suivre pour obtenir un environnement climatique adéquat. Ces normes sont généralement reconnues, bien que certaines fassent l'objet de débats et soient en cours de révision. Elles doivent être appliquées avec prudence, car elles décrivent des conditions optimales. Les limites à respecter pour assurer la bonne conservation d'un spécimen varient en fonction de son histoire, de sa structure et des conditions climatiques auxquelles il a déjà été exposé

Matériaux	Sensibilité à l'humidité Maximum Minimum	Effets sur les dimensions	Sensibilité aux moisissures
Papier	60% 45% (45 % optimum)	Un dessèchement ou un gel rapide entraînent une perte de souplesse	Extrême
Cuir	60% 45%	Cela varie selon le procédé de tannage. Le cuir est très sensible au rétrécissement lorsqu'il est humide	Variable. Élevée pour les cuirs fins
Tissus, Fibres naturelles	60% 45%	Le phénomène est inversé : en raison de la torsion des fibres, les tissus rétrécissent lorsque les fibres gonflent et se détendent lorsque les fibres se contractent. La soie et la laine sont plus vulnérables aux effets de l'humidité que le coton ou la toile. Les textiles peints sont particulièrement sensibles aux variations d'humidité.	Élevée
Bois	60% 45%	Ils sont lents et varient en fonction de la masse ainsi que des traitements anti-humidité. Ils sont influencés par les cycles hebdomadaires, en particulier par les variations saisonnières	Négligeable, sauf en cas d'humidité relative très forte
Métaux (polis)	De préférence inférieure à 30 %	Les variations d'humidité n'affectent pas les dimensions des métaux, mais ces derniers peuvent se déformer sous des écarts extrêmes de température.	

Verre	60% 45%	Généralement, le verre résiste bien aux variations atmosphériques normales. Cependant, il faut éviter les changements rapides d'humidité et de température, car le verre peut être endommagé en cas d'humidité très élevée ou très basse.	
--------------	------------	---	--

Tableau 01 : Humidité et température : précautions à prendre pour la conservation
Source : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000135553>

- **L'éclairage :**

Les effets de la lumière sur la conservation des objets de musée font toujours l'objet de recherches. Les avis des conservateurs à ce sujet divergent, mais beaucoup d'entre eux reposent davantage sur des impressions subjectives que sur des données expérimentales.

L'éclairage doit être faible (environ 100 lux pour les pièces sensibles) et filtrer les rayons ultra-violets. L'usage de lampes à incandescence ou fluorescentes dans des espaces clos est déconseillé en raison de la chaleur dégagée. Des recherches récentes montrent que l'obscurité totale peut altérer la couche de vernis des peintures, soulignant la nécessité d'études approfondies pour des recommandations basées sur des preuves scientifiques. (Johnson & Horgan, 1980c)

- **Fumigation :**

Avant d'être placés en réserve, les objets doivent faire l'objet d'un examen préalable. Ce processus peut nécessiter une analyse en laboratoire, un nettoyage, un dépoussiérage, une fumigation, ainsi que des travaux de restauration réalisés par des spécialistes. Certains types de collections requièrent une surveillance périodique, ce qui doit être pris en compte lors du choix de leur emplacement au sein de la réserve

Un système de signalisation spécial permettra de les identifier et de les retrouver plus facilement. (Johnson & Horgan, 1980a)

- **Vibrations :**

Les vibrations peuvent endommager certaines collections, notamment avec les systèmes mobiles de stockage. Il est essentiel de choisir et d'utiliser ces systèmes avec soin pour minimiser leur impact. Leur conception et leur utilisation doivent réduire au maximum les vibrations.

Conclusion

Ce cadre théorique a permis de définir les notions fondamentales liées au patrimoine, d'en distinguer les différentes formes et d'examiner les principales approches de sa conservation et de sa valorisation. Il a également mis en évidence le rôle central des institutions culturelles, telles que les musées, dans la transmission et la sauvegarde du patrimoine. Ces éléments conceptuels constituent une base essentielle pour l'analyse qui sera menée dans les chapitres suivants.

Chapitre 02 : la performance énergétique dans les bâtiments patrimoniaux

Introduction

Les bâtiments patrimoniaux font partie de notre histoire et de notre culture. Cependant, ils ne répondent pas toujours aux exigences actuelles en matière de confort et de consommation d'énergie. Aujourd'hui, il est devenu essentiel de trouver un équilibre entre la préservation de leur valeur architecturale et l'amélioration de leur performance énergétique.

Ce chapitre aborde trois aspects importants liés à cette problématique : le confort thermique dans les bâtiments patrimoniaux, l'éclairage naturel et artificiel adapté aux bâtiments patrimoniaux, ainsi que l'intégration des énergies renouvelables dans ces édifices. Ces éléments sont essentiels pour rendre ces bâtiments plus confortables et plus durables, tout en respectant leur identité.

Le chapitre se termine par l'analyse de deux exemples, qui montrent comment il est possible d'améliorer la performance énergétique tout en respectant le caractère patrimonial des bâtiments.

II.1 La performance énergétique

II.1.1 Qu'est-ce que la performance énergétique :

La « performance énergétique d'un bâtiment » est définie comme « *la quantité d'énergie réellement consommée ou estimée pour répondre aux différents besoins liés à une utilisation normalisée du bâtiment* ». Cette quantité doit être reflétée dans un ou plusieurs indicateurs numériques, qui ont été calculés en tenant compte de :

- L'isolation,
- Les caractéristiques techniques et d'installation,
- La conception et le positionnement par rapport aux aspects climatiques,
- L'exposition solaire et l'influence des structures voisines,
- La production d'énergie propre,
- D'autres facteurs, y compris le climat intérieur, qui influencent la performance énergétique.(Poel et al., 2007,p.06)

II.1.2 Principes clés pour la préservation énergétique des bâtiments patrimoniaux

Éviter les interventions systématiques : Il est essentiel de refuser toute modification irréversible, comme l'isolation par l'extérieur, le remplacement massif des menuiseries ou la pose de panneaux solaires en toiture, sans une évaluation préalable de la valeur patrimoniale du bâtiment.

Privilégier une approche spécifique et durable : La réhabilitation doit viser la préservation des qualités intrinsèques du bâtiment, encourager le réemploi des matériaux et intégrer des solutions techniques à la fois innovantes et durables.

Procéder à une analyse au cas par cas : Chaque édifice doit faire l'objet d'une étude individualisée, prenant en compte son contexte culturel, son authenticité et son intégrité.

Assurer un entretien régulier : La meilleure forme de conservation reste un entretien constant, adapté aux besoins spécifiques de l'édifice.

les caractéristiques patrimoniales : Les interventions doivent être réversibles, discrètes et conformes aux chartes et principes internationaux de conservation (Ministère de la Culture France, 2025)

II.2 Le confort thermique dans les bâtiments patrimoniaux

II.2.1 Qu'est-ce que le confort thermique :

Le confort thermique est une notion qui décrit la satisfaction d'une personne par rapport à son environnement thermique. Il dépend de plusieurs facteurs, à la fois objectifs (température, humidité, vitesse de l'air) et subjectifs (activité physique, habillement, métabolisme individuel).

Selon la norme ISO 7730, le confort thermique est défini comme :

"L'état d'esprit qui exprime la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique."(International Organization for Standardization (ISO), 2005)

II.2.2 Comportement thermique et hygrométrie des bâtiments patrimoniaux

Un bâtiment ancien, possède des qualités thermiques et hydriques naturelles. Il s'adapte à son environnement (eau, air, climat) grâce à un équilibre fragile, ce qui le rend « respirant ». Fait de matériaux locaux peu transformés (terre cuite, chaux, verre, fer), il est durable et en grande partie réemployable. Bien conservé, il offre généralement de bonnes performances thermiques. (ATHEBA, 2000,p.01)

II.2.2.1 Comportement thermique des bâtiment patrimoniaux

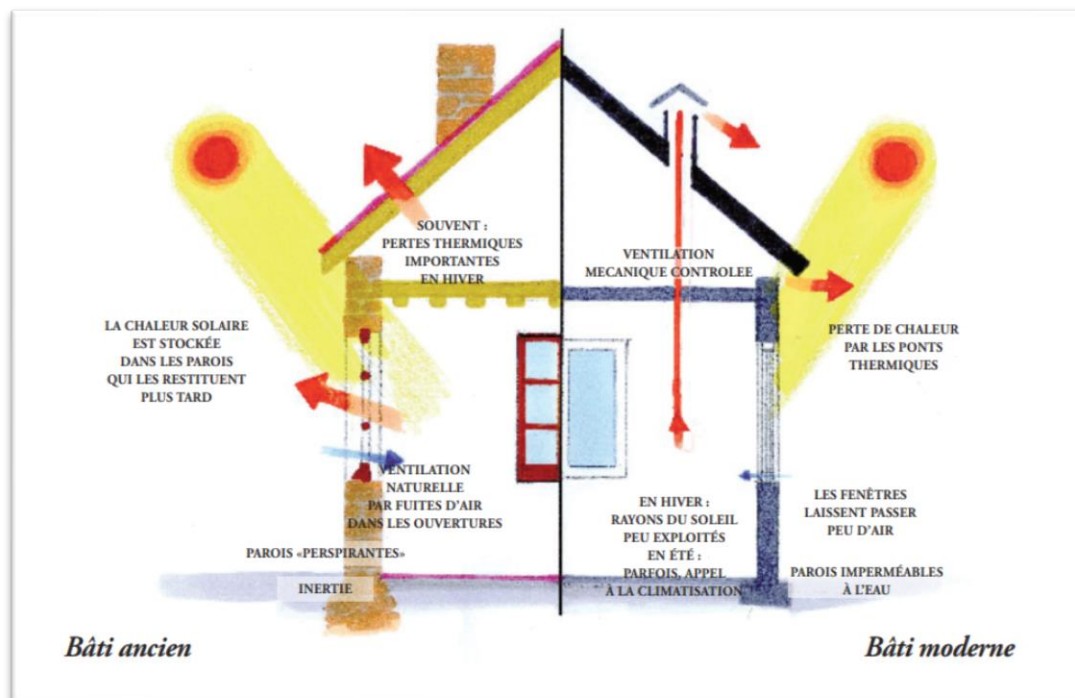


Figure 02 : Comparaison entre le bâti ancien et le bâti moderne : fonctionnement thermique et ventilation

Source : <https://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/07/ATHEBA-comportement-thermique.pdf>

Le bâti moderne Généralement conçu pour être étanche à l'air et à l'eau, avec une ventilation assurée de manière artificielle.

Le bâti ancien :

Tire partie du site dans lequel il s'inscrit pour gérer son air, sa température et sa vapeur d'eau intérieurs.

Inertie thermique élevée.

Matériaux microporeux permettant les échanges d'humidité.

Comportement thermique spécifique(ATHEBA, 2000,p.02)

- **Le comportement thermique d'hiver :**

Les points forts du bâti ancien :

Architecture bioclimatique et forte inertie thermique. Implantation dans le site réfléchi : il récupère les apports solaires et se protège contre les vents .(ATHEBA, 2000)

Les points faibles du bâti ancien :

Les déperditions thermiques s'effectuent par le toit, le plancher bas et les défauts d'étanchéité à l'air.

Moins importantes par les murs épais offrant une bonne inertie et imperméabilité à l'air.

Déperditions souvent surestimées, représentant une faible part des pertes globales (ATHEBA, 2000,p.04)

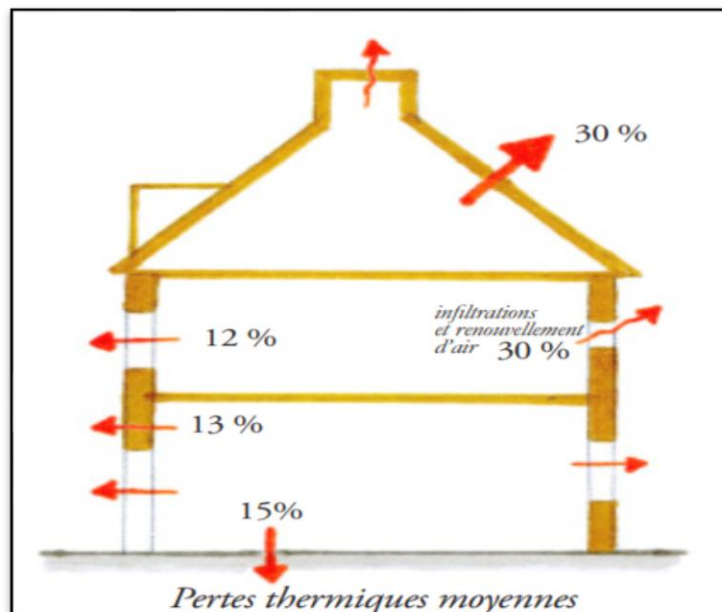


Figure 03 : les pertes thermiques dans le bâtiment ancien
Source :<https://maisonspaysannes.org/wpcontent/uploads/2013/07/ATHEBA-comportement-thermique.pdf>

- **Comportement thermique d'été :**

Confort naturel du bâti ancien grâce à son inertie thermique.

Rôle de l'inertie :

La masse des murs et planchers stocke la fraîcheur nocturne.

Restitution progressive avec un déphasage de 12 heures en été.

Autres sources de confort en été :

Protections solaires extérieures : Volets, végétation, ou éléments bâtis bloquent le rayonnement solaire.

Organisation intérieure traversante : Favoriser un balayage naturel de l'air pour rafraîchir la nuit.

Évaporation : L'eau contenue dans les murs refroidis et l'air en s'évaporant sous le soleil(ATHEBA, 2000,p.04)

II.2.2.2 Comportement hygrométrique des bâtiments patrimoniaux :

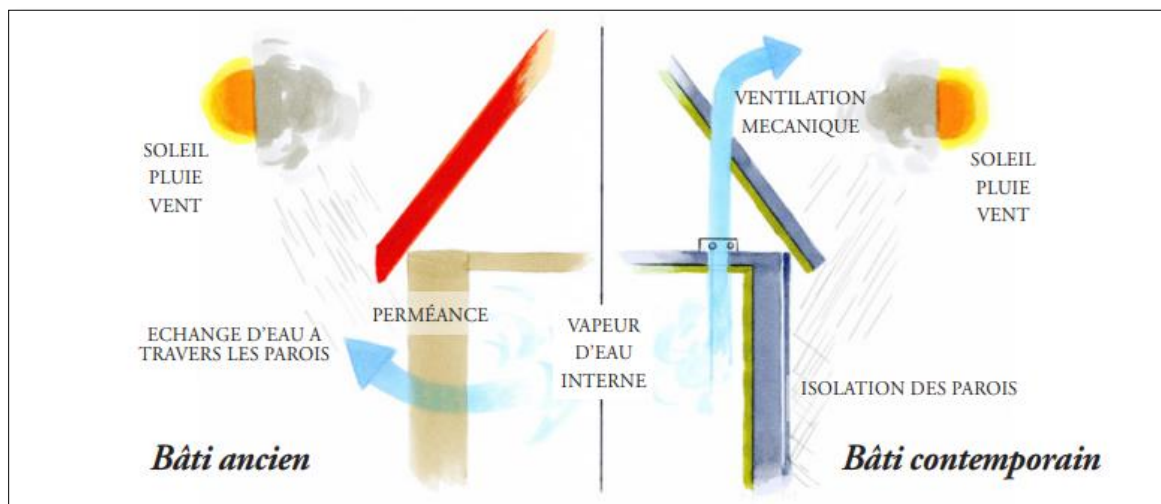


Figure 04 : Gestion de l'humidité : comparaison entre bâti ancien et bâti contemporain

Source : <https://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/07/ATHEBA-comportement-thermique.pdf>

- **Différences majeures entre bâti contemporain et bâti ancien**

Matériaux et gestion de l'humidité :

Bâti contemporain : Matériaux fabricants (béton, enduits monocouches) sont souvent moins sensible à l'humidité mais aussi imperméables à la vapeur d'eau.

Bâti ancien : Matériaux traditionnels (chaux, bois, pierre) plus sensibles à l'humidité mais perméables à la vapeur d'eau, (favorisant les échanges naturels).(ATHEBA, 2000)

Ventilation :

Bâti contemporain : Ventilation mécanique contrôlée obligatoire mais souvent mal entretenue et peu fiable.

Bâti ancien : Ventilation naturelle et continue, intégrée dans sa conception.(ATHEBA, 2000)

Gestion de l'humidité du sol :

Bâti contemporain : Coupure de capillarité obligatoire (bitume, plastique, produits chimiques) pour empêcher les remontées d'humidité depuis le sol.

Bâti ancien : Conception naturelle pour gérer l'humidité :

Fondations sur un lit de pierres pour drainer l'eau.

Soubassements en pierres denses et ingélives (résistantes au gel) pour limiter l'humidité.

Matériaux perméables à la vapeur d'eau permettant des échanges naturels.(ATHEBA, 2000)

- **Effets de l'isolation sur le comportement hygrométrique des parois traditionnelles**

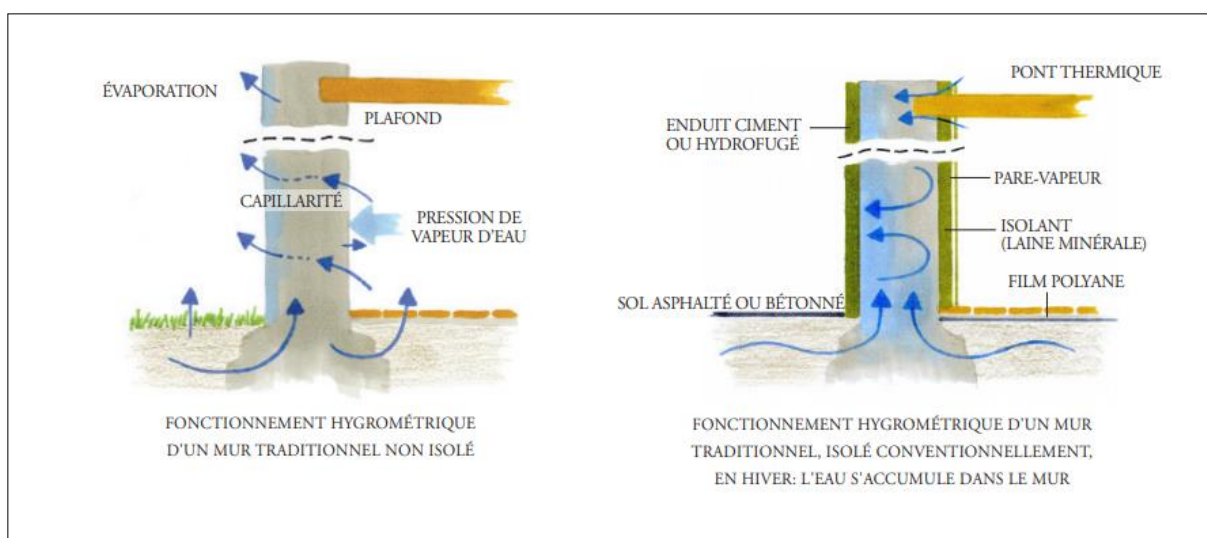


Figure 05 : Impact de l'isolation sur le comportement hygrométrique des murs traditionnels
Source : <https://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/07/ATHEBA-comportement-hygrometrique.pdf>

Mur non isolé : L'humidité remonte naturellement par capillarité et s'évacue grâce à l'évaporation, permettant un équilibre hygrométrique stable.

Mur isolé conventionnellement : L'ajout d'un pare-vapeur et d'un enduit imperméable empêche l'humidité de s'évacuer, provoquant une accumulation d'eau dans le mur en hiver, ce qui peut dégrader la structure et réduire l'efficacité thermique.(ATHEBA, 2000)

II.2.3 L'amélioration thermique des bâtiments patrimoniaux

Avant d'entamer la réhabilitation d'un bâti patrimonial, il est essentiel de réaliser un diagnostic approfondi pour mieux connaître ses spécificités : valeur patrimoniale, état sanitaire et structurel. L'objectif de la réhabilitation est de préserver au maximum ses caractéristiques architecturales, notamment ses éléments distinctifs, sa volumétrie, son apparence et ses matériaux d'origine.

Le diagnostic va pouvoir faire ressortir les qualités existantes, les défauts à corriger, les améliorations possibles et les interventions à éviter, pour enfin faire le choix des interventions à réaliser.

Toute intervention doit s'efforcer de répondre à ces 5 points :

- Assurer ou améliorer le confort des personnes dans le bâtiment,
- Réduire la consommation énergétique et optimiser les coûts associés,
- Préserver la durabilité du bâtiment en tenant compte de ses caractéristiques hygroscopiques,
- Favoriser des solutions écologiques, notamment dans le choix des matériaux,
- Garantir le respect des valeurs patrimoniales, architecturales et paysagères du bâtiment.

II.2.3.1 Isolation des toitures :

Les déperditions énergétiques d'un bâtiment liées aux combles et aux toitures sont de l'ordre de 30% des déperditions totales d'un bâtiment.

Il est essentiel de traiter cet espace correctement afin de réduire ses dépenses énergétiques.

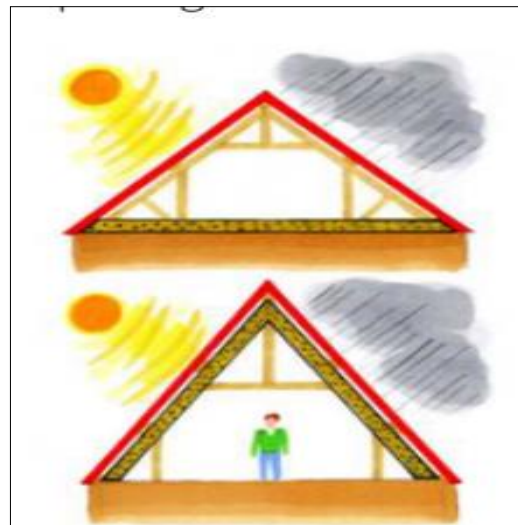


Figure 06 : Effet de l'isolation thermique du toit
Source : <https://maisons-paysannes.org>

Une isolation par l'intérieur est donc à privilégier :

Isoler le plancher des combles (exemples : tapis/parquet).

