



IMPACT DES FENÊTRES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES SUR LE CONFORT VISUEL DANS LES ESPACES ÉDUCATIFS ARTISTIQUES

Présenté par : HAMITOUCHE Melissa

Sous la direction de : Mr. KHADRAOUI Mohamed Amine

Dr BENALLAOUA Siham	MAA	Président de jury
Dr KHADRAOUI Mohamed Amine	MCA	Rapporteur
Dr BOUCHEFIRAT Nour El Houda	MAA	Examinateur
Mme LABRECHE Samia	MAA	Invité

Date de soutenance : 15 juin 2025

2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث 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 : HAMITOUCHÉ

Prénom : Melissa

Matricule : 202033010725

Spécialité et/ou Option : Architecture

Département : Architecture

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de : Master

Intitulé : L'impact des fenêtres et leurs caractéristiques sur le confort visuel dans les espaces éducatifs artistiques

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

Fait à Béjaïa le
29.10.2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

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

Dédicace

À mes parents, qui m'ont toujours encouragée à aller plus loin et à croire en mes rêves.

À mes sœurs Hanane et Lamia ainsi qu'à son mari Hamza et leur adorable fille Sarah,

À mes frères Oussama, Raouf et sa femme et leur cher fils Assirem pour leur patience, leur bonne humeur et leurs mots d'encouragement.

À toute ma famille, mes grand-mères, mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines pour leur amour inconditionnel et leur soutien sans faille.

À Zahrat, Dhyia, Bilal et Walid, mes amis de cœur, pour leur présence indéfectible, leurs éclats de rire, et tous ces moments partagés qui ont rendu cette aventure plus légère, plus belle, et plus humaine.

À mes amis les plus proches Lili et Merouane ainsi qu'à mes camarades, pour leur présence, leur soutien moral, leurs fous rires et leur partage dans les moments de stress.

À toutes celles et ceux qui m'ont inspirée, accompagnée ou portée sans le savoir dans cette belle aventure.

Remerciement

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, Le Miséricordieux, pour m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant Mr. KHADRAOUI Mohammed Amine pour sa disponibilité, son accompagnement constant, ses conseils avisés et sa bienveillance tout au long de cette recherche. Merci de m'avoir soutenue et guidée avec rigueur et humanité, et de m'avoir permis d'évoluer aussi bien sur le plan académique que personnel.

Mes remerciements s'adressent également à Mme ATTAR Selma, pour ses encouragements ses conseils et ses remarques constructives.

Un grand merci aux responsables et au personnel de la Maison de la culture de Aamriw, pour leur accueil chaleureux et leur précieuse collaboration lors de la phase de l'étude empirique.

Enfin, une pensée infiniment reconnaissante à ma famille, qui m'a portée dans les moments les plus difficiles, qui a cru en moi et m'a toujours soutenue, avec amour et patience.

Résumé :

Ce travail de recherche évalue l'impact des caractéristiques des fenêtres sur le confort visuel dans les espaces éducatifs, à travers une approche croisée mêlant cadre théorique, étude in situ et simulation numérique paramétrique, appliquée à un atelier de dessin à Béjaïa.

La partie théorique définit les principes de la lumière naturelle, le rôle architectural des ouvertures, et les exigences du confort visuel dans les espaces éducatifs. La partie pratique combine une approche empirique constituante des mesures d'éclairage et de luminance et une qualitative à travers des questionnaires, et une approche numérique à travers des simulations paramétriques menées avec Ladybug et Honeybee dans Rhino/Grasshopper.

Les résultats in situ révèlent une mauvaise répartition lumineuse, avec des zones sous-éclairées et des pics de surexposition. Les simulations ont permis d'identifier une configuration optimale associant une orientation est, un ratio d'ouverture de 0.6, et une forme carrée, assurant un éclairage naturel entre 500 et 3500 lux, plus uniforme.

Cette étude souligne l'importance d'une conception intégrée des fenêtres, adaptée aux usages et au climat local, et propose des pistes d'amélioration futures, notamment par l'usage de vitrages spécialisés afin de maximiser l'éclairage naturel tout en limitant les risques d'éblouissement et d'outils d'optimisation paramétrique.

Mots-clés : confort visuel, fenêtres, espaces éducatifs, simulation paramétrique, éclairage, luminance, optimisation.