Créer un isolant sur les rampants de la toiture (de type ouate de cellulose) ou des panneaux rigides entre chevrons (de type laine de bois).(ATHEBA, 2000)

II.2.3.2 Isolation du sol

Les fuites thermiques par le sol du rez-de-chaussée sont souvent non négligeables pour le bâti ancien. En effet cela représente environ 15% des déperditions totales d'un bâtiment. Pour limiter les remontées capillaires, il convient d'éviter toute barrière étanche aux conséquences néfastes. Sur la base d'un "hérissseon ventilé", un traitement approprié du sol avec des matériaux naturels et perspirants peut réduire significativement les pertes par le sol :

1. Dalle chaux/chanvre
2. Isolation avec du liège.(ATHEBA, 2000)

II.2.3.3 Remplacement des menuiseries

La menuiserie de fenêtre forme la membrane sensible entre l'espace intérieur de la maison et le dehors. D'ordre fonctionnel mais aussi esthétique, cet élément architectural remarquable participe à la qualité de la façade et au confort intérieur. Elle apporte une isolation

pour le bruit et les températures ainsi qu'une étanchéité contre la pluie et le vent tout en permettant la bonne aération des pièces du bâtiment(ATHEBA, 2000,p02)

- **Le renforcement du vitrage :**

Cette solution applicable lorsque la menuiserie ancienne est en bon état, ou peut être restaurée, et peut supporter une réfection de ses vitrages.

Installer un survitrage intérieur monté sur un châssis ouvrant, ajusté aux dimensions de la fenêtre existante.

Remplacer les vitrages d'origine par des double vitrages minces, tout en conservant les petits bois d'origine, afin de préserver l'esthétique.(ATHEBA, 2000)

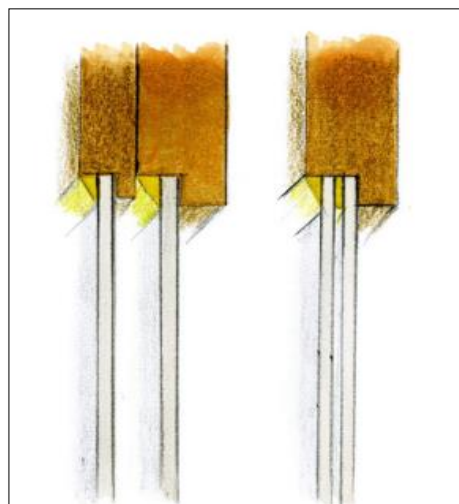


Figure 07 : Exemple de renforcement du vitrage

Source : <https://maisons-paysannes.org>

- **La conservation et la restauration des menuiseries d'origine :**

Une fenêtre en bois peut généralement être réparée ou ajustée pour s'adapter aux mouvements naturels de la maçonnerie pour garder pour conserver l'authenticité du bâtiment.

- **La pose d'une double fenêtre :**

Cette solution consiste à installer une seconde fenêtre à l'intérieur, derrière la menuiserie d'origine. Elle présente plusieurs avantages :

- L'aspect patrimonial de la façade est préservé,
- L'isolation thermique est améliorée, avec des performances comparables à celles d'une fenêtre simple équipée de double vitrage.

Coût équivalent(ATHEBA, 2000).



Figure 08 : Exemple de double fenêtre

Source : <https://maisons-paysannes.org>

- **Le remplacement par une nouvelle menuiserie isolante :**

Le remplacement par une nouvelle fenêtre à vitrage thermique offre une solution satisfaisante sur le plan thermique, mais soulève deux problèmes :

- Sur le plan architectural : la nouvelle fenêtre doit avoir un design identique à l'original,
- Sur le plan aérodynamique : le remplacement complet de la menuiserie par une fenêtre neuve réduit généralement fortement les infiltrations d'air, ce qui nécessite de repenser la ventilation du logement.(ATHEBA, 2000)

II.2.3.4 Intervention sur les murs :

L'amélioration hygrothermique des murs anciens dépend d'abord d'une réhabilitation de la maçonnerie ancienne. Pour retrouver les qualités d'origine, il faut :

Assurer un bon drainage intérieur voire extérieur

Supprimer tout produit imperméable

Traiter les désordres (fissures)

Protéger le mur par des enduits respirants, extérieurs et/ou intérieurs, en chaux naturelle ou plâtre par exemple.(ATHEBA, 2000)

II.3 L'éclairage artificiel au service du patrimoine culturel :

II.3.1 Qu'est-ce que l'éclairage artificielle :

L'éclairage artificiel désigne l'ensemble des sources de lumière produites par l'homme afin d'éclairer des espaces, qu'ils soient intérieurs ou extérieurs, en remplacement ou en complément de la lumière naturelle. Il inclut les systèmes d'éclairage électrique, comme les lampes, les projecteurs, les LED, ainsi que d'autres équipements lumineux employés dans divers contextes, tels que les bâtiments, les rues, les espaces publics, les zones industrielles et les habitations privées. (Magalie Franchomme, 2022, p.71)

II.3.2 Type d'éclairage artificielle :

- **Éclairage direct :**

Il s'agit d'un éclairage obtenu par des lampes à incandescence ou à fluorescence qui émettent leur lumière directement sur l'objet.

- **Éclairage indirecte :**

Il s'agit d'un éclairage produit par une source artificielle invisible, qui est dirigée vers un plan réflecteur intermédiaire. Ce dernier diffuse la lumière dans l'espace, créant ainsi une lumière douce et très homogène, tout en évitant les problèmes d'éblouissement dus au reflet.



Figure 9 : éclairage indirecte

Source : : <https://webmuseo.com/ws/musee-historiquearcheologique-orleanais/app/collection/expo/38>

- **Éclairage ponctuel :**

L'éclairage par spots utilise des lampes halogènes spécialement conçues pour un éclairage ciblé. Ce type d'éclairage est généralement réservé à un espace précis, souvent employé pour mettre en valeur des tableaux célèbres ou des collections, tout en laissant les autres zones dans l'ombre



Figure 10 : Éclairage ponctuel

Source : : <https://www.sammode.com/wpcontent/uploads/2020/04/Mus%C3%A9es-LGH-FR-022020-1.pdf>

II.3.3 Importance de la Lumière artificielle dans les services du patrimoine culturel :

- **Mise en Valeur des Œuvres d'Art :** La lumière permet de présenter les objets d'art sous différents angles et de créer des ambiances variées. Elle met en valeur les détails et les textures des œuvres
- **Guidage des Visiteurs :** La lumière guide émotionnellement les visiteurs dans les espaces muséaux et culturels. Elle influence la perception des œuvres d'art et structure les expositions
- **Création d'Ambiances et d'Émotions :** La lumière est utilisée pour créer des ambiances spécifiques, comme des atmosphères nocturnes ou des jeux de lumière dynamiques, qui éveillent des émotions chez les visiteurs.
- **Protection des Objets Sensibles :** La lumière doit être contrôlée pour protéger les objets sensibles (comme les textiles anciens ou les peintures) (Zumtobel Lighting GmbH, 2010,p.03)

II.3.4 Techniques d'éclairage artificiel pour les bâtiments patrimoniaux :

II.3.5 Système de fibres optiques STARFLEX :

II.3.5.1 Définition :

Est une solution d'éclairage modulaire et innovante développée par Zumtobel Staff, conçue pour des applications exigeantes en matière de précision, de sécurité et de créativité lumineuse. (Zumtobel Lighting GmbH, 2010, p.06)



Figure 11 : Lampe STARFLEX

Source : https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/FR/AWB_Kunst_und_Kultur.pdf

II.3.5.2 Composants clés :

Le générateur de lumière

- La puissance
- L'aération efficace et silencieuse.
- La modularité pour l'utilisateur.

Les fibres optiques

- Fibres de verre : Résistantes à la chaleur (jusqu'à 110°C), ininflammables, longue durée de vie (>20 ans).

Les optiques

- Encastrées, orientables, ou décoratives (ex. cristaux).
- Permettent des angles de lumière précis (7° à 70°) ou des effets spéciaux (ciel étoilé, lignes lumineuses). (Zumtobel Lighting GmbH, 2010)

II.3.5.3 Avantages de l'utilisation de Système de fibres optiques STARFLEX :

Sécurité : Aucun risque électrique aux points d'éclairage (idéal pour les zones humides ou les musées).

Précision : Permet un éclairage précis et froid, idéal pour les textiles anciens ou les artefacts sensibles à la chaleur.

Durabilité : Longue durée de vie des fibres et maintenance réduite.

II.3.6 Projecteurs à LED (ARCOS) :

II.3.6.1 Définition

Les LED ARCOS font partie d'une gamme de projecteurs haut de gamme conçus par Zumtobel, spécialement destinés à l'éclairage fonctionnel et esthétique des musées, galeries, espaces d'exposition et magasins (Zumtobel Lighting GmbH, 2010)



Figure 12 : Les lampe LED ARCOS

Source : https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/FR/AWB_Kunst_und_Kultur.pdf

II.3.6.2 Types de projecteurs :

ARCOS LED Stable White:

- Excellent indice de rendu des couleurs
- Lentille secondaire pour une répartition uniforme du flux lumineux
- Haut rendement énergétique

ARCOS LED ajustable White

- Variation continue de température de couleur
- Idéal pour un éclairage d'accentuation dynamique

ARCOS LED Tempura

- Spécialisé en éclairage RGB (Red, green, Blue) pour mises en scène colorées (Zumtobel Lighting GmbH, 2010)

II.3.6.3 Avantages de l'utilisation de LED ARCOS :

- Économies d'énergie
- Un éclairage pour les objets sensibles
- Variation de la température de couleur
- De nouvelles dimensions
- Durée de vie et entretien
- Mises en scène à l'aide de couleurs (Zumtobel Lighting GmbH, 2010)

II.4 Solutions d'énergie renouvelable pour les bâtiments patrimoniaux

La transition énergétique vers des sources durables représente aujourd'hui un enjeu majeur, y compris pour le secteur du patrimoine bâti. Les bâtiments historiques, bien que riches en valeur culturelle et architecturale, sont souvent énergivores et peu adaptés aux normes actuelles de performance énergétique. Intégrer des solutions d'énergie renouvelable dans ces édifices pose un double défi : améliorer leur performance énergétique tout en préservant leur identité patrimoniale. Cette démarche nécessite une approche sensible, alliant innovation technologique et respect du caractère patrimonial des constructions.

II.4.1 Énergie solaire et le patrimoine :

L'énergie solaire est une source propre et inépuisable. Son utilisation est encouragée par les politiques publiques pour réduire la consommation d'énergie et promouvoir les énergies renouvelables. Dans les bâtiments patrimoniaux, l'installation de panneaux solaires peut être une solution efficace, surtout avec la hausse des prix des énergies fossiles et les aides disponibles. Cependant, ces installations peuvent altérer l'apparence historique de ces édifices. Il est donc essentiel de veiller à l'intégration harmonieuse des équipements solaires en respectant la forme, les matériaux et les couleurs du bâtiment afin de préserver son caractère patrimonial. (Labouret, 2010, p.23)

II.4.2 Importance de l'énergie solaire :

Le soleil est une énergie propre, renouvelable et inépuisable, soutenue par les politiques publiques.

L'essor des panneaux solaires est encouragé pour répondre à la hausse des prix des énergies fossiles. (Labouret, 2010)

II.4.3 Compatibilité des installations solaires avec l'architecture patrimoniale

L'installation de capteurs solaires doit préserver l'authenticité et l'esthétique des bâtiments historiques.

Il est essentiel de prendre en compte : les volumes, matériaux, couleurs et visibilité des panneaux.

Éviter l'installation côté rue ; favoriser la pose en partie basse des toitures, sur annexes ou au sol (Labouret, 2010)

II.4.4 Les panneaux solaires

Un panneau solaire, ou capteur solaire, est un dispositif conçu pour capter une partie de l'énergie du rayonnement solaire et la transformer en une forme d'énergie utilisable. (Labouret, 2010)

On distingue deux types de panneaux solaires.

Les panneaux solaires thermiques :

Ces panneaux appelés capteurs solaires thermiques, récupèrent sous forme de chaleur l'énergie du soleil qui est utilisée pour un préchauffage de l'eau

Les panneaux solaires photovoltaïques

Cette technique consiste à convertir la lumière en électricité. (Labouret, 2010)

II.4.5 Les panneaux solaires photovoltaïques :

- **Définition de panneaux solaires photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque correspond à l'électricité produite par la conversion d'une partie du rayonnement solaire grâce à des cellules photovoltaïques.

Le terme « photovoltaïque » fait référence à un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque, découvert par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. On estime que l'énergie émise chaque année par le soleil est environ 40 000 fois supérieure à la consommation mondiale actuelle en énergies fossiles. Pourtant, cette ressource reste encore sous-exploitée. (Labouret & Villos, 2003)

L'effet photovoltaïque correspond à la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, grâce à des cellules généralement fabriquées à partir de silicium. Pour atteindre une puissance suffisante, ces cellules sont connectées entre elles pour former un module solaire (Labouret & Villos, 2003)

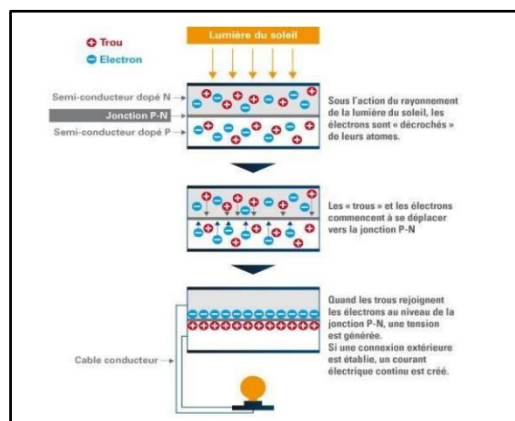


Figure 13 : L'effet photovoltaïque

Source : <https://www.enercool.fr/blogs/news/rendement-de-vos-panneaux-solaires-pensez-au-cool-roofing>

- **Principe d'une cellule photovoltaïque :**

Une cellule photovoltaïque est un capteur composé d'un matériau semi-conducteur capable d'absorber la lumière et de la transformer directement en courant électrique continu. Son fonctionnement repose sur la capacité de certains matériaux à capter le rayonnement solaire. Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, les photons transfèrent leur énergie aux électrons des atomes du matériau. Si cette énergie est suffisante, ce qui constitue le phénomène connu sous le nom d'effet photovoltaïque (Labouret & Villos, 2003)

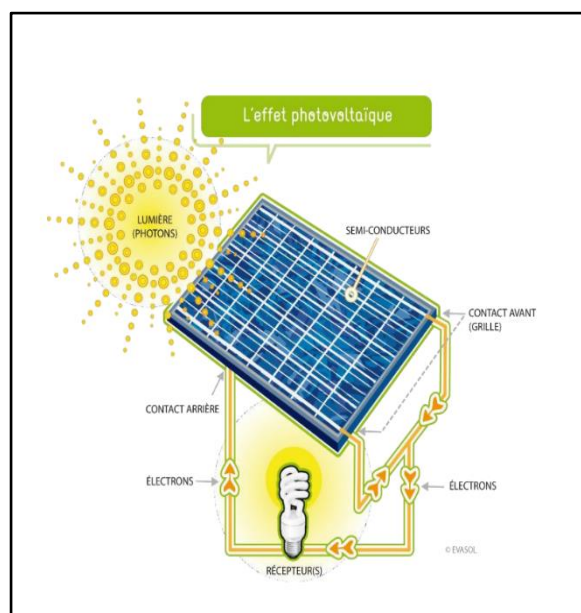


Figure 14 : Principe de l'énergie photovoltaïque
Source :

<https://www.enercool.fr/blogs/news/rendement-de-vos-panneaux-solaires-pensez-au-cool-roofing>

- **Les différents types de technologies de cellules photovoltaïques :**

Silicium monocristallin :

Pour ce type d'applications technologiques, le silicium pur est extrait de la silice contenue dans le quartz ou le sable par des procédés chimiques et métallurgiques. Ce matériau offre un meilleur rendement électrique et une durée de vie environ deux fois supérieure à celle du silicium amorphe, mais il reste beaucoup plus coûteux (Labouret & Villos, 2003)

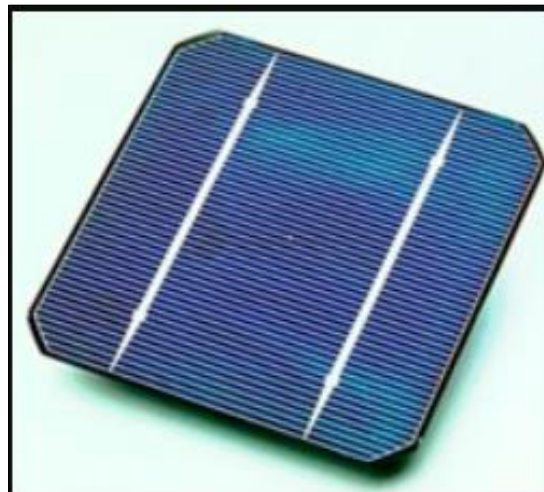


Figure 15 : Cellules en silicium monocristallin

Source : solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Monocristallin.png

Silicium polycristallin :

Le silicium polycristallin est un matériau formé de plusieurs cristaux juxtaposés, obtenus par un procédé de moulage. Moins coûteux que le silicium monocristallin, il permet la fabrication de cellules solaires carrées ou rectangulaires, faciles à manipuler et à assembler (Labouret & Villos, 2003)

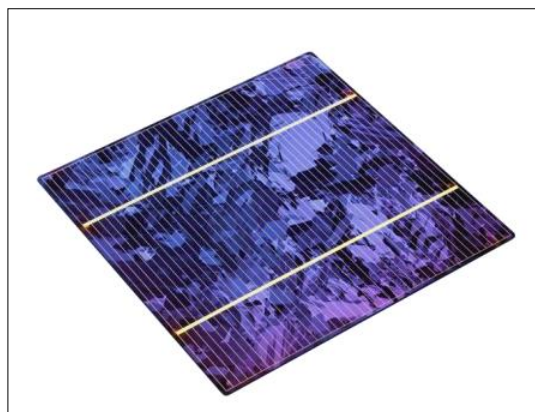


Figure 16 : Cellules en silicium polycristallin

Source : solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Monocristallin.png

- **Silicium amorphe**

Le silicium amorphe absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois plus efficacement que le silicium cristallin. Les cellules photovoltaïques fabriquées à partir de ce matériau sont constituées de couches très fines. (Labouret & Villos, 2003)



Figure 17 : Cellule au Silicium amorphe

Source : <https://www.infoenergiesrenouvelables.fr/panneaux-solaires-amorphes/>

- **Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">▪ Énergie électrique propre et non polluante lors de son utilisation▪ S'inscrit dans une démarche de développement durable▪ Source renouvelable, car inépuisable à l'échelle humaine▪ Peut être utilisée dans les zones isolées ou les pays en développement, même sans accès au réseau électrique	<ul style="list-style-type: none">▪ Le coût varie en fonction de la puissance installée (puissance crête)▪ La puissance produite est limitée▪ Le marché est encore restreint, mais en constante évolution▪ L'électricité est produite uniquement le jour, alors que la demande des particuliers est plus forte la nuit▪ Le stockage de l'électricité reste complexe et coûteux, avec un impact écologique élevé des batteries

Tableau 02 : Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque



Source : auteur

II.5 L'analyse des exemples

L'analyse d'exemples existants constitue une étape essentielle dans tout processus de réflexion architecturale, muséographique ou conceptuelle. Elle permet de tirer des enseignements concrets à partir de projets réalisés. Ces études de cas offrent une base de comparaison précieuse pour comprendre les bonnes pratiques, les stratégies innovantes.

II.5.1 Exemple 01: museum of Islamic art:

Projet	Éclairage du Musée d'Art Islamique
<p>Presentation du projet</p>	<div data-bbox="592 667 1209 1010" data-label="Image"> </div> <p>Figure 18 : Musée d'Art Islamique Source: https://icom.org.qa/museums/museum-islamic-art</p> <p>Le Museum of Islamique Art, situé à Doha au Qatar, est un musée emblématique dédié à l'art islamique à travers les siècles. Conçu par l'architecte de renommée mondiale Ieoh Ming Pei, le bâtiment se dresse sur une île artificielle en bord de mer</p>
<p>Situation</p>	<p>Le Museum of Islamique Art est situé à Doha, au Qatar, à l'extrémité sud de la baie de Doha, le long de la Corniche</p> <div data-bbox="440 1509 952 1771" data-label="Image"> </div> <p>Figure 20 : Situation de musée Source : google earth</p> <div data-bbox="976 1509 1382 1765" data-label="Image"> </div> <p>Figure 19 : Situation de musée Source : : Openstreetmap.org</p>

Enjeux et contraintes	<p>Enjeux :</p> <ul style="list-style-type: none">• Protection des œuvres sensibles (filtres UV, absence de lumière naturelle).• Flexibilité pour expositions permanentes et temporaires.• Mise en scène lumineuse sur mesure pour chaque salle. <p>Contraintes :</p> <p>Zéro lumière naturelle : Tout l'éclairage est artificiel pour éviter la dégradation.</p> <ul style="list-style-type: none">• Murs épais sans fenêtres.• Toit opaque (symbolisé par un trait plein).• Zéro fenêtre Éclairage 100% artificiel  <p>Figure 21 : Façade du musée d'art islamique Source : https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/FR/AWB_Kunst_und_Kultur.pdf</p> <p>Architecture : Bâtiment sur île artificielle avec des espaces hauts sous plafond (nécessité d'un éclairage puissant mais discret).</p>  <p>Figure 22 : Façade de musée d'art islamique Source : https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/FR/AWB_Kunst_und_Kultur.pdf</p>
------------------------------	---


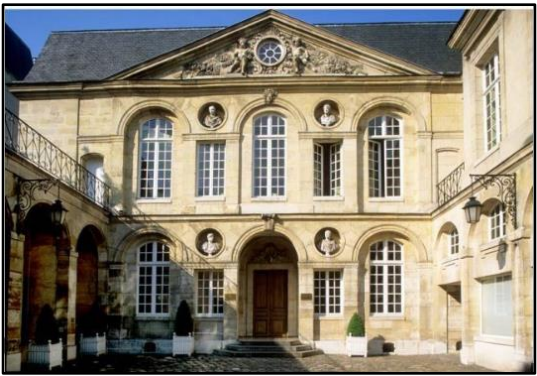
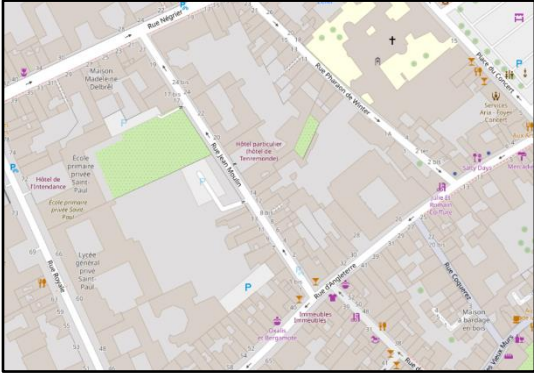
<p>Analyse technique de la solution d'éclairage</p>	<p>Produits utilisés :</p> <p>STARFLEX : Projecteurs à contrôle automatique, avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pivotement (45°) pour ajustement précis. • Filtres UV intégrés pour protéger les œuvres  <p>Figure 23 : Lampe STARFLEX dans le musée d'art islamique Source : https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/FR/AWB_Kunst_und_Kultur.p</p> <p>Système de contrôle :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 200 luminaires automatisés avec actuateurs intégrés. • Gestion centralisée via un système intelligent (scènes préprogrammées par salle) <p>Spécificités par espace :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Expositions permanentes : Éclairage homogène et stable. • Expositions temporaires (850 STARFLEX) : Flexibilité accrue avec optiques interchangeables
<p>Critères d'évaluation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité de lumière : Rendue des couleurs, absence d'éblouissement. • Protection des œuvres : Mesure des UV/IR résiduels. • Flexibilité : Temps de reconfiguration des scènes lumineuses. • Énergie : Consommation des LED vs solutions traditionnelles.