Abstract :

This research evaluates the impact of window characteristics on visual comfort in educational spaces, through a cross-disciplinary approach combining theoretical framework, in-situ study, and parametric digital simulation, applied to a drawing workshop in Béjaïa.

The theoretical part defines the principles of natural light, the architectural role of openings, and the requirements of visual comfort in educational environments. The practical part combines an empirical approach consisting of illuminance and luminance measurements, a qualitative approach through questionnaires, and a numerical approach through parametric simulations conducted using Ladybug and Honeybee in Rhino/Grasshopper.

The in-situ results reveal a poor distribution of light, with underlit areas and overexposure peaks. Simulations helped identify an optimal configuration with an east-facing orientation, a window-to-wall ratio of 0.6, and a square-shaped space, ensuring natural light levels between 500 and 3500 lux, with greater uniformity.

This study highlights the importance of integrated window design, adapted to usage and local climate, and proposes future improvements through the use of specialized glazing to maximize daylight while minimizing glare, and the use of parametric optimization tools.

Keywords: visual comfort, windows, educational spaces, parametric simulation, illuminance, luminance, optimization.

ملخص :

يقيم هذا البحث تأثير خصائص النوافذ على الراحة البصرية في الفضاءات التعليمية، من خلال مقاربة متكاملة تجمع بين الإطار النظري، والدراسة الميدانية، والمحاكاة الرقمية البارامترية، مع تطبيقها على ورشة رسم في مدينة بجایة.

يعرض الجزء النظري مبادئ الضوء الطبيعي، والدور المعماري للفتحات، ومتطلبات الراحة البصرية في البيئات التعليمية. أما الجزء التطبيقي، فيجمع بين مقاربة كمية تشمل قياسات الإضاءة واللمعان، ومقاربة نوعية عبر استبيانات، بالإضافة إلى مقاربة رقمية تعتمد على محاكاة بارامترية باستخدام إضافتي Honeybee وLadybug على Rhino/Grasshopper.

كشفت القياسات الميدانية عن سوء توزيع الضوء، مع مناطق ضعيفة للإضاءة وقمع إضاءة مفرطة. وقد ساعدت المحاكاة في تحديد التكوين الأمثل : توجيه شرقي، نسبة فتحة 0.6، وشكل مربع للمساحة، مما يضمن إضاءة طبيعية تتراوح بين 3500Lux و500Lux بتوزيع أكثر تجانساً.

تؤكد هذه الدراسة على أهمية تصميم النوافذ بشكل متكامل يتلاءم مع الاستعمالات والظروف المناخية المحلية، وتقترح تحسينات مستقبلية باستخدام زجاجات متخصصة لتعظيم الإضاءة الطبيعية وتقليل التوهج، بالإضافة إلى أدوات تحسين بارامترية.

الكلمات المفتاحية : الراحة البصرية، النوافذ، الفضاءات التعليمية، المحاكاة البارامترية، الإضاءة، اللمعان، التحسين.

Table des matières

Page de garde	
Dédicace	
Remerciements	
Résumé	I
Abstract.....	II
ملخص.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des Figures.....	VIII
Liste des Tableaux.....	XI
Nomenclature.....	XII

CHAPITRE INTRODUCTIF

1.Introduction	1
2.Problématique	3
3.Hypothèses	4
4.Contexte et objectifs de recherche	5
5.Analyse conceptuelle	6
6.Méthodologie de travail	6
7.Structure du mémoire.....	7

PREMIÈRE PARTIE : THEORIQUE

CHAPITRE I : Notions de base sur la lumière naturelle et les fenêtres

Introduction.....	8
I.1 La lumière naturelle :.....	8
I.1.1 Sources de la lumière naturelle :.....	9
I.1.2 Types de ciel :.....	10
I.1.3 Les grandeurs photométriques.....	12
I.1.4 Facteur de lumière du jour (FLJ) :.....	14
I.1.5 La propagation de la lumière naturelle	15
I.1.6 Stratégies de la lumière naturelle :	17
I.1.7 Eclairage naturel :	18
I.1.7.1 Types d'éclairage naturel :	18
I.2 La fenêtre :.....	23
I.2.1 Caractéristiques des fenêtres :	23
I.2.1.1 La forme :	23
I.2.1.2 Orientation :	24