Tableau 3 : analyse de l'éclairage artificiel de musée d'art islamique
Source : auteur 2025

II.5.2 Exemple 02 : hôtel particulier du 18^{ém} siècle (France)

Projet	Rénovation thermique d'un ancien hôtel particulier du XVIII ^{ème} siècle (France)
Présentation	<p>L'hôtel particulier est un bâtiment du 18^{ém} siècle, il a été réhabilité en musée, accueillant aujourd'hui des expositions culturelles et patrimoniales. Il se distingue par la qualité de ses espaces intérieurs et son authenticité architecturale. Classée au patrimoine mondial de l'UNESCO, et s'insère dans un tissu urbain dense composé de bâtiments anciens datant pour la plupart du 18^{ém} siècle</p>  <p>Figure 24 : L'hôtel particulier</p> <p>Source : https://www.batiactu.com/edito/hotels-particuliers-parisiens-exposent-leur-architecture-30207.php</p>
Situation	<p>L'hôtel particulier est situé en France, dans la ville de Nancy, au n°12, rue des Archives, dans le quartier historique de la Ville Vieille. Il se trouve à proximité de la célèbre Place Stanislas</p>  <p>Figure 25 : Situation de l'hôtel particulier</p> <p>Source : https://www.openstreetmap.org/search</p>

Analyse technique de la solution d'éclairage

Restauration des menuiseries : les fenêtres d'époque sont conservées, étanchéifiées et équipées de survitrages discrets pour limiter les déperditions.



Figure 26 : Fenêtre restaurer

Source <https://www.helleux.fr/nos-references/bois/43-renovation-dun-hotel-particulier-a-paris.html>

Isolation des combles : les toitures sont isolées par le plancher avec des matériaux biosourcés, sans modifier la charpente visible.

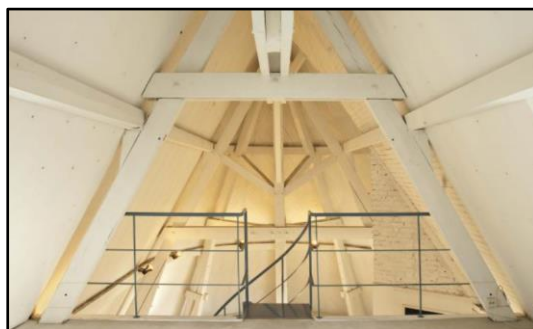


Figure 27 : Toiture isolée

Source : <https://www.toutsurlisolation.com/renovation-hotel-ancien-economies-energie>

Système de chauffage performant : installation d'une chaudière à condensation avec régulation intelligente pour optimiser la consommation.

Énergies renouvelables : des panneaux photovoltaïques sont intégrés discrètement sur des toitures invisibles, pour une production d'électricité partielle en autoconsommation.

Critères d'évaluation	<ul style="list-style-type: none">• Performance énergétique : baisse réelle de la consommation d'énergie et amélioration du classement DPE.• Confort thermique : meilleure régulation des températures, réduction des déperditions et sensation de confort accrue.• Respect du patrimoine : conservation des éléments d'origine, interventions discrètes et réversibles.• Qualité des matériaux : emploi de matériaux compatibles avec le bâti ancien (biosourcés, respirants).• Impact environnemental : réduction des émissions de CO₂ et recours à des énergies renouvelables.• Rentabilité : équilibre entre coût des travaux et économies réalisées sur le long terme.• Durabilité : fiabilité, résistance dans le temps et facilité d'entretien des systèmes mis en place
------------------------------	---

Tableau 4 : l'analyse d'amélioration thermique hôtel particulier du 18^{ém} siècle (France)
Source : auteur 2025

Conclusion

Les bâtiments patrimoniaux font partie de notre histoire et de notre culture. Cependant, ils ne répondent pas toujours aux exigences actuelles en matière de confort et de consommation d'énergie. Ce chapitre aborde trois aspects importants liés à cette problématique : le confort thermique dans les bâtiments patrimoniaux, l'éclairage naturel et artificiel adapté aux bâtiments patrimoniaux, ainsi que l'intégration des énergies renouvelables dans ces édifices. Ces éléments sont essentiels pour rendre ces bâtiments plus confortables et plus durables, tout en respectant leur identité.

Le chapitre se termine par l'analyse de deux exemples, qui montrent comment il est possible d'améliorer la performance énergétique tout en respectant le caractère patrimonial des bâtiments

Chapitre 03 : cas d'étude

« Musée Bordj Moussa »

Introduction

Après une recherche théorique développée dans le deuxième chapitre sur les musées, la mise en réserve des collections muséales ainsi que sur les conditions d'amélioration de la performance énergétique des musées, afin de mieux comprendre les exigences fonctionnelles, architecturales et énergétiques nécessaires, tout en identifiant des solutions évidentes pour améliorer le confort thermique, la qualité de l'éclairage et la consommation d'énergie, ce troisième chapitre est consacré à une étude empirique approfondie du musée Bordj Moussa qu'est un bâtiment patrimonial majeur de la ville de Béjaïa.

Dans un premier temps, une présentation historique et architecturale du monument est présentée afin de mieux comprendre son évolution, ses caractéristiques constructives, et ses matériaux d'origine. Cette base documentaire permet de situer le bâtiment dans son contexte et de mieux orienter les interventions futures. Ensuite, une étude quantitative repose sur un bilan énergétique comprend l'analyse thermiques, hygrométriques du musée, diagnostic visuel de l'éclairage artificiel et naturel, prise de mesures et une simulation de l'éclairage artificiel à la fois dans son état existant et après amélioration. Cette simulation vise à évaluer la qualité de la lumière au sein des espaces d'exposition, en lien avec les normes muséales et les besoins de mise en valeur des œuvres.

Enfin, sur la base de ces analyses, une série d'interventions a été proposée, portant sur trois axes principaux : L'amélioration du confort thermique L'optimisation de l'éclairage, Et l'intégration des énergies renouvelables. Ces actions visent à améliorer la performance énergétique du musée tout en respectant son identité patrimoniale, et en assurant à la fois le confort des visiteurs et la préservation optimale des collections exposées

III.1 Le cas d'étude « musée bordj moussa » :

III.1.1 Justification de Choix de cas d'étude :

- **Valeur patrimoniale et symbolique**
 - Le musée Bordj Moussa est un monument emblématique de la ville de Béjaïa.
 - Il possède une **forte valeur historique et culturelle**, représentant un héritage important de l'époque ottomane.
 - Sa préservation est essentielle pour maintenir l'identité patrimoniale de la région.

- **Caractéristiques architecturales spécifiques**

- Le bâtiment présente une architecture défensive traditionnelle, avec des matériaux anciens (pierre, chaux, bois, etc.).
- Il offre un **cadre idéal pour étudier les problématiques d'isolation, d'éclairage naturel et de confort thermique**, dans un contexte patrimonial contraignant.
- Ces caractéristiques nécessitent des interventions adaptées, respectueuses de l'intégrité architecturale.

- **Enjeux de préservation et de durabilité**

- Le musée souffre de **problèmes de performance énergétique** (pertes de chaleur, mauvaise régulation climatique...).
- L'amélioration de ses performances est indispensable pour garantir sa **pérennité**, tout en réduisant les coûts de fonctionnement.

- **Un cas d'étude pertinent dans une démarche globale**

- Il permet d'explorer des **solutions techniques innovantes** (éclairage LED, ventilation naturelle, gestion passive de la lumière, etc.) compatibles avec les exigences patrimoniales.

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

La situation de la ville de Bejaïa

La ville de Béjaïa, anciennement appelée Bougie ou Bugia, est une cité côtière située sur la rive sud du bassin méditerranéen., elle est considérée comme la plus grande ville majoritairement kabyle. La province de Béjaïa s'étend sur une superficie de 3 261 km², dans la région de la Kabylie, au nord-est de l'Algérie. Elle est administrativement organisée en 52 communes et 19 daïras.

La wilaya est délimitée au nord par la mer Méditerranée, au sud par les wilayas de Bouira et de Bordj Bou-Arredidj, à l'ouest par Tizi-Ouzou, et à l'est par Sétif et Jijel

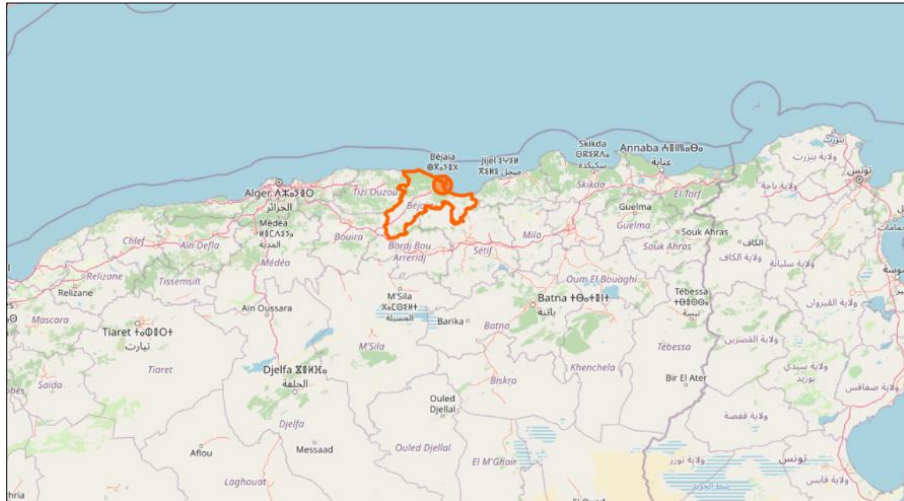


Figure 28: Situation de Bejaia

Source : <https://www.openstreetmap.org/#map=7/36.213/5.208>

- **Contexte historique de la ville de Bejaia :**

L'histoire de Béjaïa remonte à la préhistoire, avec des traces datant de 200 000 à 10 000 ans. Durant l'Antiquité, elle fut un centre commercial carthaginois, puis une importante ville romaine nommée Saldae. En 1067, le sultan hammadite En-Nacer y fonda une nouvelle capitale appelée En-Naceria, construisant de grands palais. Béjaïa devint alors un centre culturel majeur en Afrique du Nord. Elle subit ensuite des conflits, notamment l'attaque du roi de Tlemcen en 1336. En 1510, les Espagnols occupèrent la ville et bâtirent Bordj Moussa. Elle passa sous domination ottomane en 1555 avec Salah Pacha, puis sous contrôle français en 1833, jusqu'à l'indépendance de l'Algérie en 1962.

III.1.2 Présentation de bordj moussa :

Musée Bordj Moussa est un fort espagnol bâti au 16ème . Ce monument a connu plusieurs restaurations et transformations au fil du temps. Durant la période ottomane, il servait de forteresse militaire, puis fut converti en prison à l'époque coloniale. Depuis 1989, il abrite un musée qui expose des pièces rares, couvrant une période allant de la préhistoire à l'époque contemporaine.



Figure 29 : Musée Bordj Moussa
Source : photo prise par l'auteur

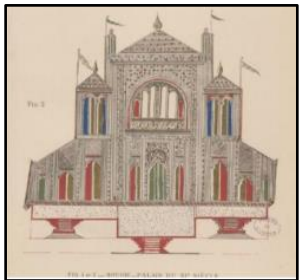

III.1.3 La situation du musée bordj moussa

Bordj moussa se situe au sommet de l'ancienne ville, à la commune de Bejaia Il occupe un emplacement stratégique, à proximité des anciens quartiers de Bab Elouz et de Karamane.



Figure 30 : Situation de Bordj Moussa
Source : <https://www.openstreetmap.org/way/338116028#map=16/36.75411/5.08512>

III.1.4 Étude historique de Bordj Moussa :

Époque	Contexte	Fonction	Transformations architecturales	Illustrations
Époque Hammadide (XIe – XIIe siècle)	Royaume des Hammadides, grande puissance berbère	Palais princier : "Ksar El Kawkeb" (Palais de l'étoile), résidence du sultan El-Nasir et son fils El-Mansour.	Construction du Kasr El Kawkeb (Palais de l'étoile) par El-Nasir et El-Mansour. Palais élevé, orné de pierre de « randj » et plante « ar-roudjaq ».	 <p>Figure 31 : Façade du palais de l'étoile dessin</p>
Époque Espagnole (1510 – 1555)	Occupation militaire espagnole. Bejaia passe d'une ville savante à une place forte stratégique	Fort militaire impérial utilisé par les Espagnols pour surveiller la côte et se défendre contre les Ottomans	Destruction du palais hammadite. Construction du fort Bordj Moussa par Ferdinand de Navarre Charles Vquint selon les plans de Pedro Librano.	 <p>Figure 32 : Plan de masse du fort impérial espagnol, Dessiné par Pedro Librano</p>
Époque Ottomane (1555 – 1830)	Prise de Bejaia par Salah Raïs en 1555. Intégration dans l'Empire ottoman	Le fort est réutilisé comme poste de défense ottoman. Il est renommé Bordj Moussa.	Peu de modifications structurelles connues. Le fort conserve ses volumes espagnols, mais reçoit une nouvelle fonction.	



<p>L'époque française (1833 – 1962)</p>	<p>Prise de Bejaia par les troupes françaises. Implantation coloniale</p>	<p>Caserne militaire française, renommée Fort Barral. Le général Barral y est enterré temporairement.</p>	<p>Aménagements militaires intérieurs, ajout de bâtiments annexes, transformation en ²²²caserne</p>	 <p>Figure 33 : : Fort Barral pendant la colonisation française</p>
<p>Postindépendance (1962 – aujourd'hui)</p>	<p>Indépendance de l'Algérie (1962). Le fort est occupé par l'ALN.</p>	<p>Musée historique (depuis 1989). Abandonné, puis restauré partiellement.</p>	<p>Restauration entre 1987–1989. Travaux suspendus en 2013 Travaux relancés en 2019.</p>	 <p>Figure 34 : le musée Bordj Moussa</p>

Tableau 05 : Analyse historique de Bordj Moussa

Source : auteur 2025

III.1.5 Étude architecturale de Bordj Moussa :

- L'accessibilité :

L'accès au site de Bordj Moussa se fait par une ouverture dans le mur d'enceinte du fort, sur son côté nord-est, via la rue Touati Mourad, qui donne sur un espace vert entourant le fort.

L'entrée principale à l'intérieur de Bordj Moussa se trouve sur le côté droit du mur sud. Deux entrées secondaires situées dans les deux ailes est et ouest, permettent également d'accéder à l'intérieur du fort.

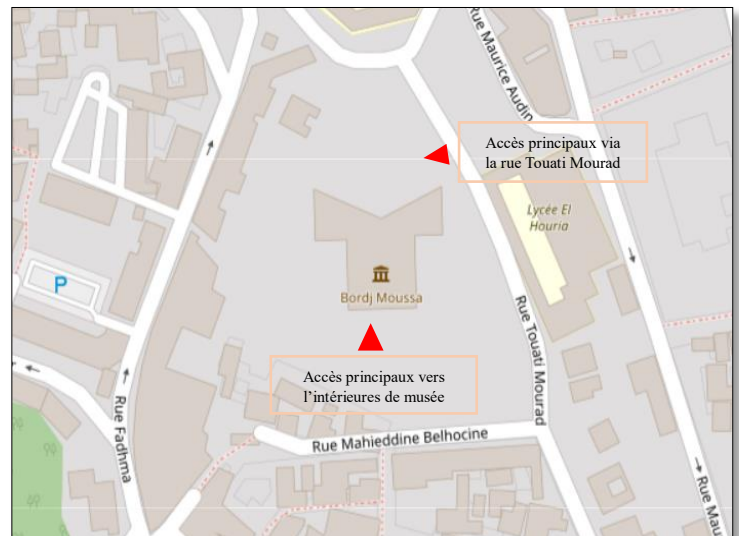


Figure 35 : Accessibilité de musée
Source : <https://www.openstreetmap.org>

- **La volumétrie :**

Le fort présente un volume très imposant, ce qui correspond à sa fonction d'origine. On peut le diviser en trois parties principales :

- Un grand parallélépipède du côté sud, qui constitue le corps principal du fort.
- Deux volumes en forme de trapèze du côté nord, avec des murs inclinés. Ces parties ont été conçues pour des raisons de défense : elles permettaient de mieux résister aux tirs d'artillerie moderne, comme les canons et les bombardes. Les pans inclinés empêchaient les frappes directes et faisaient dévier la trajectoire des boulets à l'impact.

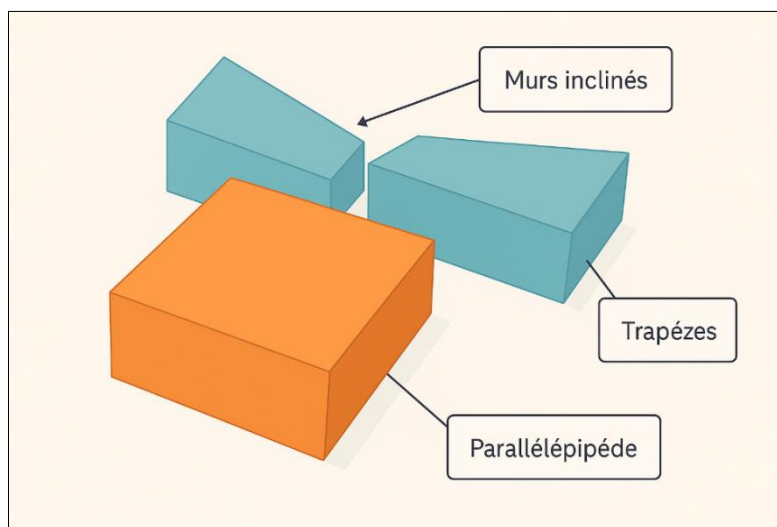


Figure 36 : Schéma de la volumétrie

Source : l'auteure 2025

- **Organisation spatiale :**

Intérieur du fort se compose de trois niveaux : un sous-sol, un rez-de-chaussée et un étage. Chaque espace accueille des fonctions distinctes, ayant subi plusieurs transformations au fil des différentes périodes.

Sous-sol :

On accède à ce niveau par un escalier, au niveau du rez-de-chaussée à l'ouest où il y'a tunnel, qui s'étend sous les parois extérieures, contourne l'ensemble du fort.

Le rez de chaussée :

L'intérieur du rez-de-chaussée se compose de trois nefs longitudinales, la nef centrale, plus haute que les deux latérales. À l'extrémité de la nef se trouvent une chapelle ainsi qu'un escalier menant au premier étage. Un autre escalier, situé sur le côté ouest, permet d'accéder au sous-sol. Cet espace est actuellement dédié à l'exposition des différentes collections du musée.





L'étage :

L'accès à ce niveau se fait par un escalier situé au rez-de-chaussée, menant à une terrasse desservant cinq espaces : le bureau de la direction, le secrétariat, un bureau administratif, une salle de réserve pour le musée et une bibliothèque.

III.1.6 Étude constructive :

- **Technique de construction**

▪ Les techniques de construction	• Illustration
---	-----------------------

<p>Le soubassement, est constitué d'un double appareillage en grosses pierres quadrangulaires entrecroisées.</p>	 <p>Figure 37 : Double appareillage en grosses pierres Source : auteur 2025</p>
<p>L'angle sud-est est construit à partir d'un assemblage de pierres quadrangulaires, correspondant probablement à un mur reconstruit par les Français</p>	 <p>Figure 38 : Assemblage de pierres quadrangulaires Source : auteur 2025</p>
<p>L'ensemble du bâtiment est réalisé en double appareillage de briques liées au mortier de chaux, à l'exception des deux éléments mentionnés précédemment</p>	 <p>Figure 39 : Double appareillage de brique Source auteur 2025</p>
<p>Le revêtement de la terrasse est réalisé en briques cuites posées selon un motif en épis</p>	 <p>Figure 40 : Revêtement de la terrasse Source : auteur 2025</p>


<p>Voûtes en berceau ou voûtes d'arêtes reposant sur de gros piliers adossés aux murs extérieurs, notamment au rez-de-chaussée, pour couvrir les nefs</p>	 <p>Figure 41 : Voutes en berceau Source : auteur 2025</p>
---	--

Tableau 06 : Technique de construction de bordj moussa
Source : auteur 2025

III.1.7 Les matériaux de construction

Les matériaux les plus couramment utilisés pour la construction du fort sont des matériaux simples et facilement accessibles à l'époque, tels que la pierre et la brique pleine, principalement récupérés sur les anciens sites romains et hammadites, nombreux dans la ville. Des matériaux plus récents, comme le métal, ont été introduits ultérieurement au cours des interventions modernes

- **Brique pleine rouge**

Ce matériau est utilisé pour construire les murs et couvrir les terrasses. Il se distingue par sa disponibilité locale.



Figure 42 : La brique pleine
Source : auteure 2025

- **La Pierre :**

Ce matériau est utilisé pour le soubassement des murs afin de renforcer la structure. Il provient de la récupération de vestiges romains et hammadites



Figure 43 : La pierre
Source : auteur 2025

- **Liant traditionnel**

Ce matériau est utilisé pour lier les éléments maçonnés comme les murs et les voûtes. Il est composé d'un mélange de chaux, de terre, ainsi que de fragments de briques et de tuiles

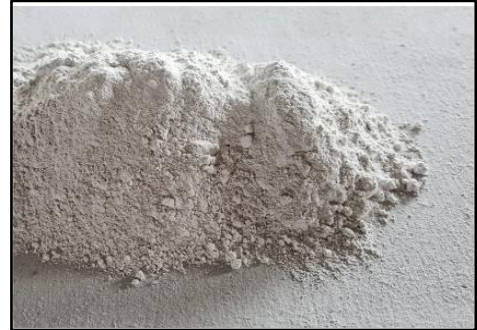


Figure 44 : Liant traditionnel
Source : auteur 2025

- **Le Fer**

Ce matériau était utilisé pour les barreaux des ouvertures et pour la structure du niveau intermédiaire, ajoutée durant la période coloniale.