I.2.1.3 Position :	25
I.2.1.4 Ratio :	26
I.2.1.5 Inclinaison :	26
I.2.1.6 Vitrage :	27
Conclusion	30
CHAPITRE II : Le confort visuel dans les espaces éducatifs	
Introduction.....	31
II.1 Confort visuel :	31
II.1.1 Définition :	31
II.1.2 Le système visuel et la lumière :	32
II1.2.1 Le spectre électromagnétique :.....	32
II.1.2.2 L'effet visuel de la lumière :	32
II.1.2.3 La sensibilité spectrale de l'œil :.....	33
II.1.2.4 Le champ visuel :	33
II.1.3 Les paramètres du confort visuel :	34
II.1.4 Autres éléments influençant le confort visuel :	42
II.2. Les espaces éducatifs :	44
II.2.1 Le confort visuel dans les espaces éducatifs :	45
II.2.3 Couleurs des parois recommandées :	46
II.2.2 Taches visuelles :	48
II.2.3 Normes d'éclairage dans les salles de classe :	49
II.2.4 Stratégies de conception de l'éclairage dans les espaces éducatifs dans le climat méditerranéen :.....	51
Conclusion	52

DEUXIÈME PARTIE : PRATIQUE

CHAPITRE III : Etude empirique de l'éclairage naturel

Introduction.....	53
III.1 Présentation de la ville :	53
III.1.1 Contexte climatique :	54
III.2 Présentation du cas d'études :	56

III.2.2 Environnement immédiat :	57
III.2.3 Orientation et ensoleillement :	58
III.2.4 Présentation de l'atelier :.....	59
III.2.4.1 Emplacement, forme et orientation :.....	59
III.2.4.2 Couleurs et textures :	60
III.3 Etude quantitative :	62
III.3.1 Protocoles de mesure :.....	62
III.3.1.1 Protocole de mesure de l'éclairement :	62
III.3.1.2 Protocole de mesure de la luminance :	64
III.3.2 Interprétation des résultats :	65
III.3.2.1 Interprétation des résultats des mesures d'éclairement :.....	65
III.3.2.2 Interprétation des résultats des mesures de luminance :	70
III.4 Évaluation qualitative :	80
III.4.1 Le protocole :	80
III.4.2 Le questionnaire développé :	81
III.4.3 Les participants :	81
III.4.4 Résultats et interprétation :	81
Conclusion	84

CHAPITRE IV : Simulation Paramétrique

Introduction.....	85
IV.1 Simulation paramétrique :.....	85
IV.1.1 Présentation du logiciel de simulation et des plug-ins utilisés :	85
IV.1.2 Processus de validation du modèle numérique :	86
IV.1.3 Résultats et interprétation :.....	88
IV.2 Approche paramétrique et optimisation multicritère :.....	92
IV.2.1 Paramètres de simulation :.....	92
VI.2.1.1 Ratio d'ouvertures des fenêtres de la façade	93
VI.2.1.2 Orientation	93
VI.2.1.3 Types de vitrage :.....	94
VI.2.1.4 Forme de l'espace :.....	94
VI.2.2 Indicateur de la simulation.....	95
VI.3 Résultats de l'étude paramétrique.....	95
VI.3.1 Modèle de la variante ratio de fenêtre/mur (Mr) :	95

VI.3.2 Modèle de la variante orientation (Mo) :.....	96
VI.3.3 Modèle de la variante type de vitrage (Mtv) :	97
VI.3.4 Modèle de la variante forme de l'espace (Mf) :	98
IV.4 Optimisation du modèle :.....	99
VI.4.1 Modèle optimisé 1 (Mo1) :.....	99
VI.4.1 Modèle optimisé 2 (Mo2) :.....	99
Conclusion.....	100
Conclusion générale	102
Recommandations	103
Limites de recherche	104
Perspectives de recherche.....	104
Références bibliographiques	106
Annexe A : Etapes du travail sur le logiciel Aftab Alfa.....	109
Annexe B : Questionnaire	111

Liste de figures

Figure 1 : Analyse conceptuelle (Source : Auteur, 2025).....	6
Figure 2 : Structure du mémoire (Source : Auteur, 2025).....	8
Figure I-1 : le rayonnement électromagnétique.....	10
Figure I-2 : Sources de lumière naturelle (Source : Cogitospc. Sources de lumière. Consulté en 2025, Adapté par auteur, 2025).....	11
Figure I-3 : Différents types de ciel (Source : De Herde & Liebard 2005)).....	12
Figure I-4 : influence du type de ciel sur l'éclairement intérieur (Source : De Herde, 2005)	13
Figure I-5 : Les grandeurs photométriques (Source : http://leclairage.fr/th-photometrie/)....	14
Figure I-6 : Flux lumineux (Source : Grégoire, 2017)	14
Figure I-7 : Intensité lumineuse et l'angle solide	15
Figure I-8 : ECLAIREMENT (Source : Gregoire. 2017).....	15
Figure I-9: Luminance (Source : Gregoire. 2017)	16
Figure I-10 : Les composants du facteur de lumière du jour.....	16
Figure I-11 : Systèmes de propagation de la lumière naturelle	17
Figure I-12 : Les différents modes de réflexion (Source : Liebard & De Herde, 2005).	18
Figure I-13 : Les différents modes de transmission (Source : Liebard & De Herde, 2005)...	18
Figure I -14 : La stratégie de l'éclairage naturel.....	19
Figure I-15 : l'éclairage naturel (Source : Liébard, De Herde,2005).....	21
Figure I-16 : Système d'éclairage unilatéral. (Source : Lechener, 2014)	22
Figure I-17 : Système d'éclairage bilatéral (Source : Lechener, 2014).....	22
Figure I-18 : Système d'éclairage multilatéral. (Source : Liébard, De Herde,2005)	22
Figure I-19 : Eclairage zénithal (Source : Liébard, De Herde, 2005)	23
Figure I-20 : Principaux systèmes d'éclairage zénithal (Source : 01 ; 02 ; 03 ; 04 ; 05, Adaptée par Auteur, 2025).....	24
Figure I-21 : Influence de la forme de l'ouverture sur l'éclairement intérieur (Source : A. Liébard, A. De Herde, 2005).	26
Figure I-22 : Formes des fenêtres	26
Figure I-23 : l'impact de la position de l'ouverture. (Source : A. Liébard, A. De Herde, 2005)	27
Figure I-24 : Illustration de l'influence des ratios d'ouvertures sur l'apport de lumière naturelle dans un espace intérieur (Source : Archzine, « 100 idées pour bénéficier de la lumière naturelle dans la maison », https://archzine.fr/maison/lumiere-naturelle , consulté en 2025.).....	28
Figure I-25 : différentes inclinaisons de fenêtres	29
Figure I-26 : Représentation schématique de l'effet des types de vitrage sur la lumière transmise (Source : N. Pinault, 2009)	30
Figure I-27 : Vitrages réfléchissants (Sources : 01 https://qdyesh.en.made-in-china.com/product/idjfMhwrrYRe/China-High-Quality-3mm-One-Way-Mirror-Door-Window-Glass-One-Way-Gray-Glass.html . ; 02 https://www.fensterblick.de/vsg-glas.html)	31