- **Pierre bleue**

Ce matériau est utilisé pour le revêtement du sol au rez-de-chaussée. Il est apprécié pour sa résistance, sa durabilité et son aspect esthétique

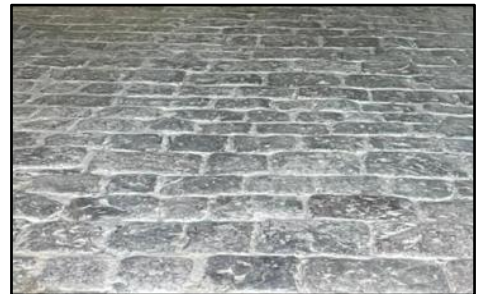


Figure 45 : La pierre bleue
Source : auteur 2025

- **Granito**

Ce matériau est utilisé pour le revêtement du sol de la nef centrale au rez-de-chaussée. Il se compose d'un mélange de fragments de pierre, ce qui lui confère solidité et aspect traditionnel.



Figure 46 : Granito

Source : auteur 2025

III.2 Étude quantitative :

Cette démarche constitue un bilan énergétique, un diagnostic visuel de l'éclairage naturel et artificiel, des mesures sur site ainsi qu'une simulation numérique de l'éclairage artificiel. Elle vise à analyser les performances globales du bâtiment en tenant compte de trois volets essentiels le comportement thermique, les conditions hygrométriques et la qualité de l'éclairage, qu'il soit naturel ou artificiel. L'objectif est de déterminer dans quelle mesure ces paramètres répondent aux exigences de confort pour les usagers, mais aussi aux normes de conservation des collections muséales. Cette étude permet de relever les dysfonctionnements existants, d'identifier les points faibles du bâtiment, et de proposer des interventions adaptées pour améliorer l'efficacité énergétique et la qualité environnementale intérieure du musée, tout en respectant son caractère patrimonial.

III.2.1 Bilan énergétique :

Le bilan de température et d'hygrométrie a été effectué à l'aide d'une appareil (thermo-hygromètre) placé dans la nef centrale ainsi que dans plusieurs salles adjacentes. Les mesures ont été réalisées au cours d'une seule journée, le 7 mai 2025, à différentes heures de la journée (le matin et l'après-midi), afin d'observer les éventuelles variations naturelles en fonction de l'ensoleillement et de l'occupation des espaces.

- **Présentation de l'appareil utilisé :**

Un thermo-hygromètre est un appareil électronique qui mesure simultanément la température et l'humidité relative, à l'aide de sondes adaptées, parfois à distance



Figure 47 : Photo de thermo-hygromètre

Source : <https://www.usinenouvelle.com/expo/hygrometre-o5041.html>

• **Résultats des mesures :**

Paramètre	Valeur moyenne observée	Interprétation
▪ Température intérieure	▪ Entre 16 à 18	▪ Bonne inertie thermique. ▪ Confort thermique constant.
▪ Hygrométrie relative	▪ Environ 60 %	▪ Légèrement élevée mais stable et favorable à la conservation

Tableau 07 : Résultats de bilan à l'intérieurs au musée Bordj Moussa (le 7 mai 2025)

Source : auteur 2025

• **Interprétation des résultats :**

Température intérieure (entre 16 °C et 18 °C) :

- Indique une bonne inertie thermique du bâtiment, notamment grâce à l'épaisseur des murs et à la structure traditionnelle.
- La température reste relativement stable, ce qui limite les chocs thermiques pouvant endommager les objets exposés.
- Ce niveau de température assure un confort thermique satisfaisant pour les visiteurs, même sans systèmes de chauffage ou de refroidissement actifs.
- Favorise la préservation des œuvres, en particulier celles sensibles aux variations de température (tissus, bois, peintures, etc.).

Hygrométrie relative (environ 60 %) :

- Un taux légèrement élevé par rapport aux normes muséales idéales (souvent entre 45 % et 55 %), mais reste constant, ce qui est un facteur positif.

- La stabilité hygrométrique est primordiale pour la conservation, car les variations rapides sont plus dommageables que des niveaux modérément élevés.
- Ce taux est acceptable pour la plupart des matériaux sensibles (papier, textile, bois), tant qu'il n'y a pas de pics d'humidité.
- Une humidité bien maîtrisée limite les risques de déformation, moisissure ou fissuration des objets exposés.
- **Synthèse :**

À partir des résultats du bilan énergétique, la température (entre 16 °C et 18 °C) révèle une bonne inertie thermique du bâtiment, Assurant un confort stable pour les visiteurs et favorable à la conservation des collections sensibles. L'hygrométrie, autour de 60 %, bien que légèrement élevée, reste constante, ce qui est essentiel pour éviter les dégradations liées aux variations d'humidité. Ces conditions globalement stables soutiennent une bonne préservation des œuvres exposées.

III.2.2 Diagnostic visuel de l'éclairage artificiel et naturel de Bordj Moussa

Nous avons effectué un diagnostic visuel de l'éclairage du musée Bordj Moussa à travers une visite sur site. Cette analyse a porté sur l'éclairage naturel et artificiel, en observant la qualité de la lumière dans les différents espaces d'exposition. L'objectif était d'évaluer si l'éclairement en place répond aux exigences de conservation des collections, au confort visuel des visiteurs, ainsi qu'aux bonnes pratiques muséographiques. Ce diagnostic a permis de relever plusieurs points à améliorer pour optimiser la performance lumineuse du musée

- **Résultat de diagnostic**

Critère	Observation	Analyse	Illustration
---------	-------------	---------	--------------



<p>Éclairage artificiel</p>	<p>Le système d'éclairage artificiel actuel de Bordj Moussa repose principalement sur des lampes simples, souvent de faible intensité, réparties de manière irrégulière dans les différentes salles.</p>	<p>Ce type d'éclairage, est insuffisant pour mettre en valeur les volumes architecturaux et les objets exposés. Il utilise des lampes de faible qualité, souvent énergivores, offrant une lumière peu homogène et un rendu visuel médiocre. Cela nuit non seulement à l'expérience des visiteurs, mais engendre également une consommation électrique peu efficace et des coûts d'entretien élevés à long terme.</p>	 <p>Figure 48 : Ensemble d'images sur l'éclairage artificiel dans le musée Source : auteur 2025</p>
<p>Éclairage naturel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Présence d'ouvertures latérales : Le musée bénéficie de fenêtres étroites, souvent issues de l'ancienne structure militaire. • Éclairage zénithal Dans certaines 	<p>L'éclairage naturel participe à une ambiance douce et authentique, mais il est insuffisant pour un usage muséal optimal, surtout pour la lecture ou la mise en valeur d'objets. Il nécessite donc un complément artificiel bien pensé</p>	 <p>Figure 49 : Ensemble d'images sur les ouvertures du musée Source : auteur 2025</p>

Tableau 08 : diagnostic visuel de l'éclairage naturel et artificiel
Source : auteur 2025

• **Synthèse :**

À partir du diagnostic réalisé, on a conclu que l'éclairage actuel du musée Bordj Moussa, qu'il soit naturel ou artificiel, reste insuffisant pour répondre aux exigences muséales. L'éclairage artificiel est peu performant, avec des lampes de faible qualité, énergivores et mal réparties, nuisant à la mise en valeur des espaces et des objets. Quant à l'éclairage naturel, il ne suffit pas à assurer une bonne lisibilité ni une valorisation adéquate des collections.

III.2.3 Les mesures de l'éclairage artificiel

Dans le but de mieux évaluer la qualité de l'éclairage artificiel au sein du musée Bordj Moussa, une campagne de mesures d'éclairement a été réalisée in situ à l'aide d'un instrument spécifique, en suivant un protocole précis qui sera détaillé par la suite.

- **Présentation de l'instrument utilisé**

Le luxmètre numérique sert à mesurer l'intensité lumineuse des lampes à incandescence traditionnelles ainsi que des éclairages LED. Les résultats sont affichés clairement sur un grand écran à cristaux liquides. Le capteur de lumière est détaché de l'appareil de mesure, ce qui permet de l'orienter précisément vers la source lumineuse.



Figure 50 : Le luxmètre

Source : <https://www.a4.fr/luxmetre-digital-voltcraft-ms-1300.html>

- **Présentation de protocole de prise de mesure :**

Nous avons réalisé des mesures d'éclairage artificiel in situ dans une seule journée (le 07 mai 2025) à 10h00 de matin les mesures ont été effectuée à l'intérieure de la salle d'exposition considérée comme la pièce centrale du musée. Cet espace accueille les objets les plus importants, ce qui rend la qualité de l'éclairage essentielle dans cette pièce.

Afin de ne pas fausser les résultats d'éclairage artificiel, nous avons allumé toutes les lampes de la salle pendant la prise de mesure.

- **La grille de prise de mesure :**

Une série de mesures d'éclairage artificiel a été réalisée à l'intérieur de la salle d'exposition, en suivant une grille de mesure établie en fonction des dimensions et des caractéristiques géométriques de la salle

Le choix des points de mesure sont engendrés d'une grille de :

- 2.5 m entre un point et un autre dans le sens horizontal
- .5 m entre chaque point dans le sens vertical

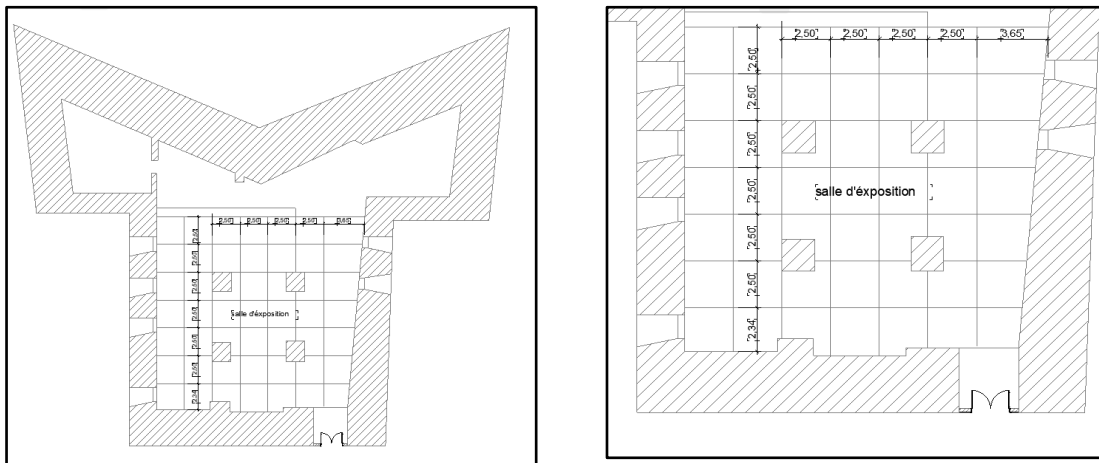


Figure 51 :Grille de mesure de la salle d'exposition de musée Bordj Moussa
Source : auteur 2025

- **Présentation et interprétation des résultats de la prise de mesure :**

Les résultats des mesures d'éclairage artificiel, obtenus à l'aide du luxmètre Chiffre Pad, ont été convertis sous forme de carte colorée pour faciliter leur interprétation. Chaque couleur sur cette carte correspond à une plage spécifique de valeurs d'éclairage exprimées en lux

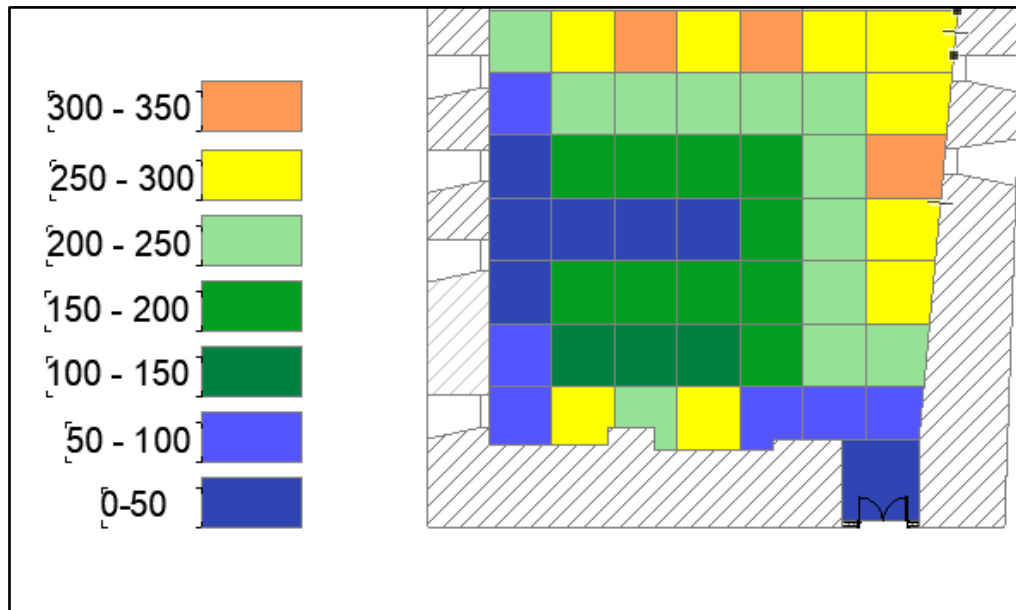


Figure 52 : Résultats de prise de mesure de la salle d'exposition
Source : auteur 2025

- **Interprétation des résultats prise de mesure :**

E_{max} : 350lux

E_{min} : 16 lux

A partir de la figure on remarque que :

Les niveaux d'éclairage les plus élevés se trouvent dans la partie supérieure de la salle, notamment sous les luminaires. Ces zones atteignent des valeurs comprises entre 250 et 350 lux

Le centre de la salle, identifié par des teintes bleu foncé, présente un niveau d'éclairage très faible, inférieur à 50 lux. Cette zone sombre peut s'expliquer principalement par l'absence ou l'insuffisance de sources lumineuses dans cette partie de la pièce et peut poser plusieurs problèmes :

- Elle réduit la visibilité des objets exposés au centre de la pièce.
- Elle diminue la qualité globale de l'expérience muséale, notamment dans un espace censé être central et attractif.

Le reste de la salle, présente un éclairage modéré à faible, avec des valeurs allant de 50 à 250 lux.

- **Synthèse**

Les résultats de prise des mesures in situ nous a permis d'identifier les différents problèmes liés à l'éclairage artificiel dans notre cas d'étude. Les résultats de prise de mesures in situ pour la journée 07 mai 2025 montrent une répartition inégale de la lumière artificielle dans la salle d'exposition, les valeurs d'éclairement sont plus élevées à proximité des lampes. Tandis que ces valeurs diminuent d'une manière graduelle à chaque fois nous rapprochant du centre de la salle. À cause de l'absence des luminaires dans cette partie de la salle.

Cette distribution démontre que la salle n'est pas bien éclairée dans son ensemble, ce qui peut nuire à la mise en valeur des objets exposés et au confort visuel des visiteurs.

III.2.4 Simulation numérique :

La méthode adoptée pour cette partie de la recherche est de nature expérimentale, s'appuyant sur un outil informatique de simulation permettant de reproduire un phénomène physique dans un environnement virtuel. Ce type de méthode connaît un essor croissant dans le domaine de l'architecture, car il offre la possibilité d'analyser divers aspects tels que la lumière artificielle d'une manière rapide et économique.

Il existe plusieurs logiciels de simulation disponibles sur le marché numérique, certains étant payants on a opté pour le logiciel gratuit de simulation « DIA Lux Evo » afin d'effectuer une évaluation quantitative de l'éclairement lumineux dans des conditions réelles.

- **Présentation de logiciel DIALux evo 06 :**

DIALux est un logiciel développé par l'entreprise DIAL GmbH, spécialisée dans les technologies du bâtiment et de l'éclairage. Il permet de simuler l'éclairage naturel (lumière du jour) et l'éclairage artificiel, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur d'un espace.

Grâce à DIALux, il est possible de calculer différents paramètres lumineux, comme les niveaux d'éclairement, les facteurs de lumière du jour, les luminances, ou encore de réaliser des analyses d'ombrage et des rendus visuels. Le logiciel propose une modélisation simple et guidée, mais il est aussi compatible avec des modèles plus complexes importés depuis d'autres logiciels de DAO (dessin assisté par ordinateur), ce qui le rend adapté à tous types de projets.

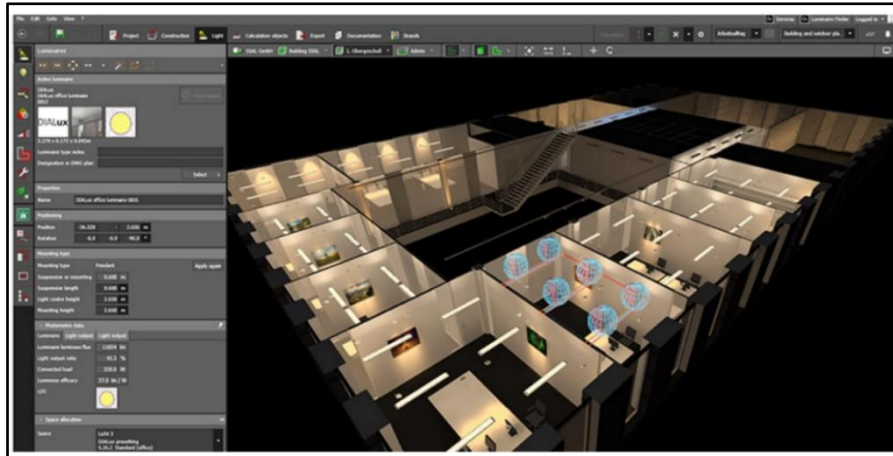


Figure 53 : Logiciel DIALUX evo 06
Source : <https://www.dialux.com/fr-FR/>

- **Le choix de DIALux**

Le choix de DIALux evo 9 comme outil de simulation de l'éclairage artificiel s'explique par ses nombreux avantages techniques et pratiques. Ce logiciel est largement utilisé dans le domaine de la conception lumière pour :

Accessibilité gratuite : DIALux est un logiciel entièrement gratuit, disponible en téléchargement libre sur Internet, ce qui le rend facilement accessible aux étudiants, architectes, ingénieurs et concepteurs lumière.

Fiabilité des résultats : DIALux fournit des résultats précis et conformes aux normes internationales d'éclairage.

Large base de données de luminaires : DIALux propose une vaste bibliothèque de luminaires issus des catalogues de nombreux fabricants internationaux. Cela permet de simuler l'éclairage avec des produits réels.

- La méthodologie de la simulation :
- Importer le projet

Importer le projet sous format DWG en appuyant sur « plan d'importation »

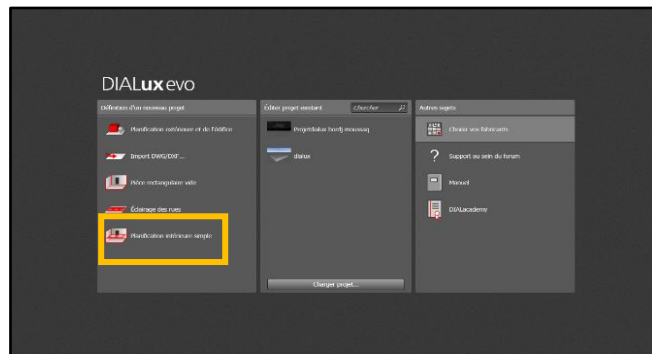


Figure 54 : Capture de l'étape de l'importation de projet
Source : DIALux evo 06

- ouvrir le fichier

On sélectionne le fichier DWG

tout en cliquant sur la case « ouvrir »

On dessine l'origine de l'axe de projet tout en déterminant l'unité de mesure « metre »

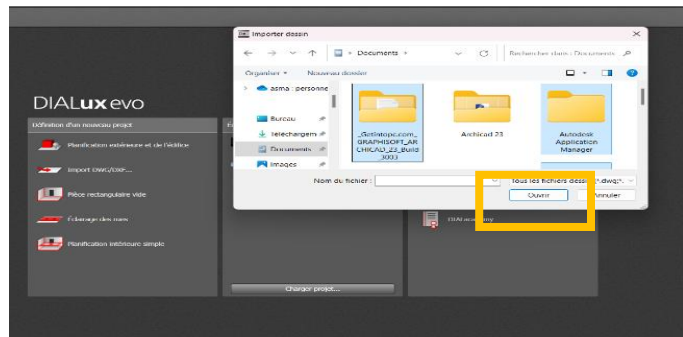


Figure 55 : Capture de l'étape de l'ouverture de fichier
Source : DIALux evo 06

- La détermination de la direction nord

- 1 - Appuyer sur le mode construction
- 2 - Passer au sous mode terrain
- 3 - Sélectionner l'outil vue du plan:
d'ensemble
- 4 - Sélectionner l'outil dessiner
pointeur nord
- 5- Positionner l'orientation Nord sur le
dessin

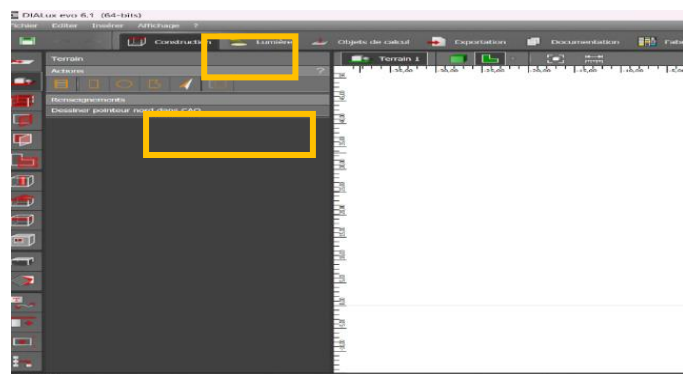


Figure 56 : Capture de la détermination de nord
Source : DIALux evo 06

• Modélisation de projet

- 1- Appuyer sur le mode construction
- 2- Sélectionner l'outil « dessiner un nouvel bâtiment »
- 3- Dessiner le contour extérieur du bâtiment
- 4- Sélectionner l'outil dessiner une nouvelle pièce
- 5- Dessiner les pièces intérieures du bâtiment

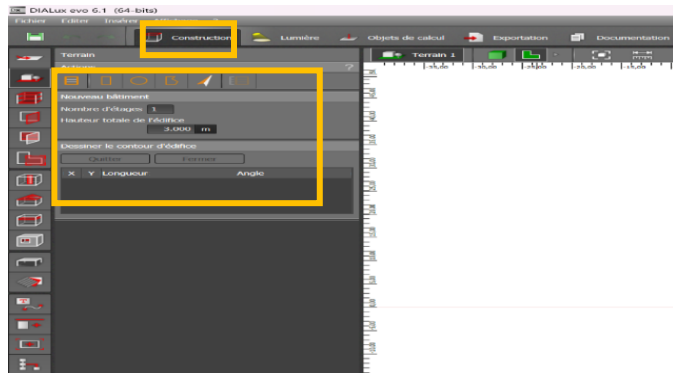


Figure 57 : Capture de l'étape modélisation de projet
Source : DIALux evo 06

• Le positionnement des ouvertures

- 1- Passer au sous mode « ouvertures d'édifice ».
- 2- Sélectionner le type d'ouverture.
- 3- Intégrer les dimensions de l'ouverture.
- 4- Sélectionner l'outil « dessiner ouverture d'édifice ».
- 5- Positionner les ouvertures.

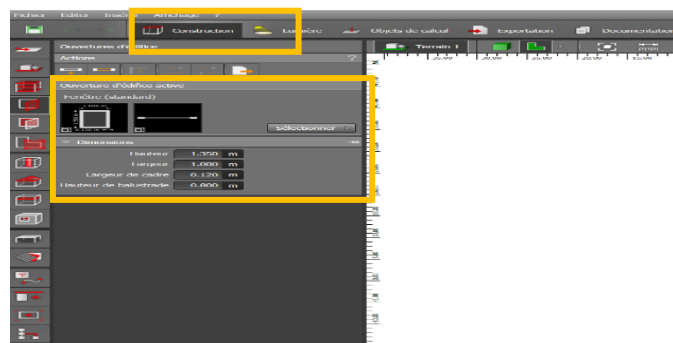


Figure 58 : Capture de l'étape positionnement de projet
Source : DIALux evo 06

• Modélisation de l'environnement immédiat

- 1- Passer en mode construction.
- 2- Passer au sous mode terrain.
- 3- Sélectionner l'outil dessiner un nouvel bâtiment pour dessiner les bâtiments autour

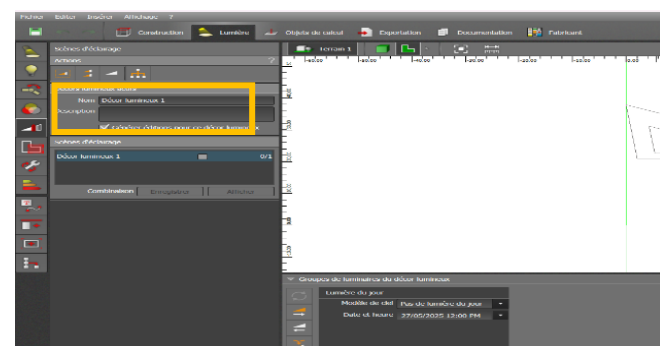


Figure 59 : capture de l'étape modélisation de l'environnement immédiat
Source : DIALux evo 06

- **Choisir le type de ciel , la journée et l'heure**

- 1- Passer en mode lumière.
- 2- Passer au sous mode scènes d'éclairage.
- 3- Sélectionner le type de ciel
- 4- Sélectionner la date et l'heure.
- 5- Importer et positionner les lemainaire

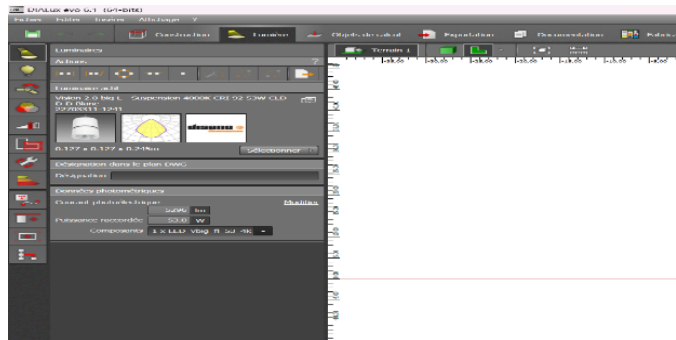


Figure 60 : Capture de l'étape le choix de type de ciel, l'heure et la journée
Source : DIALux evo 06

- **Importer et positionner les lemainaire**

- 1- Accéder à la bibliothèque de luminaires
- 2- Sélectionner le type de luminaire
- 3- Placer les luminaires dans l'espace 3D
- 4- Ajuster la hauteur d'installation des luminaires

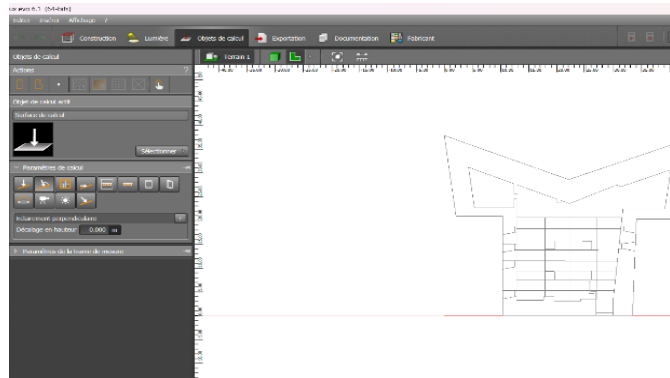


Figure 61 : Capture de l'étape importation et positionnement des luminaire
Source : DIALux evo 06

- **Les résultats de calcul**

- 1- Passer en mode « objet de calcul »
- 2- Cliquer sur l'angle « démarrer le calcul »
- 3- Passer au sous mode « plans utiles ».
- 4- Choisir la hauteur du plan utile

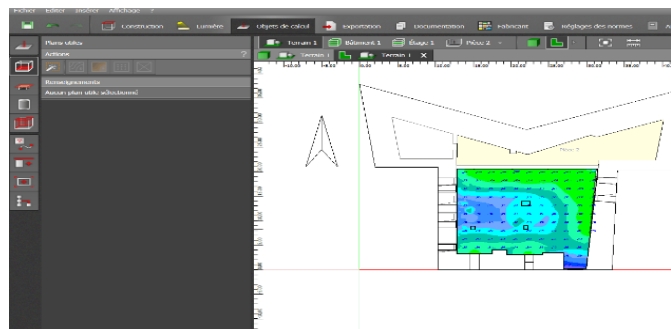


Figure 62 : Capture de l'étape résultats de calcul
Source : DIALux evo 06

- **Présentation et interprétation des résultats de la simulation :**

Présentation des résultats :

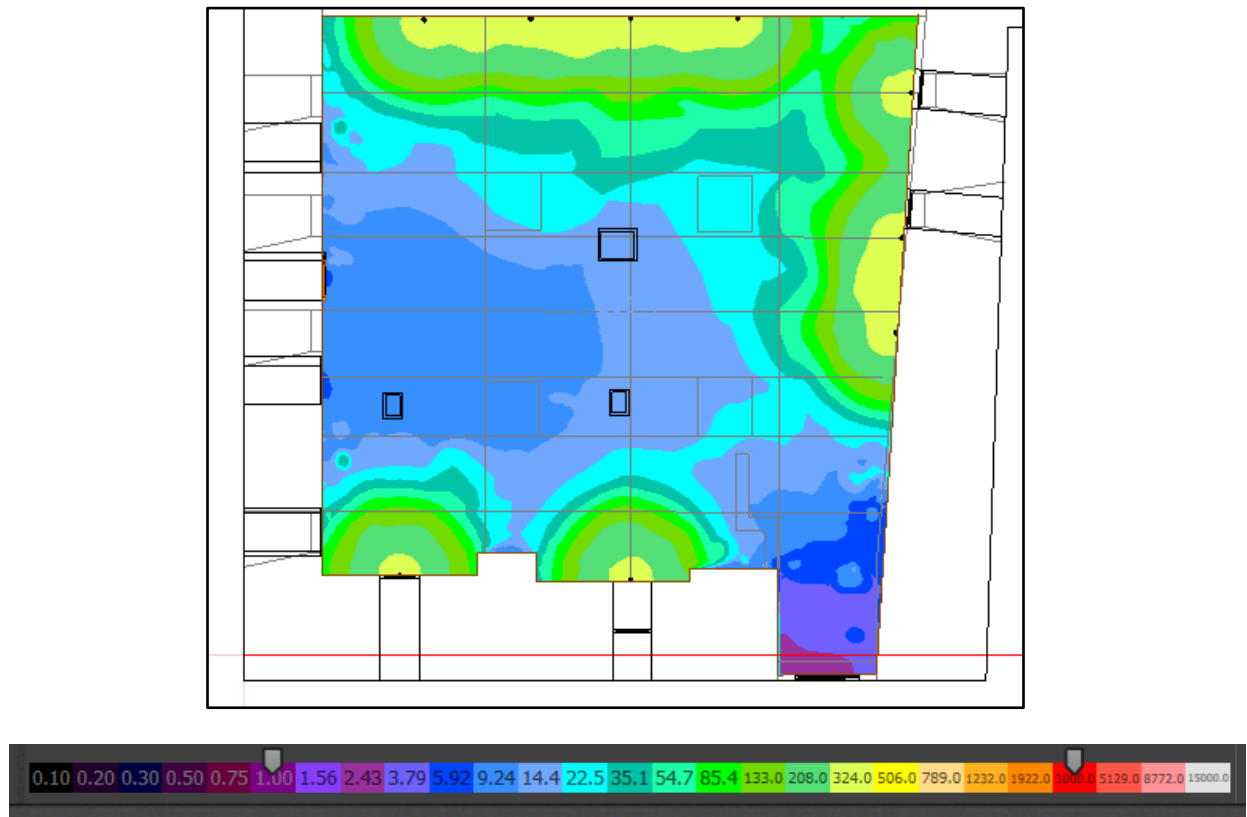


Figure 63 : Résultats de la simulation de l'éclairage artificiel

Source : auteur 2025

Interprétation des résultats

E_{max} : 380 lux

E_{min} : 12 lux

À partir de la figure, on observe

Les valeurs les plus élevées, comprises entre 200 et 380 lux, se trouvent principalement sous les luminaires, notamment dans la partie supérieure de la salle,

Le centre de la salle, présente un niveau d'éclairement très faible, estimé entre 0 et 40 lux. Cette zone sombre s'explique par l'absence ou l'insuffisance de sources lumineuses dans cette partie centrale.

Le reste de la salle affiche un éclairage intermédiaire à faible, avec des valeurs situées entre 40 et 200 lux.

- **Synthèse :**

Les résultats de la simulation montrent que l'éclairage dans la salle est mal réparti. Les zones proches des lampes, surtout sur les côtés en hauteur, présentent des niveaux élevés d'éclairement, dépassant les 300 lux. En revanche, en s'approchant du centre de la salle, la lumière diminue progressivement, jusqu'à atteindre des valeurs faibles, ce qui montre un manque d'éclairage dans cette zone.

Ce manque d'homogénéité lumineuse n'est pas sans conséquence : il change la perception des objets exposés, nuit à leur mise en valeur muséographique, et réduit considérablement le confort visuel des visiteurs

III.2.5 Validation du choix du logiciel dia lux evo :

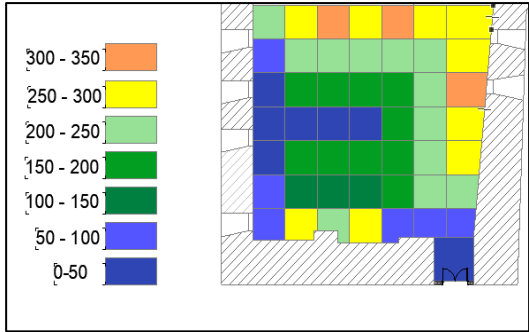
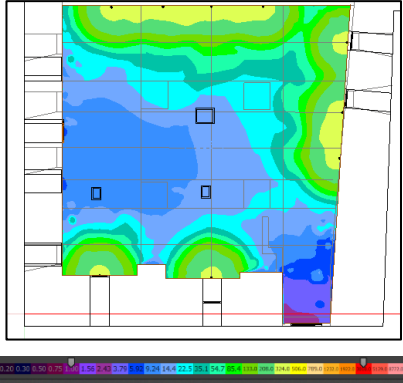
Résultat de la prise de mesure	Résultat de la simulation
	

Tableau 09 : comparaison des résultats obtenus

Source : auteur 2025

Nous avons réalisé une simulation le même jour et à la même heure que la prise de mesures, soit le 07 mai à 10h, afin de comparer les résultats. Pour cela, nous avons sélectionné les mêmes points de mesure dans les deux cas, puis appliqué une équation suivante :

Prise de mesure $x = 320$ lux 100%

La simulation $y = 400$ donc $400 - 320 = 80$ lux

$X' = 80 * 100 / 320 = 25\%$

À partir de ce pourcentage, nous pouvons conclure que les valeurs obtenues par la simulation et par la mesure réelle sont relativement proches, ce qui valide la fiabilité de l'utilisation du logiciel DIALux Evo pour ce type d'analyse.

- **Synthèse générale**

Les résultats des simulations et les prise de mesures sur l'éclairage artificiel prouvent une répartition inégale de l'éclairage dans la salle d'exposition. Les zones proches des lampes, notamment en hauteur sur les côtés, sont trop éclairées (plus de 300 lux), tandis que le centre de la salle manque de lumière en raison de l'absence de luminaires. Cette mauvaise homogénéité lumineuse nuit à la mise en valeur des objets exposés et réduit le confort visuel des visiteurs.

III.2.6 Intervention sur l'amélioration des performances énergétiques du musée bordj

Le musée Bordj Moussa, témoin du patrimoine architectural de Béjaïa, nécessite aujourd'hui des améliorations en matière de performance énergétique. Pour cela on a opté pour proposer une série d'intervention portant sur trois volets principaux : l'amélioration du confort thermique, l'optimisation de l'éclairage, et l'intégration des énergies renouvelables. Ces interventions visent à réduire la consommation énergétique du musée, à améliorer le confort des usagers tout en respectant les exigences liées à l'exposition et à la bonne conservation des collections.

- **Amélioration de confort thermique :**

À la suite de l'interprétation des résultats du bilan thermique du musée Bordj Moussa et de la visite sur site, On a observé une certaine stabilité des conditions intérieures, en particulier en ce qui concerne la température et l'humidité, ce qui est favorable à la conservation des collections. Toutefois, des déperditions thermiques ont été observées, Notamment au niveau des fenêtres. Où des fuites d'air sont présentes. Ces défauts d'étanchéité compromettent l'efficacité énergétique du bâtiment et peuvent, à long terme, perturber la stabilité des conditions climatiques internes. C'est pourquoi on propose :

Installer une seconde fenêtre côté intérieur, à quelques centimètres de la menuiserie existante, pour améliorer l'étanchéité tout en préservant la façade historique, permettant ainsi de protéger l'aspect patrimonial extérieur du bâtiment.

• Amélioration de l'éclairage artificiel :

Après les résultats du diagnostic et les résultats de la prise de mesure, ainsi que la simulation de l'éclairage artificiel au niveau du musée Bordj Moussa, on a conclu que l'éclairage artificiel est insuffisant et mal réparti dans l'ensemble des espaces. Certaines zones restent faiblement éclairées, ce qui nuit à la mise en valeur des collections et au confort visuel des visiteurs. C'est pour ça on propose :

- Le système de fibres optiques STARFLEX est idéal pour l'éclairage muséal : il assure une sécurité maximale, tout en offrant un éclairage froid adapté aux objets fragiles. Il permet de varier l'intensité et la couleur de la lumière.
- L'éclairage LED ARCOS préserve les œuvres grâce à une lumière sans UV ni chaleur. Il offre une consommation réduite, une longue durée de vie, une couleur réglable et une installation flexible pour valoriser les expositions.

Plan d'éclairage proposer

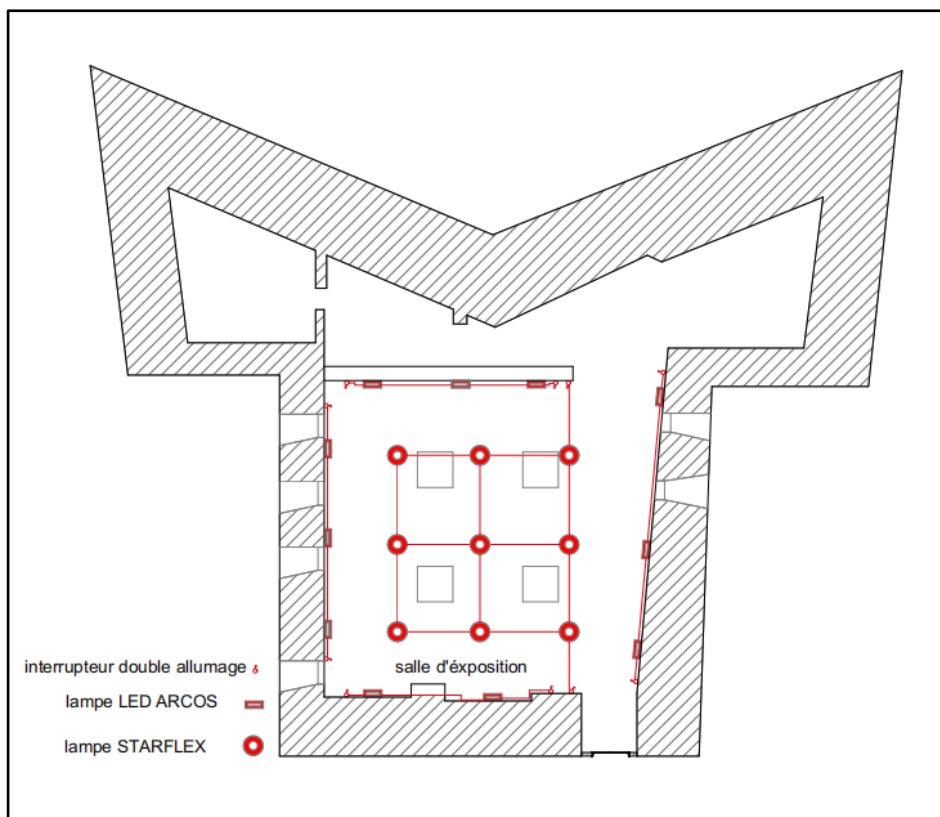


Figure 64 : Plan d'éclairage artificiel proposer pour le musée bordj moussa
Source : auteur 2025

Dans le plan d'éclairage proposé pour la salle d'exposition du musée Bordj Moussa deux types de luminaires ont été installés en fonction des exigences de conservation des œuvres.

- Au centre de la salle, des lampes LED ARCOS ont été installées pour offrir un éclairage homogène, tout en protégeant les pièces sensibles. Ces lampes émettent une lumière sans UV ni chaleur, ce qui préserve efficacement les œuvres qui pourraient être altérées par ces rayonnements.
- En périphérie de la salle, des lampes à fibres optiques STARFLEX ont été positionnées, notamment pour l'éclairage des objets particulièrement fragiles, comme les tissus Le papier ou le bois. Grâce à leur éclairage froid et à l'absence de courant aux points lumineux, elles garantissent une sécurité maximale et des conditions optimales de conservation.

- **Exploitation des énergies renouvelables**

Dans le but d'améliorer la performance énergétique du musée Bordj Moussa de manière durable, une proposition a été avancée.

- Nous avons opté pour l'installation de panneaux solaires photovoltaïques pour la production d'électricité à partir de sources renouvelables. L'objectif de ce choix est d'aider le musée à produire une partie de ses besoins en électricité de manière autonome, tout en réduisant son impact sur l'environnement. En plus de contribuer à la transition énergétique, cette solution permet de diminuer les coûts d'exploitation à long terme, tout en respectant les principes de durabilité et de préservation du patrimoine.
- Les panneaux seront installés à l'extérieur du bâtiment, dans une zone discrète et invisible pour les visiteurs, afin de ne pas altérer l'esthétique architecturale du musée ni nuire à l'expérience culturelle. Ce positionnement assure à la fois performance énergétique et intégration harmonieuse dans l'environnement patrimonial.

III.2.7 Simulation de l'éclairage artificiel proposer pour le musée bordj moussa :

Une simulation de l'éclairage artificiel a été effectuée pour évaluer les performances du système proposé pour le musée Bordj Moussa. Cette simulation permet d'évaluer plusieurs paramètres cruciaux, tels que la distribution de la lumière dans l'espace et le niveau d'éclairement en lux.

- **Résultats de la simulation :**

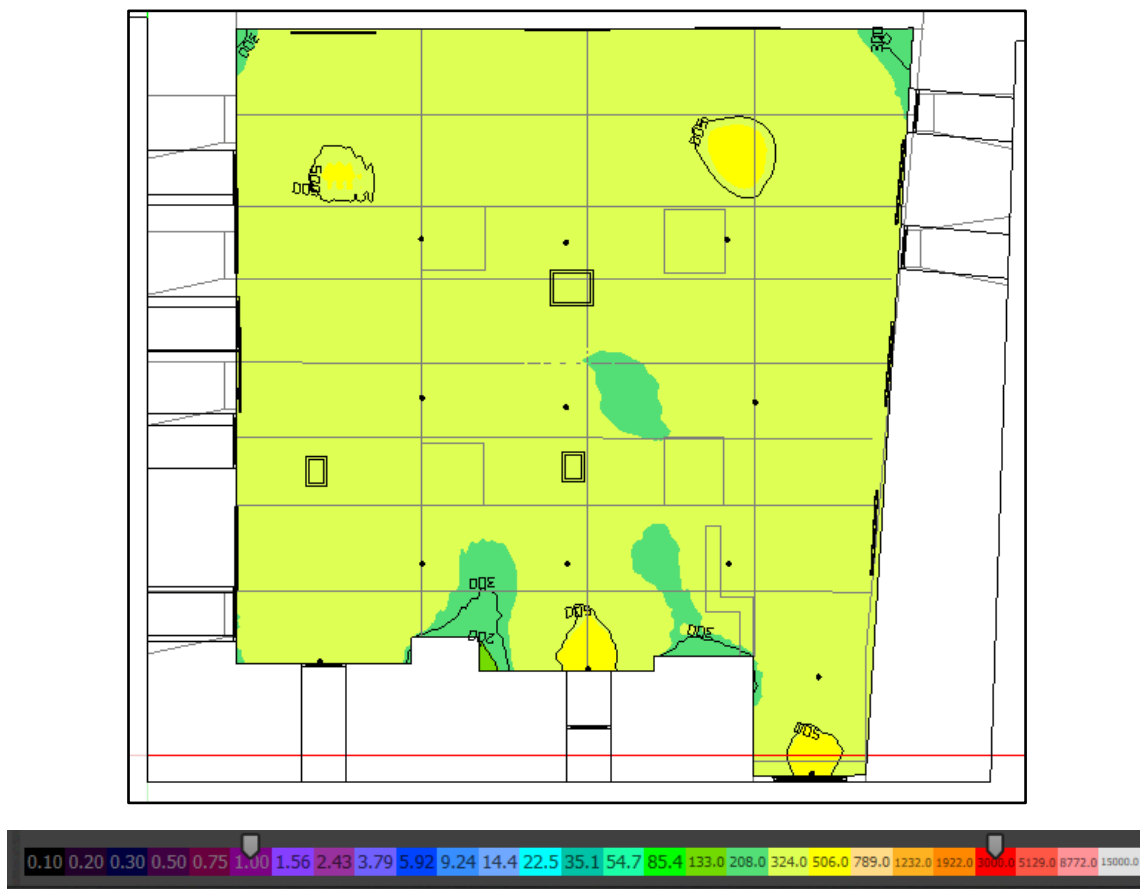


Figure 65 : Résultat de simulation de l'éclairage artificiel proposer

Source : auteur 2025

- **Interprétation des résultats de la simulation**

À partir de la figure, on remarque qu'après l'amélioration de l'éclairage artificiel de la salle d'exposition du musée Bordj Moussa, une répartition lumineuse globalement homogène. L'ensemble de la salle est bien éclairé. On observe que l'éclairement maximal atteint 400 lux et en moyenne 250 lux. C'est conforme aux recommandations pour la conservation des collections sensibles et au confort visuel des visiteurs.