Figure I-28 : Vitrages teintés (Sources : 01 https://polarteinteppf.ca/vitres-teintees/tout-savoir-vitres-teintees-pour-fenetres-maison/ ; 02 https://www.toutverre.com/27-verre-colore , Adaptée par auteur, 2025, Adaptée par auteur, 2025)	31
Figure II-1 : Schéma simplifié du parcours de la lumière jusqu'aux photorécepteurs de la rétine (Source : Ask A Biologist. (s.d.). Bâtonnets et cônes. Arizona State University. Consulté le 6 avril 2025)	35
Figure II-2 : Courbe d'efficacité lumineuse spectrale	36
Figure II-3 : Le champ visuel (Source : Leclairage.fr, "Vision : applications pratiques", disponible sur https://leclairage.fr/vision-applications-pratiques/ , consulté le 6 avril 2025, Adaptée par auteur, 2025).....	37
Figure II-4 : Paramètres du confort visuel (Source : Liebard & De Herde, 2005).....	38
Figure III-5 Niveaux d'éclairement. (Source : Liebard & De Herde, 2005)	39
Figure II-6 : Influence du rendu de couleur	40
Figure II-7 : Le diagramme de Kruithof.....	41
Figure II-8 : Abscence d'uniformisé de la lumière dans la salle de classe (source : Source : Döllinger Architekten. "Barnim Gymnasium in Bernau bei Berlin". Disponible sur : https://www.doellinger-architekten.de/referenzen/barnim-gymnasium).....	42
Figure II-9 : Eblouissement dans une salle de classe	43
Figure II-10 : Exemple d'ombre gênante (Source : Liebard & De Herde, 2005).....	44
Figure II-11 : Salle de classe avec différentes températures de couleurs.....	45
Figure II-12 : Impact des textures	46
Figure II-13 : Ouvertures latérales et zénithales	47
Figure II-14 : les différentes simulations (Source : I. Vicaningrum & S. Marcillia, 2024 ; Adaptée par : auteur, 2025).....	50
Figure II-15 : Paramètres du confort visuel en fonction de tache visuelles	52
Figure II-16 : Niveau d'éclairement recommandé selon l'activité.....	53
Figure III-1 : Situation de la ville de Béjaïa.....	58
Figure III-2 : Contexte climatique de Béjaïa.....	58
Figure III-3 : Ensoleillement à Béjaïa	59
Figure III-4: Situation De la maison de la culture.....	60
Figure III-5 : Etude de l'environnement immédiat de la maison de la culture	61
Figure III-6 : Ensoleillement de la maison de la culture (source : sunearthtools)	62
Figure III-7 : Emplacement, forme et orientation de l'atelier (Source : Auteur, 2025)	63
Figure III-9 : Couleurs et textures de différents parois et du mobilier de l'atelier	65
Figure III-10 : Luxmètre (Source : Auteur, 2025)	67
Figure III-11 : Plan et coupe de l'atelier avec une grille de 1*1 m (Source Auteur, 2025) ...	67
Figure III-12 : Appareil photo utilisé pour la prise des images	68
Figure III-12 : Appareil photo utilisé pour la prise des images	68
Figure III-13 : Interface du logiciel Aftab Alpha (Source : Auteur, 2025)	69
Figure III-15 : Caractéristique de la fenêtre du l'atelier (Source : Auteur, 2025)	71
Figure III-16 : Visualisation spatiale de l'éclairement naturel à 12h en fausses couleurs.....	72
Figure III-17 : Visualisation spatiale de l'éclairement naturel à 15h en fausses couleurs.....	74

Figure III-18 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prises 1 et 2 (Source : Auteur, 2025).....	75
Figure III-19 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prises 3 et 4 (Source : Auteur, 2025).....	76
Figure III-20 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prises 5 et 6 (Source : Auteur, 2025).....	77
Figure III-21 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prise 7	77
Figure III-22 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prises 1 et 2 (Source : Auteur, 2025).....	78
Figure III-23 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prises 3 et 4 (Source : Auteur, 2025).....	79
Figure III-24 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prises 5 et 6 (Source : Auteur, 2025).....	79
Figure III-25 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prise 7 (Source : Auteur, 2025).....	80
Figure III-26 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prises 1 et 2 (Source : Auteur, 2025).....	81
Figure III-27 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prises 3 et 4 (Source : Auteur, 2025).....	82
Figure III-28 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prises 5 et 6 (Source : Auteur, 2025).....	82
Figure III-29 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prise 7.....	83
Figure III-30 : Schéma radar résumant les résultats des questionnaires	87
Figure IV-1 : (A) Honeybee (B) Ladybug plug-ins pour grasshopper 3D. (Source: https://parametricmonkey.com).....	91
Figure IV-2 : Modélisation en 3d et paramétrage sur Grasshopper	92
Figure IV-3 : Processus du paramétrage du modèle de simulation (Source : Auteur, 2025) .	93
Figure IV-4 : Résultat de simulation d'éclairement à 9h (Source : Auteur, 2025)	94
Figure IV-5 : Résultat de simulation d'éclairement à 12h (Source : Auteur, 2025)	95
Figure IV-6 : Résultat de simulation d'éclairement à 15h (Source : Auteur, 2025)	96
Figure IV-7 : Paramétrage de différents scénarios (Source : Auteur, 2025)	98
Figure IV-8 : Paramétrage des types de vitrage (Source : Auteur, 2025)	99
Figure IV-9 : Résultats des simulations du Mr (Source : Auteur, 2025).....	100
Figure IV-10 : Résultats des simulations du Mo (Source : Auteur, 2025)	101
Figure IV-11 : Résultats des simulations du Mtv (Source : Auteur, 2025)	102
Figure IV-12 : Résultats des simulations du Mf (Source : Auteur, 2025).....	103
Figure IV-13 : Modèle optimisé 1 de forme carrée (Source : Auteur, 2025)	104
Figure IV-14 : Modèle optimisé 2 de forme réctangulaire (Source : Auteur, 2025).....	105
Figure A-1 : Fusion et insertion de l'image HDR (Source : Auteur, 2025)	112
Figure A-2 : Création et enregistrement de la carte de luminance (Source : Auteur, 2025)	113