- **Synthèse :**

Après la mise en place du système d'éclairage artificiel proposé, la distribution de la lumière dans la salle d'exposition est devenue plus homogène. Elle répond désormais aux exigences de conservation des collections ainsi qu'au confort visuel pour l'œil humain. Les niveaux de luminosité sont bien maîtrisés, confirmant l'efficacité du dispositif lumineux proposé

Conclusion

Dans ce chapitre de la partie empirique de notre étude, nous avons présenté les résultats du bilan énergétique et de l'analyse du confort thermique, ainsi qu'un diagnostic visuel de l'éclairage naturel et artificiel. Des campagnes de prises de mesures ont été réalisées, accompagnées de simulations d'éclairage artificiel à l'aide du logiciel DIALux Evo, dans le but de confirmer ou les hypothèses établies au départ.

Les résultats du bilan énergétique et de l'étude du confort thermique indiquent que le musée présente une certaine inertie thermique, relativement stable, favorable tant pour les visiteurs que pour la conservation des collections. Toutefois, un facteur critique a été identifié : les pertes d'air et de température au niveau des joints des fenêtres. Pour y remédier, la pose d'une double fenêtre intérieure a été envisagée.

Par ailleurs, les mesures et les simulations ont révélé une insuffisance notable de l'éclairage artificiel à l'intérieur du musée. En réponse à ce constat, un système et un plan d'éclairage ont été proposés afin de satisfaire les besoins lumineux nécessaires à la mise en valeur des collections et d'assurer un bon confort visuel pour les visiteurs

Enfin, on a proposé d'ajouter un système d'énergie renouvelable. Cela permettrait d'inscrire le bâtiment dans une démarche durable et de limiter les problèmes liés à l'électricité

IV Chapitre 04 : le projet « musée d'art et d'histoire »

Introduction

Ce chapitre présente une approche globale et structurée du projet architectural, en s'appuyant sur une analyse approfondie du site, des choix conceptuels et des solutions techniques mises en œuvre.

Nous débuterons par une présentation générale du projet, qui met en lumière ses objectifs, ses caractéristiques principales. Cette introduction sera suivie par une analyse du site, abordant les aspects géographiques, topographiques, climatiques, ainsi que les accès et les contraintes d'implantation. Ces éléments justifient les choix de conception adoptés. Par la suite, nous exposerons le schéma de principe et les grandes lignes de la genèse du projet, retraçant le processus de réflexion ayant conduit à sa forme finale. Viendra ensuite la présentation détaillée des plans, illustrant la distribution fonctionnelle, les parcours, les flux, et les relations entre les espaces. L'analyse se poursuivra avec une étude des façades.

Enfin, Nous mettrons l'accent sur les techniques utilisées dans le projet, notamment en matière de performance énergétique, thermique et d'éclairage artificiel, ainsi qu'à l'intégration des énergies renouvelables, à travers notamment l'installation de panneaux photovoltaïques. Ce chapitre se conclura par une simulation de l'éclairage artificiel, illustrant la qualité et l'homogénéité de l'ambiance lumineuse intérieure

IV.1 Présentation de projet

Le projet porte sur la création d'un musée d'art et d'histoire destiné à la ville de Béjaïa. L'objectif de ce musée est de conserver, mettre en valeur et faire connaître le riche patrimoine artistique, Culturel et historique de la ville. Il s'agira d'un espace d'exposition où seront présentées des œuvres d'art, des objets anciens, des documents historiques.



Figure 66 : Image de projet (musée d'art et d'histoire)

Source : auteur 2025

IV.2 Choix de projet :

La richesse culturelle et historique de la ville de Béjaïa nous a conduits à inscrire notre projet dans une démarche de valorisation patrimoniale. Afin de préserver, enrichir et mettre en lumière ce patrimoine, nous avons choisi de créer un centre muséal expérientiel dédié à l'art et à l'histoire. Ce musée vise à offrir aux visiteurs une immersion sensorielle et éducative, pour les sensibiliser à l'identité unique de Béjaïa, tout en tirant parti de ses atouts historique et culturels.

IV.3 L'objectif du projet

- Éducation locale : Offrir des programmes éducatifs pour les résidents.
- Préservation du patrimoine : Sauvegarder Histoire et la culture locale.
- Promotion culturelle : Mettre en avant l'art et la culture de la ville.

IV.4 Analyse de site « Sidi Ali Lebhar » :

IV.4.1 Situation géographique de site :

Sidi Ali Lebhar est situé à l'est de la ville de Béjaïa, en Algérie, à proximité de la côte méditerranéenne. C'est un quartier côtier connu pour sa plage et son accès facile depuis le centre-ville de Béjaïa. Il est entouré par :

- Est : la route nationale 09
- Sud par l'aéroport Abane Ramdane
- Nord ouest par la mer méditerranéenne



Figure 67 : Situation géographique de site
Source : <https://www.openstreetmap.org/> traité par l'auteur

IV.4.2 Choix de site :

- Proximité de la ville de Béjaïa
- Bon accès au transport public
- Facilement accessible
- Bénéficie d'une bonne visibilité
- Cadre naturel et culturel propice à la mise en valeur du patrimoine
- Localisation en bord de mer offrant un lien symbolique entre histoire, art et nature
- Un site inspirant, en harmonie avec la vocation du musée comme lieu de mémoire et de transmission

IV.4.3 Accessibilité et environnement immédiat :

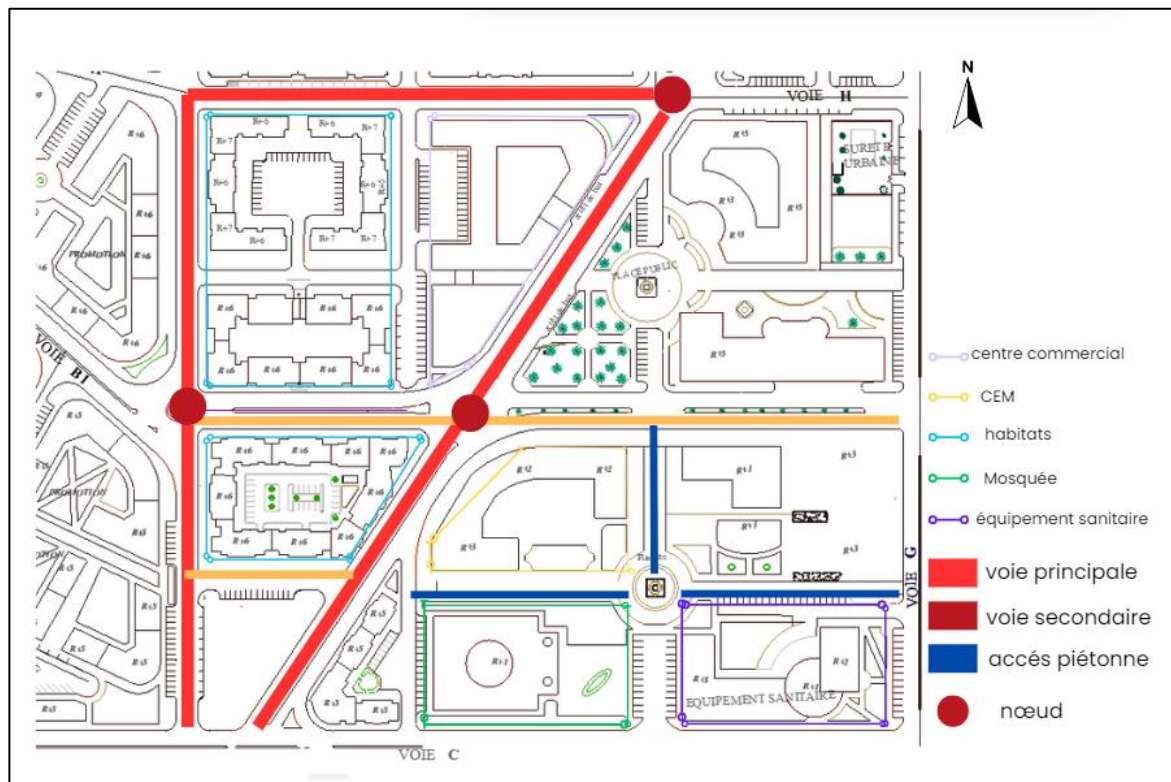


Figure 68 : Accessibilité et environnement immédiat du site

Source : auteur 2025

Le site dispose d'une bonne accessibilité, situé au croisement de voies principales et secondaires, avec un accès piéton bien marqué. Il est entouré d'un environnement urbain dynamique comprenant des logements, des équipements scolaires, commerciaux, religieux et

sanitaires. Cette localisation centrale et bien desservie en fait un emplacement idéal pour un musée, facilement accessible au public

IV.4.4 Climatologie de site :

L'objectif de cette section est d'analyser l'exposition au soleil et les vents dominants sur le site étudié, afin de guider les choix architecturaux en matière de confort thermique, d'orientation des espaces et de protection passive

IV.4.5 Ensoleillement

L'étude de l'ensoleillement a été réalisée à partir de simulations sur quatre dates clés de l'année

➤ Résultats :

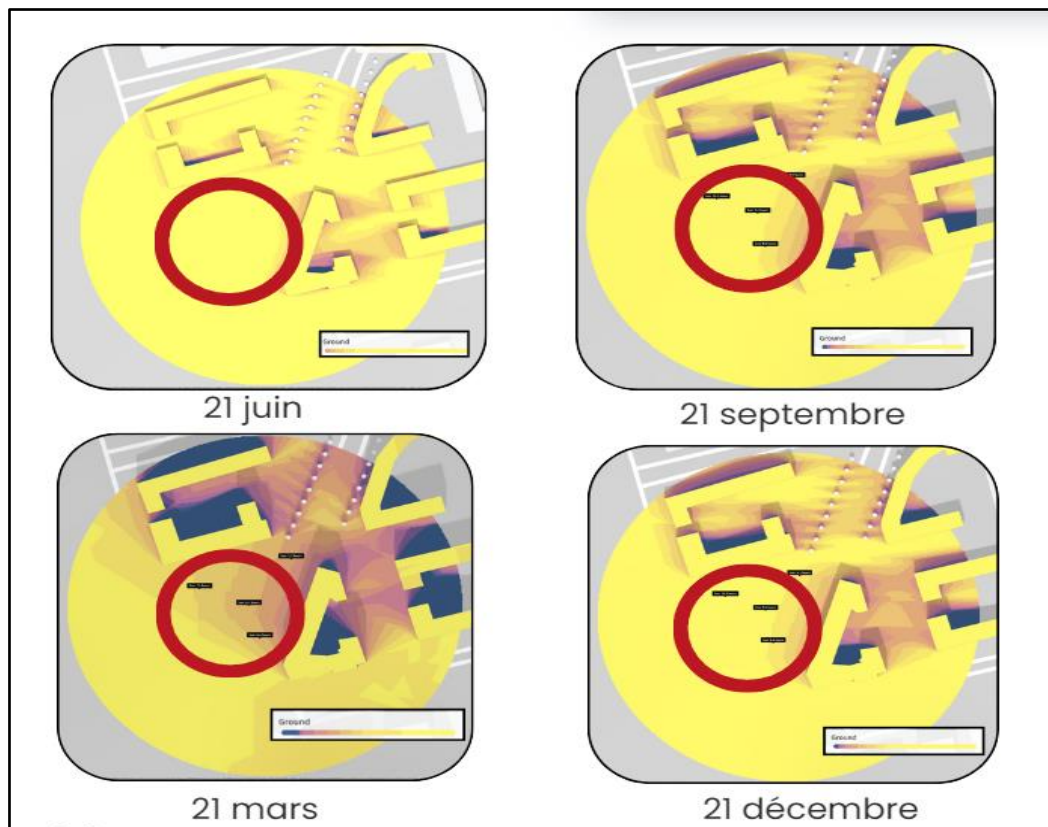


Figure 69 : Résultats de l'ensoleillement sur le site.

Source : auteur 2025

- **Interprétation des résultats :**

21 juin :

- La zone jaune (6h+ d'ensoleillement) couvre largement l'ensemble du site, y compris autour des bâtiments.
- En été, le soleil est haut, ce qui favorise une bonne pénétration de la lumière, même à proximité des bâtiments.
- Un ensoleillement maximal est disponible sur les façades sud et ouest.

21 septembre :

- Les zones jaunes diminuent légèrement, et des ombres se dessinent sur les côtés des bâtiments.
- Il y a une diminution de la durée d'exposition dans certaines zones en raison du soleil plus bas qu'en été.

21 mars :

- Situation quasi identique à celle du 21 septembre, avec des zones d'ombre similaires.
- Les façades sud-est et sud-ouest reçoivent encore une bonne lumière directe.

21 décembre :

- La zone d'ensoleillement est fortement réduite. La majorité du site est dans l'ombre
- Le soleil est très bas ; les ombres projetées par les bâtiments sont longues.
- Seules certaines zones dégagées reçoivent un peu de lumière.
- **Synthèse :**

L'étude révèle un ensoleillement maximal en été, surtout sur les façades sud et ouest. Aux équinoxes, l'exposition reste satisfaisante malgré l'apparition d'ombres. En hiver, l'ensoleillement est fortement réduit à cause des ombres longues. Cette évolution saisonnière doit être prise en compte dans la conception du projet pour optimiser le confort lumineux.

IV.4.6 Les vents :

L'étude des vents dominante a été réalisée à partir de simulations sur deux directions de vent

- **Résultats**

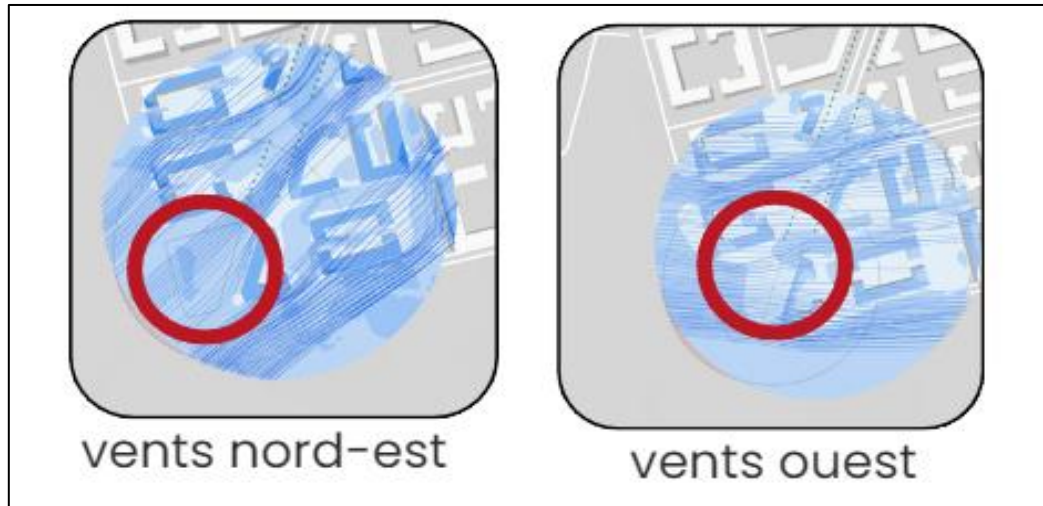


Figure 70 : Résultat d'analyse des vents sur site

Source : auteur 2025

- **Interprétation de résultats :**

Vents de nord-est

- Le schéma montre une forte exposition du site aux vents venant du nord-est.
- La cour centrale (cercle rouge) est partiellement exposée à ces vents, ce qui peut impacter le confort thermique des usagers en période froide ou venteuse.

Vents d'ouest

- L'exposition est plus diffuse ; les bâtiments créent des barrières efficaces, réduisant l'impact direct du vent sur la cour intérieure.
- Le site semble mieux protégé contre les vents venant de l'ouest grâce à son implantation urbaine et son orientation.

- **Synthèse :**

Le site est plus exposé aux vents de nord-est, ce qui nécessite l'intégration de protections (haies, murs, aménagements paysagers). En revanche, les vents d'ouest sont mieux maîtrisés par la morphologie du bâti environnant.

IV.4.7 La topographie de site

Cette coupe montre que la hauteur du terrain reste pratiquement la même tout le long, avec seulement une légère pente. Cela indique que le terrain est plat. Ce qui facilite grandement les travaux d'implantation sans nécessité de terrassement important.

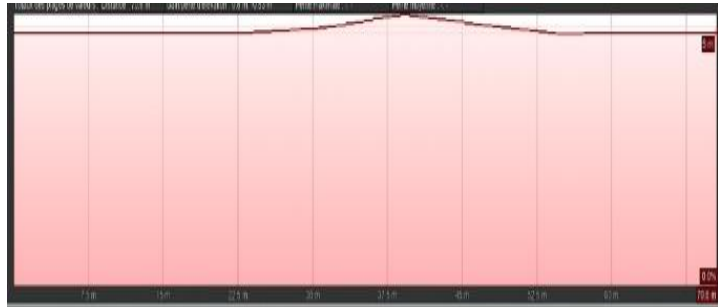


Figure 71 : Coupe schématique du terrain

Source : auteur 2025

IV.4.8 Synthèse de l'analyse de site :

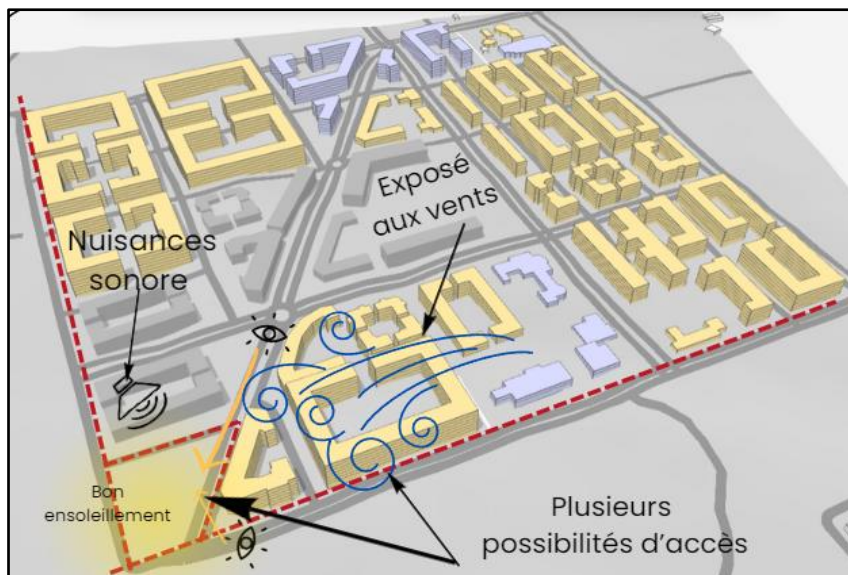


Figure 72 : Synthèse de l'analyse de site

Source : auteur 2025

Cette synthèse met en avant les atouts du site tout en signalant les contraintes. Ces éléments permettent de guider les choix futurs d'implantation, d'orientation de projet ou de conception des espaces extérieurs.

- **Les atouts du site :**

Bon ensoleillement : le terrain bénéficie d'un bon ensoleillement naturel

Plusieurs possibilités d'accès : Le terrain est bien desservi par des voies d'accès, ce qui facilite la circulation, la distribution des flux

Terrain plat : ce qui facilite la construction, réduit les coûts de terrassement

- **Contraintes du site :**

Exposition aux vents : Le site est exposé à des vents dominants venant du nord-est. Cela peut influencer l'orientation de projet

Nuisances sonores : La proximité d'une source de bruit (des voies de circulation) crée une contrainte acoustique.

IV.5 Schéma du principe de projet

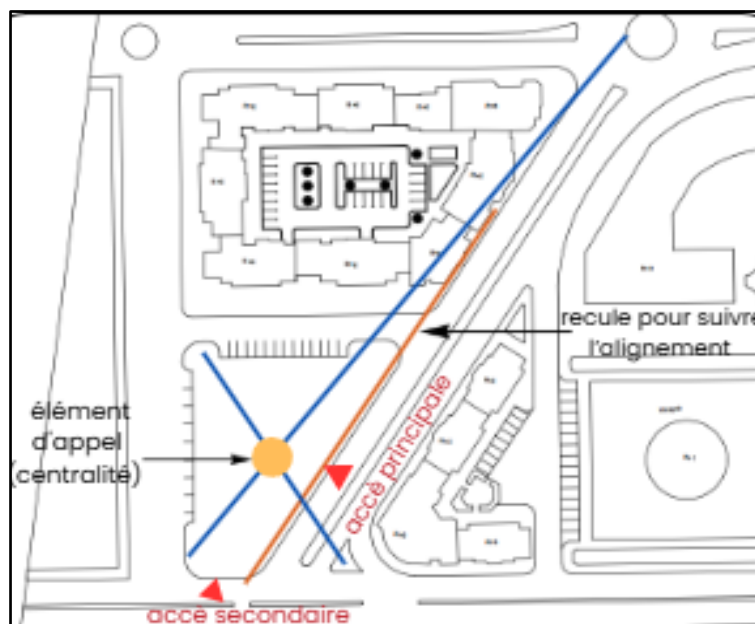


Figure 73 : Schéma du principe
Source : auteur 2025

Ce schéma de principe met en évidence la structure de base du projet :

- L'élément d'appel central, qui représente le cœur du projet, est clairement lisible depuis le nœud de circulation et les deux voies principales. Il joue un rôle de repère visuel et de centralité.
- Un recul de 1,5 mètre est prévu pour respecter l'alignement urbain existant et mieux intégrer le projet dans son environnement.
- Le terrain est desservi par un accès principal situé sur l'axe majeur du site, complété par deux accès secondaires qui assurent une bonne fluidité et connectivité.