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Types d'éclairage latéral (Source : Auteur, 2025)	22
Tableau I-2 : Systèmes courants d'éclairage zénithal (Source : Auteur, 2025).....	23
Tableau I- 3 : Impact des orientations des fenêtres sur l'éclairage naturel (source : Auteur 2025)	27
Tableau II-1 : Normes d'éclairage dans les différentes salles de classe (Source : Auteur, 2025)	53
Tableau II-2 : Stratégies de conception de l'éclairage dans les espaces éducatifs dans le climat méditerranéen (Source : A. Yunitsyna & A. Toska, 2023 ; Adapté par : auteur, 2025)	55
Tableau III-1 : Résultats des mesures d'éclairement naturel à 9h	70
Tableau III-2 : Résultats des mesures d'éclairement naturel à 12	72
Tableau III-3 : Résultats des mesures d'éclairement naturel à 15h	73
Tableau III-4 : Répartition du nombre de répondant par modalité de réponse.....	86
Tableau IV-1 : Types de vitrage considérés (Source : Auteur, 2025).....	99

Nomenclature

Abréviation :

UDI : Useful Daylight Illuminance (Éclairement utile de la lumière du jour).

DGP : Daylight Glare Probability (Probabilité d'éblouissement).

DGI : Daylight Glare Index (Indice d'éblouissement).

EPW : EnergyPlus Weather (Fichier météo utilisé pour les simulations).

Tvis : Visible Transmittance (Transmittance lumineuse visible).

LED : Light Emitting Diode.

HDR : High Dynamic Range (Plage dynamique élevée, utilisée en analyse de luminance).

Indices :

E : Eclairement (lx).

FLJ : Facteur de lumière du jour.

θ : Angle solide (sr).

Tvis : Transmittance visible (%).

CHAPITRE INTRODUCTIF

« La lumière naturelle apparaît comme un moyen architectural particulièrement riche. Elle peut révéler un bâtiment par son action sur les espaces, les formes, les structures, les matériaux, les couleurs et les significations de l'édifice. De plus, elle est au cœur même de la définition du geste créateur : exprimer, c'est-à-dire mettre en lumière, extraire de l'ombre. »

A. De Herde & Reiter.S, 2004

1. Introduction :

La lumière est essentielle à notre perception du monde, influençant les couleurs, les textures, les formes et les ambiances. Bien plus qu'un simple phénomène physique, elle impacte notre bien-être et notre rapport à l'espace. Parmi ses différentes formes, la lumière naturelle, issue du soleil, constitue une source d'éclairage puissante, économique et adaptée à nos besoins quotidiens (Brunot, 2019).

Dans la vie quotidienne, elle ne se limite pas à l'éclairage fonctionnel. Elle rythme nos journées, renforce notre connexion avec l'environnement extérieur et joue un rôle fondamental dans notre équilibre biologique et émotionnel. En architecture, son intégration dans les espaces de vie, de travail et d'éducation permet d'optimiser ses bienfaits et d'améliorer la qualité des environnements intérieurs.

Ainsi, la lumière naturelle est une ressource essentielle en architecture. En plus d'être vitale, elle façonne la perception des espaces, influe sur l'ambiance des lieux et favorise le bien-être des occupants. Pourtant, sa gestion complexe pousse souvent les architectes à privilégier l'éclairage artificiel, plus facile à contrôler. Cependant, une utilisation maîtrisée de la lumière naturelle offre un éclairage agréable, efficace et économique, tout en améliorant les qualités architecturales et environnementales des bâtiments (De Herde & Reiter, 2004).