IV.6 Genèse de projet

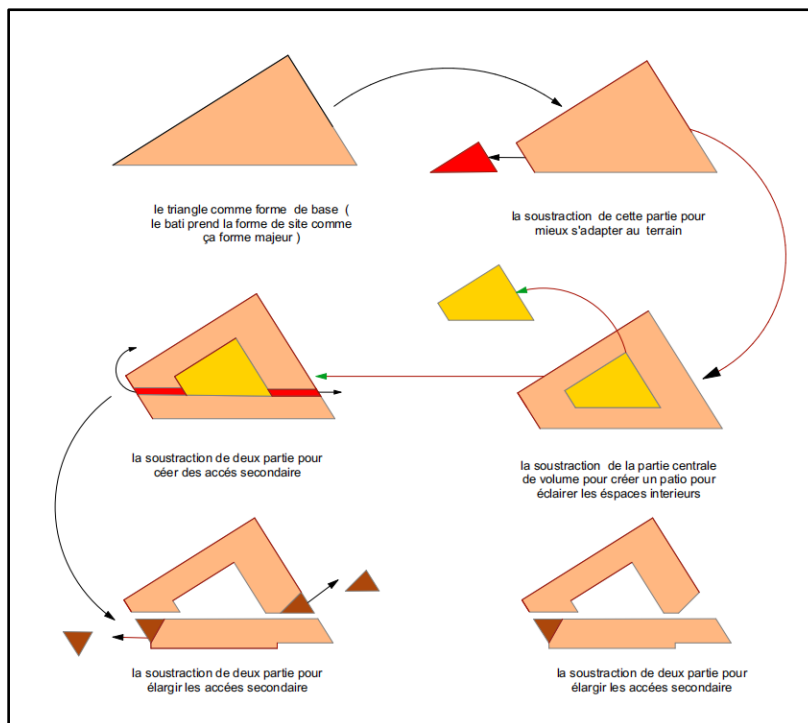


Figure 74 : Genèse de projet

Source : auteur 2025

- **Le triangle comme Forme de base** : Le projet commence avec un triangle, forme qui découle directement de la configuration du terrain. Cette forme devient l'empreinte initiale du bâti.
- **Création d'un patio central** Une partie centrale du volume est retirée, formant un vide intérieur. Cette soustraction crée un patio pour faire entrer la lumière naturelle au cœur du projet, assurant une meilleure qualité des espaces intérieurs tout en renforçant la ventilation naturelle

Création d'accès secondaires Deux nouvelles soustractions sont effectuées, créant des ouvertures latérales. Ces vides secondaires permettent de diversifier les parcours d'accès, facilitant les circulations périphériques ou les entrées de service.

Élargissement des accès secondaires Les ouvertures latérales sont élargies pour améliorer l'accessibilité.

- **Synthèse**

La conception suit une logique de soustraction pour répondre aux besoins du site. Chaque retrait améliore l'adaptation, l'éclairage et les accès, donnant naissance à une architecture simple, fonctionnelle et bien intégrée.

IV.7 Plan de masse

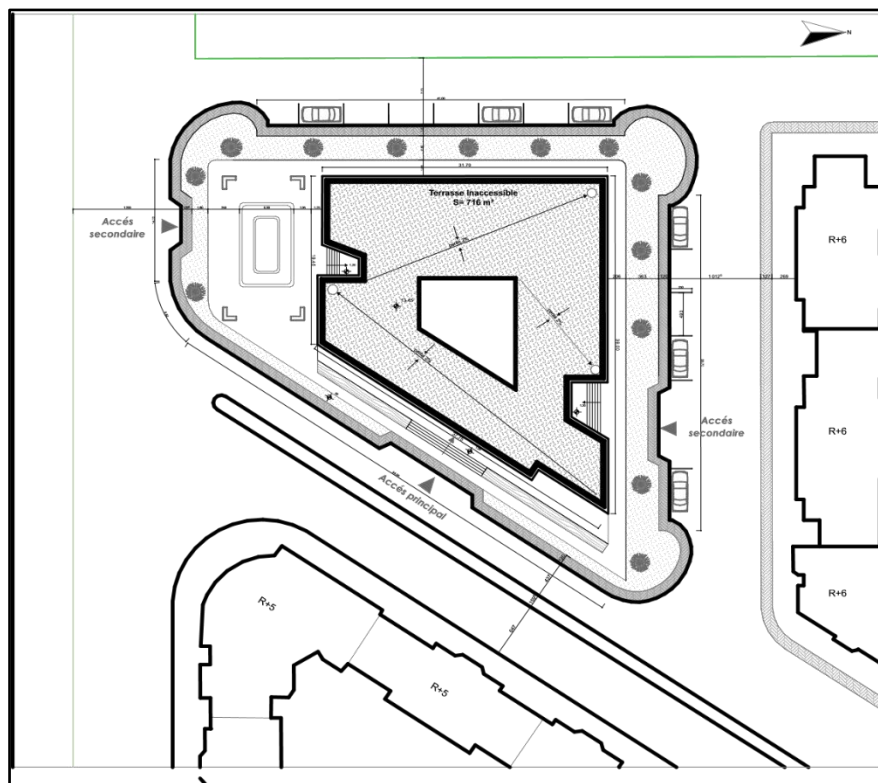


Figure 75 : Plan de masse
Source : auteur 2025

Le projet, d'une superficie de 716 m², est implanté sur un terrain de 2000 m² présentant une forme triangulaire, ce qui a influencé la configuration architecturale du bâtiment.

Il dispose de trois accès : un accès principal depuis la voie principale, ainsi que deux accès secondaires depuis les voies adjacentes.

Des stationnements intégrés à la voirie sont également prévus, afin de répondre aux besoins en stationnement tout en assurant une bonne intégration urbaine et une circulation fluide autour du site.

IV.8 L'organisation spatiale

Le projet est structuré en trois niveaux, chacun ayant une fonction spécifique, tout en assurant une fluidité des parcours et une organisation claire des espaces.

- **Plan de rez de chaussée**

Ce niveau est dédié à la réception des visiteurs et aux fonctions publiques :

- Hall d'accueil
- Un auditorium
- Bibliothèque
- Deux magasins muséaux

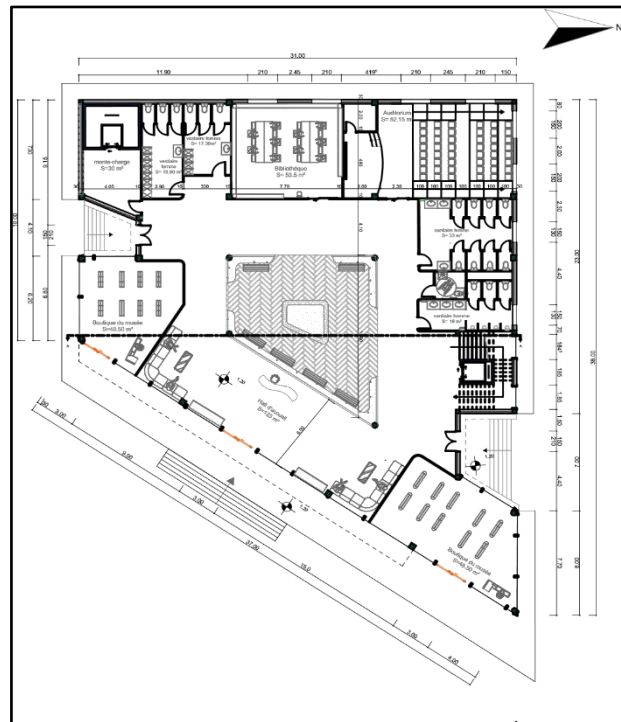


Figure 76 : Plan de rez de chaussée
Source : auteur 2025

- **Premier étage**

Ce niveau met l'accent sur la mémoire historique de Béjaïa et la pédagogie :

- Salle d'exposition historique
- Salle pédagogique
- Atelier de sculpture

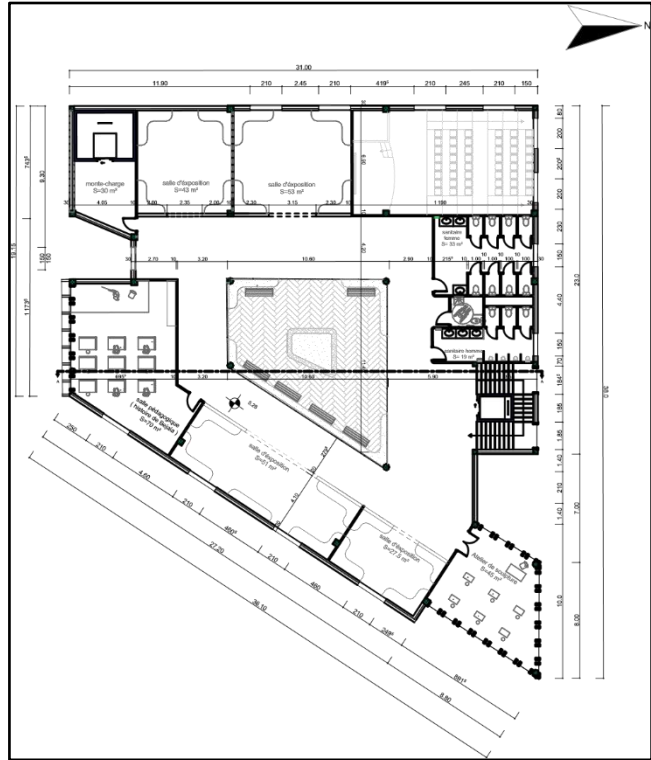


Figure 77 : Plan de premier étage
Source : auteur 2025

- Deuxième étage

Ce niveau célèbre l'art local et la créativité et l'administration :

- Salles d'exposition artistique
- Salle pédagogique
- Salle de peinture

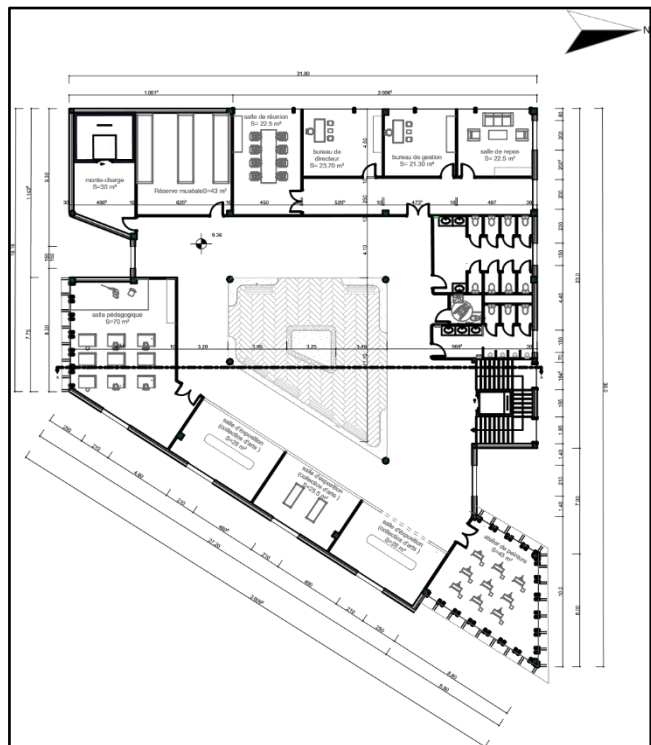


Figure 78 : Plan de deuxième étage
Source auteur 2025

- **Plan de toiture**

La toiture plate avec une superficie de 716 m².

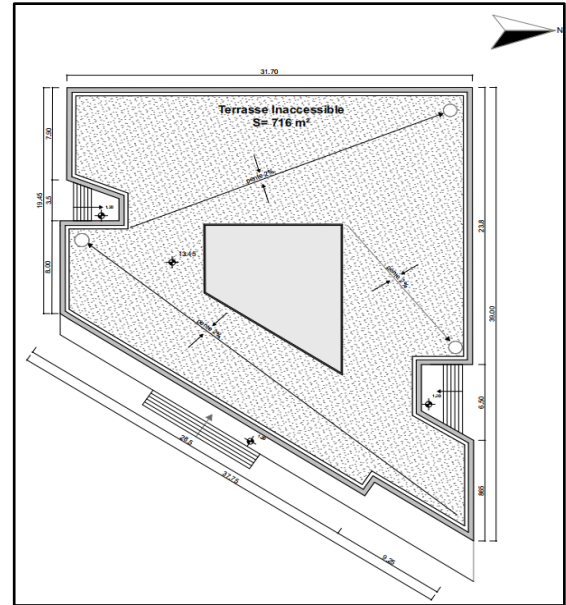


Figure 79 : Plan de toiture

Source : auteur 2025

IV.9 Lecture architecturale de la façade :

- **Façades techniques**

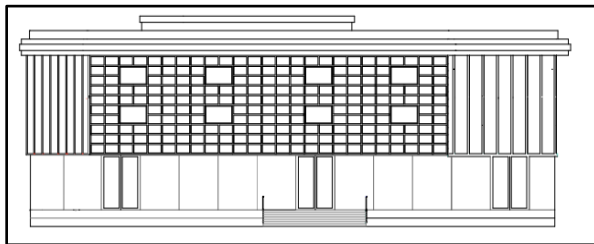


Figure 80 : Façade Est

Source : auteur 2025



Figure 81 : Façade nord

source : auteur 2025

- **Façades rendues**



Figure 82 : Ensemble de photos de 3 D de projet

Source : auteur 2025

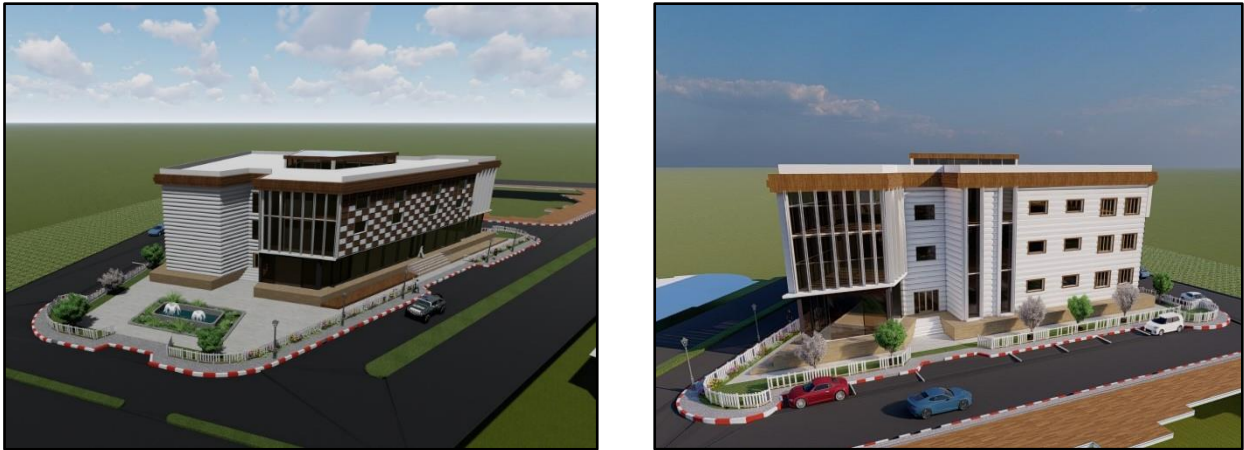


Figure 83 : Ensemble de photos de 3D de projet
Source : auteur 2025

IV.9.1 Concepts de la façade :

- Transparence (Choix du mur rideau)

Au niveau de rez de chaussée permet un apport maximal de lumière naturelle dans le hall d'accueil pour Créer un espace lumineux, accueillant et visuellement connecté à l'extérieur. Cette transparence renforce également l'effet de proximité avec le public.

Au niveau des espaces Administratifs et ateliers favoriser une ambiance de travail agréable et bien éclairée pour Créer une relation visuelle avec l'extérieur, tout en conservant un certain contrôle de l'intimité.

- Ouverture contrôlée

Façades plus fermées aux étages avec des fenêtrages limités et réguliers pour réduire l'entrée de lumière directe pour protéger les objets exposés et maîtriser l'ambiance lumineuse artificielle, adaptée à l'exposition muséale.

- Jeu de matière et de motifs

La trame en damier sur une façade ajoute du rythme et évoque une dimension culturelle ou artistique.

L'usage de volumes en bois en bandeau créant un effet de stratification élégante.

IV.10 Techniques de performance thermique appliquer dans le projet :

- **Isolation de la toiture (toiture plate)**

Des panneaux rigides (laine de bois) sont u posés sur la dalle (une dalle alvéolaire). Cela permet de maintenir une isolation continue, sans ponts thermiques, tout en profitant de la résistance mécanique et de la légèreté de la dalle alvéolaire.

- **Isolation du sol (rez-de-chaussée)**

Une isolation naturelle et performante est mise en place au niveau du rez-de-chaussée, à l'aide d'une dalle de liège expansé posée sous les revêtements de sol. Permet d'assurer une bonne inertie thermique et d'éviter les remontées capillaires.

- **Isolation du Murs et parois extérieures**

Construction des murs avec des matériaux à forte inertie thermique, capables de retenir la chaleur pendant l'hiver et de la restituer légèrement, tout en limitant les surchauffes en été.

Solutions adoptées :

Utilisation de maçonneries isolantes (comme le béton isolé) pour combiner **résistance** thermique et solidité.

Utilisation d'enduits respirants (à base de chaux naturelle ou de plâtre) pour contrôler l'humidité, tout en permettant au mur de respirer.

- **Menuiseries performantes**

Le projet intègre des menuiseries à double vitrage performantes, avec un choix adapté à chaque espace en fonction de son usage.

Ce choix permet d'obtenir un meilleur contrôle thermique et lumineux, en conciliant confort, performance énergétique et utilisation fonctionnelle.

IV.11 Éclairage artificiel intégré dans le projet :

Dans ce projet, deux types de lampes spécialisées ont été utilisées pour assurer un éclairage de qualité tout en protégeant les objets fragiles, comme des œuvres d'art ou des pièces de collection

- Des lampes LED ARCOS ont été installées pour fournir un éclairage homogène, assurant une répartition uniforme de la lumière dans l'espace
- Des lampes à fibres optiques STARFLEX ont été positionnées pour l'éclairage ambitionné d'objets fragiles, tels que les tissus, le papier ou le bois. Grâce à leur éclairage froid et à l'absence de courant électrique au niveau des points lumineux, ces dispositifs garantissent des conditions de conservation optimales et une sécurité maximale pour les pièces exposées.

IV.11.1 Simulation de l'éclairage artificiel de projet :

On a choisi la salle d'exposition pour réaliser la simulation de l'éclairage artificiel car elle constitue l'entité la plus importante du projet. C'est l'espace central où les œuvres sont présentées au public.

Plan d'éclairage de la salle d'exposition

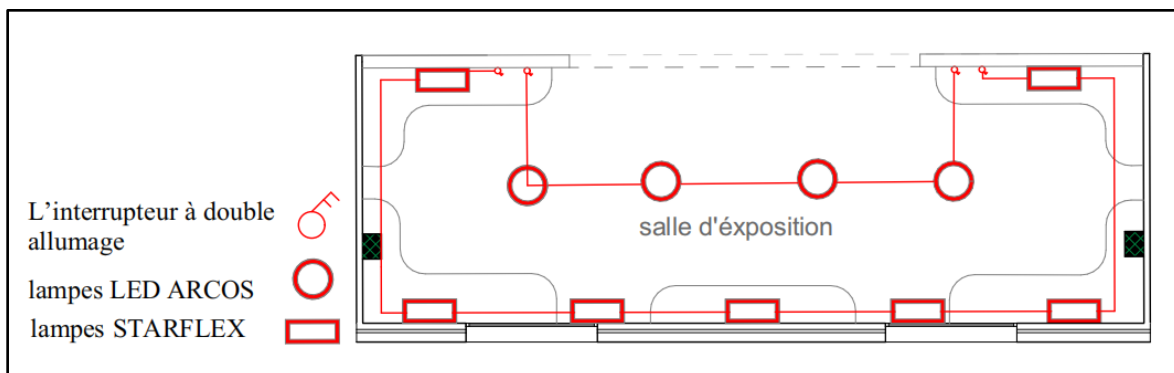


Figure 84 : Plan d'éclairage de la salle d'exposition

Source : auteur 2025

Des lampes LED ARCOS ont été installées au centre pour assurer un éclairage homogène sans UV ni chaleur, protégeant ainsi les œuvres sensibles. En périphérie, des lampes à fibres optiques STARFLEX ont été utilisées pour éclairer les objets les plus fragiles (tissus, papier,

bois), grâce à leur éclairage froid et sans courant, garantissant une conservation optimale et une sécurité maximale.

Résultats de la simulation

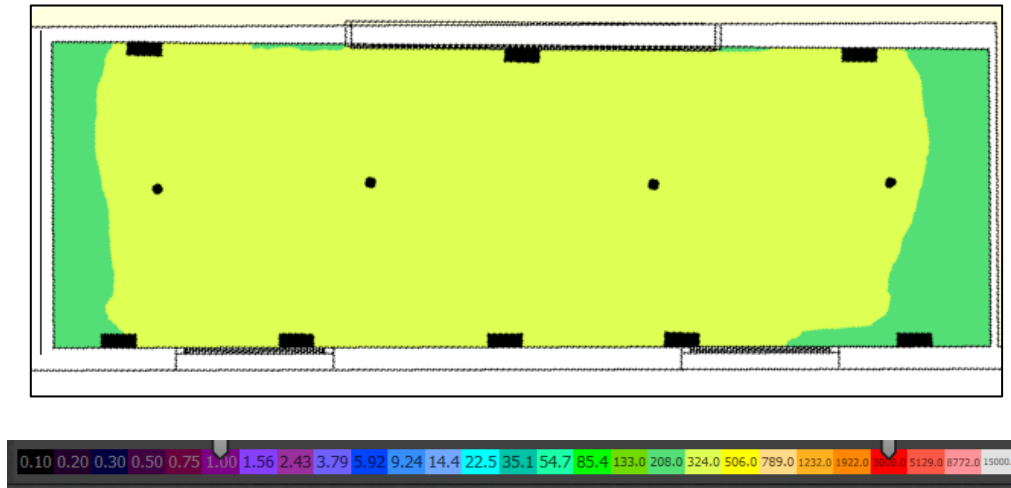


Figure 85 : Résultats de la simulation de l'éclairage artificiel
Source : auteur 2025

Interprétation des résultats

À partir de la figure, on remarque une répartition lumineuse globalement homogène. L'ensemble de la salle est bien éclairé. On observe que l'éclairement maximal atteint 350 lux et en moyenne 250 lux. C'est conforme aux recommandations pour la conservation des collections sensibles et au confort visuel des visiteurs.

Synthèse

À partir de l'interprétation des résultats de la simulation, on constate une répartition lumineuse globalement homogène dans l'ensemble de la salle. La zone centrale est particulièrement bien éclairée, tandis que les zones périphériques présentent une légère baisse de l'éclairement, sans compromettre la qualité globale de l'éclairage. L'éclairement maximal atteint 350 lux et l'éclairement moyen est de l'ordre de 250 lux. Ces niveaux sont conformes aux recommandations en matière de conservation des collections sensibles, tout en garantissant un bon confort visuel pour les visiteurs. L'éclairage artificiel semble donc bien dimensionné et adapté à l'usage prévu de l'espace.

IV.12 Intégration de l'énergie renouvelable dans le projet

Nous avons choisi d'installer des panneaux solaires photovoltaïques afin de produire de l'électricité 1,7 m² à partir de sources d'énergie renouvelables. Ce choix vise à permettre au musée de couvrir une partie de ses besoins énergétiques de manière autonome, tout en réduisant son empreinte environnementale. En plus de soutenir activement la transition énergétique, cette solution contribue à la diminution des coûts d'exploitation sur le long terme, tout en s'inscrivant dans une démarche durable respectueuse.

On a prévu l'installation de panneaux photovoltaïques sur la toiture du bâtiment. Chaque panneau mesure environ et développe une puissance de 400 WC. Grâce à l'espace disponible sur la toiture, il est possible d'installer jusqu'à 250 panneaux, ce qui représente une puissance totale d'environ 100 kWc. Cette configuration permettra de produire une part significative de l'électricité consommée par le musée, tout en valorisant la surface de toiture inutilisée.

Conclusion

Cette démarche permettra de comprendre l'ensemble des choix architecturaux et techniques qui ont guidé le développement du musée d'art et d'histoire. Depuis l'analyse du site jusqu'à l'optimisation de la performance énergétique et lumineuse, chaque étape a été pensée pour répondre à des enjeux à la fois fonctionnels, esthétiques et environnementaux.

L'insertion du projet dans son contexte urbain et paysager a orienté la conception générale, tout en respectant les contraintes du site. Les plans, façades et coupes présentés traduisent une volonté de créer un parcours muséal clair, fluide et adapté à la valorisation des œuvres. Par ailleurs, les solutions techniques retenues en matière de confort thermique, d'éclairage artificiel et d'intégration des énergies renouvelables affirment d'une recherche d'efficacité et de durabilité.

La simulation de l'éclairage artificiel a permis d'affiner ces choix, en assurant un équilibre entre mise en valeur des espaces et confort visuel des visiteurs. L'ensemble de ces éléments contribue vers une conception cohérente, où l'architecture dialogue avec son environnement tout en répondant aux exigences d'un espace culturel contemporain.

Conclusion générale

Introduction

Notre travail effectué sur l'amélioration de performance énergétique de musée bordj moussa vise à trouver des solutions les plus convenables pour améliorer énergétiquement ce fort tout en assurant son identité patrimoniale. Afin de pouvoir répondre à notre problématique qui s'agit de trouver des technique et solution pour améliorer sa performance énergétique tout en sauvegardant sa valeur patrimoniale.

Cette étude est structurée en deux parties complémentaires. La première partie, théorique, aborde le patrimoine et des généralisées sur les musées, ainsi que les principes d'amélioration de la performance énergétique dans les bâtiments patrimoniaux qui se concentre sur trois aspects essentiels : le confort thermique, l'éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelables. La deuxième partie, pratique, porte sur le cas d'étude du musée Bordj Moussa. Elle consiste une étude quantitative comprenant un diagnostic visuel sur l'éclairage artificiel et naturel, un bilan énergétique sur le confort thermique et l'hygrométrie, des relevés sur site et une simulation numérique de l'éclairage artificiel à l'aide du logiciel DIALux et de proposer des solutions pour l'amélioration de performance énergétique de ce dernier.

Cette partie se conclut par l'intégration de ces solutions techniques dans notre projet architectural qui est un musée d'art et d'histoire

La conclusion de cette étude répond globalement aux questions posées au départ et confirment la réalisation de l'hypothèse et les objectifs fixés. Ci-dessous, nous vous présentons une synthèse des principaux résultats.

Résultats de recherche

À travers la première partie de notre recherche, on aperçoit la notion du patrimoine, leur importance pour la mémoire collective, ainsi que les principes de leur sauvegarde. Elle aborde également les généralités sur les musées, leurs fonctions et la mise en réserve des collections.

L'amélioration de la performance énergétique dans les bâtiments d'intérêt patrimonial repose sur plusieurs facteurs. Elle dépend notamment de la qualité de l'isolation thermique, de la performance des systèmes d'éclairage artificiel, de l'intégration appropriée des énergies renouvelables, ainsi que du respect des contraintes architecturales et historiques propres à ce type de bâtiments.

Conclusion générale

Notre préoccupation d'améliorer les performances énergétiques du musée Bordj Moussa, tout en préservant la valeur patrimoniale de ce bâtiment, nous a orienté vers une étude quantitative incluant un bilan énergétique du confort thermique, un diagnostic visuel de l'éclairage artificiel et naturel, des prises de mesures ainsi qu'une simulation numérique de l'éclairage artificiel.

Le bilan énergétique du confort thermique montre que le musée Bordj Moussa présente une bonne inertie thermique, mais des fuites d'air et de température sont observées au niveau des fenêtres.

Le diagnostic visuel de l'éclairage naturel et artificiel, ainsi que les prises de mesures et la simulation numérique de l'éclairage artificiel, montrent que l'éclairage artificiel de ce musée ne répond pas aux exigences d'éclairage adéquat pour un espace muséal et aux normes recommandées.

Au final, une série de techniques et de solutions ont été proposées pour améliorer la performance énergétique du musée Bordj Moussa dans les trois volets le confort thermique, l'éclairage artificiel et l'intégration des énergies renouvelable. Par la suite, ces techniques seront mises en œuvre dans le projet architectural.

Limite de recherche

Comme toute recherche, notre travail présente certaines limites ces dernières sont :

Manque d'informations sur l'histoire du musée Bordj Moussa, ce qui nous a menés à faire une brève analyse historique

L'étude doit préserver la valeur historique et architecturale du musée Bordj Moussa, ce qui limite les interventions possibles sur l'amélioration de la performance énergétique, Certaines solutions énergétiques modernes peuvent être difficiles à appliquer sans altérer le patrimoine.

Perspective de la recherche

Le patrimoine monumental de la ville de Béjaïa mérite d'être valorisé afin de renforcer son importance économique et culturelle. Cette démarche peut commencer par des interventions sur des l'améliorations des performances énergétiques de ces monuments

Les perspectives de cette recherche consistent à :

Étudier comment intégrer discrètement les énergies renouvelables dans les bâtiments historiques sans les dénaturer.

Proposer des solutions d'amélioration des performances énergétique intelligente pour les bâtiments patrimoniaux.

Utiliser des logiciels numériques pour simuler l'ensemble des performances énergétiques.

Conclusion :

Bordj Moussa est considéré comme l'un des témoins architecturaux de la richesse patrimoniale de la ville de Béjaïa. L'amélioration de sa performance énergétique lui offrira une nouvelle vie et permettra sa transmission aux générations futures, assurant ainsi sa durabilité, sa pérennité et sa valorisation, ainsi que celle du patrimoine culturel et économique de la ville de Béjaïa

La Bibliographie

1. **ATHEBA. (2000).** Amélioration thermique du bâti ancien [Report]. Envirobat Centre.
2. **Babelon, J.-P., & Chastel, A. (2022).** La notion de patrimoine. Liana Levi.
3. **Berducou, M. C. (Éd.). (1990).** La conservation en archéologie : Méthodes et pratique de la conservation-restauration des vestiges archéologiques. Masson.
4. **Brandi, C. (2001).** Théorie de la restauration. Éditions du patrimoine.
5. **Choay, F. (1996).** L'allégorie du patrimoine. Seuil.
6. **Conseil international des musées (ICOM). (2022, août 24).** Définition du musée—International Council of Museums—International Council of Museums.
<https://icom.museum/fr/ressources/normes-et-lignes-directrices/definition-du-musee/>
7. **Feilden, B. M., & Jokilehto, J. (1996).** Guide de gestion des sites du patrimoine culturel mondial. ICCROM.
8. **International Council of Museums (ICOM). (2017).** Statuts du Conseil international des musées (ICOM) – Statuts (2017).
https://icom.museum/wpcontent/uploads/2018/07/2017_ICOM_Statuts_FR.pdf
9. **International Organization for Standardization (ISO). (2005).** Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
10. **Johnson, E. V., & Horgan, J. C. (1980).** La mise en réserve des collections de musée. Unesco.
11. **Labouret, A. (2010).** Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque (5^e éd.). Dunod.
12. **Labouret, A., & Villos, M. (2003).** Énergie solaire photovoltaïque : Le manuel du professionnel. Dunod.
13. **Magalie Franchomme. (2022).** L'éclairage : Un levier de la transition énergétique et de la transition écologique.
14. **Ministère de la Culture France. (2025, mars 7).** La performance énergétique dans les bâtiments d'intérêt patrimonial. <https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/monuments->

sites/monuments-historiques-sites-patrimoniaux/Themes-environnementaux/La-performance-energetique-dans-les-batiments-d-interet-patrimonial

15. **Neufert, E., Du Bellay, J.-C., Gauzin-Müller, D., & Hoyet, R. (2014).** Neufert : Les éléments des projets de construction (K. Ansquer, U. Benderitter, & Y. Benderitter, Trad.; 11^e éd.).
16. **Dunod. Poel, B., Van Cruchten, G., & Balaras, C. A. (2007).** Energy Performance Assessment of Existing Dwellings. *Energy and Buildings*, 39(4), Article 4.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.008>
17. **République Algérienne. (1998).** Loi n° 98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel. In *Journal Officiel de la République Algérienne* (Loi Nos. 98-04; Numéros 98-04).
18. **Riegl, A. (2013).** Le culte moderne des monuments : Son essence et sa genèse (D. Wieczorek, Trad.). Éditions du Seuil.
19. **Tony Bennett. (1999).** La naissance du musée : Histoire, théorie, politique (Éditions de la Maison des sciences de l'homme).
20. **Zumtobel Lighting GmbH. (2010).** La lumière pour l'art et la culture [Report]. Zumtobel Lighting GmbH.

Annexes

Annexe 01 : programme surfacique du projet

Entités	Sous-Entités	Nombre	Surface	Définition	Exigences
Services et accueil	Hall d'accueil	01	123m ²	C'est le premier point d'interaction avec les visiteurs, où ils obtiennent les informations nécessaires sur le musée, ses expositions et ses services.	
	Boutique du musée	02	78.5 m ²	Vente de souvenirs, livres, répliques d'œuvres	
	Vestiaires	02	37.2m ²	Espace dédié pour le personnel	
	Sanitaires	04	52m ²	Espace d'hygiène	
Exposition : section histoire de Bejaia	Salle d'exposition (Histoire)	01	53m ²	Présentation des premières populations installées à Béjaïa et ses environs Éléments visuels : Cartes géographiques anciennes. Objets romains comme des mosaïques, pièces de monnaie, et amphores	<p>Éviter l'exposition directe à la lumière naturelle pour protéger les artefacts sensibles.</p> <p>Utilisation de luminaires LED à basse intensité, adaptés aux objets anciens.</p> <p>Spots directionnels pour mettre en valeur des pièces spécifiques comme des manuscrits ou des sculptures.</p>
	Salle d'exposition	01	43m ²	Histoire de Béjaïa en tant que capitale Hammadide (11 ^e siècle).	

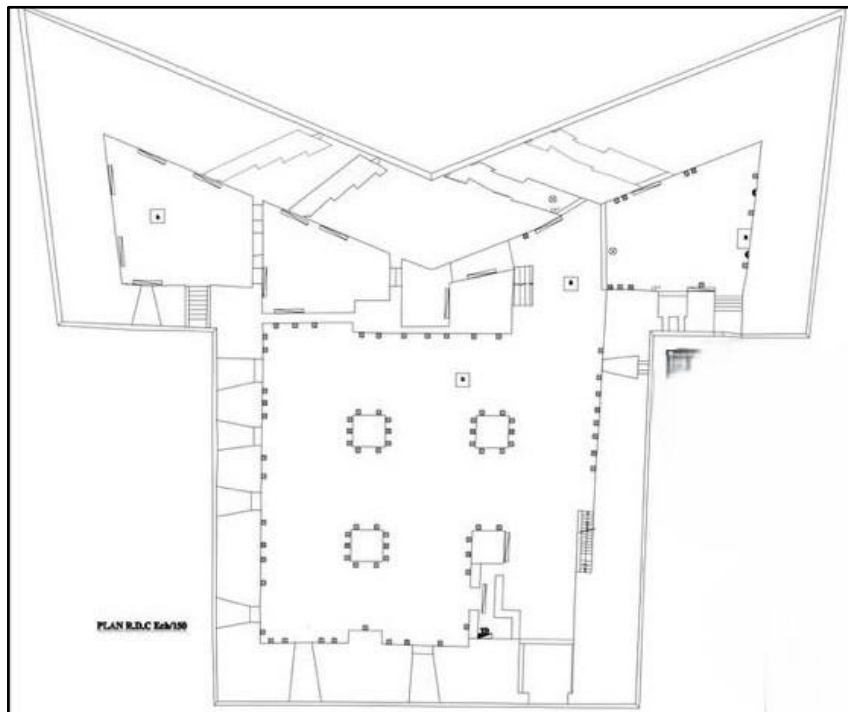
	(Histoire)			Éléments visuels : Objets de la vie quotidienne médiévale (céramiques, armes, bijoux).	Température contrôlée entre 18 et 22°C pour préserver les matériaux organiques (parchemins, textiles).
	Salle d'exposition (Histoire)	01	54m ²	Béjaïa sous domination ottomane (16e-19e siècle). Présentation des fortifications (Bordj Moussa et la casbah) Éléments visuels : Cartes et plans des fortifications. Reconstitution partielle d'un poste militaire ottoman.	Humidité relative constante (entre 45 % et 55 %). Parcours fluide avec une circulation logique pour suivre la chronologie historique ou les thématiques de l'exposition. Largeurs de passage suffisantes pour les groupes et les fauteuils roulants (normes PMR).
	Salle d'exposition (Histoire)	01	27.5 m ²	Impact de la colonisation française sur la ville (urbanisme, culture, économie). Éléments visuels : Photos anciennes et documents d'archives. Plans d'urbanisme montrant les changements architecturaux	Panneaux explicatifs et vitrines positionnés à une hauteur accessible (entre 1,10 m et 1,40 m).
	Salle d'exposition (L'arts)	01	25m ²	Objets artisanaux emblématiques de Béjaïa : poteries, tapis berbères, bijoux traditionnels, outils agricoles artistiquement ornés.	Systèmes de détection incendie adaptés aux musées (sans pulvérisation d'eau sur les objets sensibles).

Exposition : section d'art				Exposition de costumes traditionnels et broderies locales.	Caméras de surveillance discrètes et alarmes anti-effraction. Vitrines sécurisées pour les objets précieux.
	Salle d'exposition (L'arts)	01	28m²	Œuvres de peintres locaux contemporains et modernes inspirés par les paysages et la culture de Béjaïa. Sculptures traditionnelles ou modernes,	
	Salle d'exposition (L'arts)	01	25.5m²	Œuvres d'artistes modernes issus de Béjaïa ou inspirés par la ville.	
	Salles pédagogiques	02	40 m²	Activités scolaires et ateliers pour enfants.	Flexibilité dans l'aménagement pour accueillir différents types d'activités Lumière naturelle diffuse, combinée à un éclairage artificiel réglable selon les activités.
	Salle de peinture	01	45m²	Initiation à la peinture, ou techniques artisanales.	

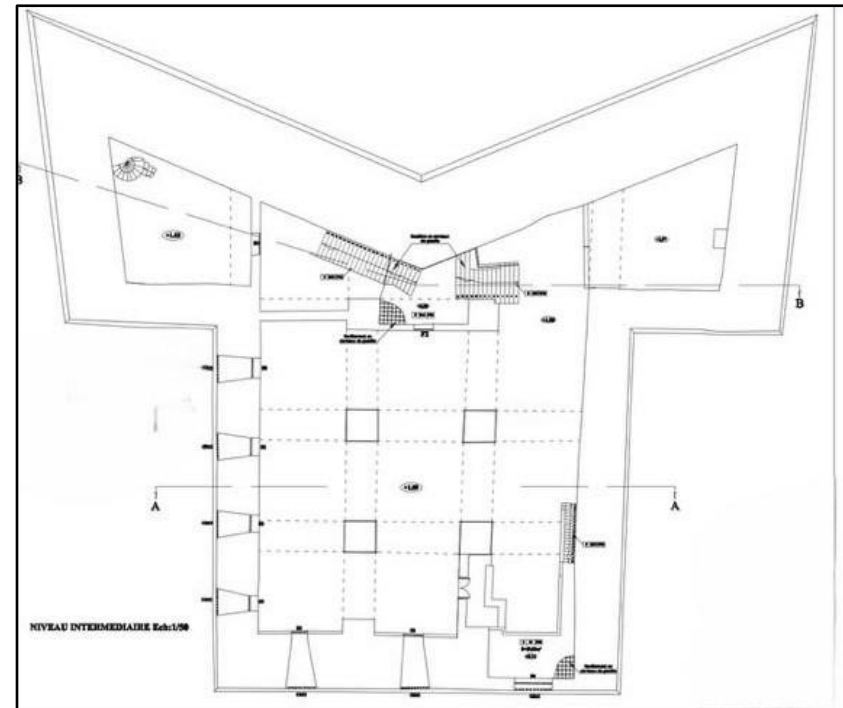
Services éducatifs et de médiation	Salle de sculpture	01	45m ²	Initiation à la sculpture, ou techniques artisanales.	Matériaux absorbants pour limiter les nuisances sonores
	Auditorium	01	82.15 m ²	Espace polyvalent pour conférences, séminaires, spectacles, ou débats.	Tables de travail adaptées aux enfants et adultes pour des activités comme le dessin, la peinture, ou le modelage.
	Bibliothèque	01	53.5m ²	Réservé aux recherches, livres, catalogues et documents historiques.	Écrans interactifs pour des activités pédagogiques numériques.
Service de conservation	Réserves des collections	01	43m ²	Stockage des œuvres non exposées dans des conditions contrôlées (température, humidité).	Cloisonnement pour éviter les contaminations entre différentes catégories d'objets (métal, textile, bois, etc.).
Services administratifs	Bureau de directeur	01	23.7m ²	Bureau du directeur, des conservateurs, et des gestionnaires.	
	Salle de réunion	01	21.3m ²	Planification des expositions et activités.	

	Bureau de gestion des collections	01	25.5m ²	Administration des inventaires, prêt et échange d'œuvres avec d'autres musées	
	Espace pour le personnel	01	22.5m ²	Salle de repos, casiers, toilettes pour le personnel.	

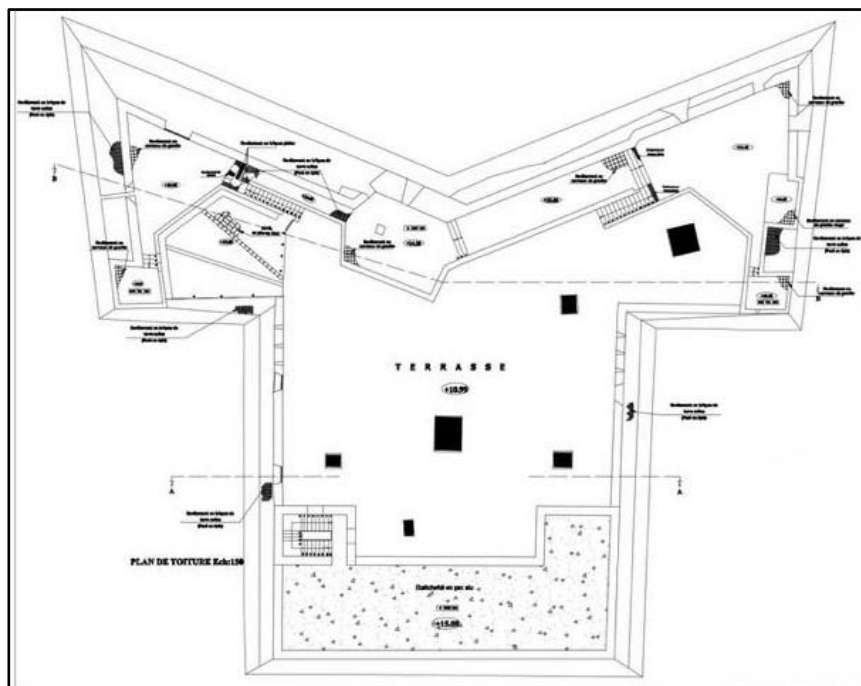
Annexe 02 : plans et façades du musée Bordj moussa réaliser par bureau d'étude Mahindad



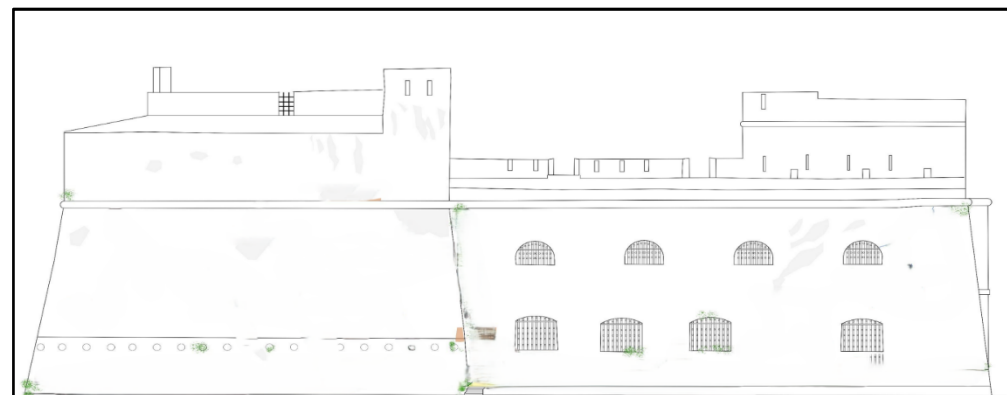
Plan de rez de chaussée



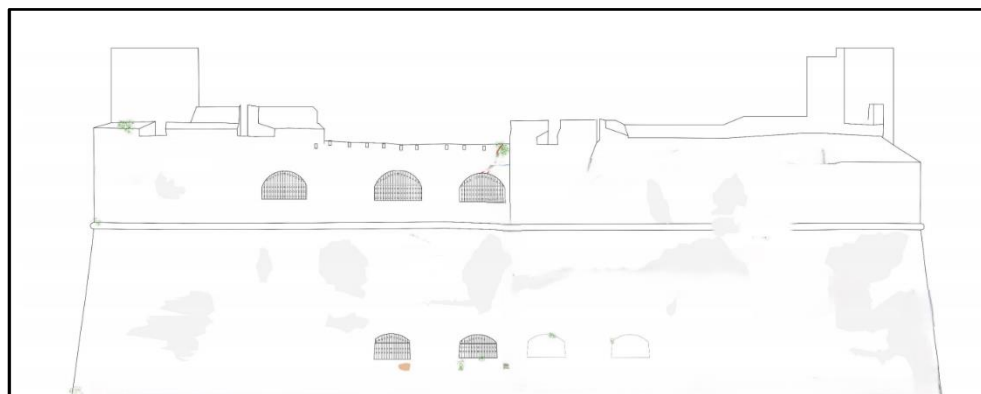
plane intermédiaire



Plan de toiture



Façade ouest



Façade nord