Dans ce contexte, valoriser l'éclairage naturel présente un double avantage. D'une part, il améliore le confort visuel et le bien-être des occupants en réduisant la fatigue oculaire et en créant une ambiance agréable. D'autre part, il favorise l'efficacité énergétique en diminuant la dépendance aux sources artificielles et en réduisant les coûts liés à la consommation d'énergie (Madeleine, 2020).

L'importance de la lumière naturelle se manifeste particulièrement dans le domaine éducatif, où elle joue un rôle déterminant sur la productivité, la concentration et la créativité des élèves. Des études montrent que les salles de classe bien éclairées par la lumière du jour favorisent de meilleures performances scolaires (Marc, 2023). Dans les ateliers de dessin et de sculpture, où la perception des couleurs et des formes est primordiale, un éclairage adéquat devient encore plus crucial (Lamp, 2023). Une exposition suffisante à la lumière du jour réduit la fatigue visuelle et crée un environnement propice à un apprentissage efficace.

Cependant, pour exploiter pleinement ces bénéfices, l'éclairage naturel doit être adapté aux spécificités de chaque espace. Dans les ateliers artistiques, il est essentiel d'assurer une répartition homogène de la lumière afin d'éviter les zones d'ombre qui altèrent la perception

des matériaux. Dans les salles de classe, un éclairage bien dosé stimule l'attention sans provoquer d'éblouissement ni de fatigue oculaire. Une conception architecturale rigoureuse, tenant compte de l'orientation des fenêtres et de la disposition des espaces, permet d'optimiser ces paramètres tout en minimisant les désagréments liés à l'ensoleillement direct (Maesano & Annesi-Maesano, 2016 ; Babaeeaznaveh, 2023).

Les fenêtres jouent alors un rôle central dans cette démarche. Présentes depuis les premières constructions, elles assurent l'apport en lumière naturelle, la ventilation et la connexion avec l'extérieur. Leur conception, qui a évolué au fil du temps, influence non seulement l'esthétique des bâtiments mais aussi leur efficacité énergétique. Dans les espaces éducatifs, elles conditionnent directement la qualité de l'éclairage naturel, avec un impact notable sur l'apprentissage et la productivité des élèves (Moazzeni & Ghiabaklo, 2016). Leur absence peut altérer l'engagement des élèves et nuire à leur concentration (Babaeeaznaveh, 2023). Toutefois, une mauvaise gestion des ouvertures peut entraîner des problèmes d'éblouissement, de surchauffe ou de courants d'air, d'où l'importance d'une conception adaptée (Zomorodian et al., 2016 ; Zomorodian & Tahsil Doostb, 2017).

En somme, pour garantir le confort visuel dans les espaces éducatifs, qu'il s'agisse de salles de classe ou d'ateliers de création, il est essentiel d'intégrer un éclairage naturel adapté, en pensant à une bonne conception des fenêtres et en choisissant leurs caractéristiques les plus performantes. Une gestion réfléchie de cette lumière favorise non seulement la performance académique des étudiants mais également améliore leur confort visuel, en créant un environnement lumineux, harmonieux et propice à l'apprentissage et à la créativité. Cette approche permet de répondre aux besoins fondamentaux des étudiants tout en contribuant à une gestion énergétique efficace et durable.

Ce thème a été choisi car il fait toujours l'objet de recherches, attestant de son actualité et de son importance. Les études récentes soulignent l'impact des fenêtres et de leurs caractéristiques sur le confort visuel dans les espaces éducatifs, en mettant en avant leur rôle dans la concentration, le bien-être et la performance académique. L'optimisation de leur conception reste donc un enjeu majeur pour améliorer la qualité de l'éclairage naturel et l'efficacité énergétique des bâtiments.

2. Problématique :

Les fenêtres jouent un rôle crucial dans l'apport de lumière naturelle. Leur taille, leur orientation et leur emplacement influencent directement la qualité et la quantité de lumière qui pénètre dans les espaces éducatifs. Une mauvaise conception des fenêtres peut entraîner des zones d'ombre et des éblouissements, rendant difficile la lecture des tableaux et des écrans. Cela peut également nuire à la perception des couleurs et des contrastes, ce qui est particulièrement problématique dans les matières nécessitant une observation précise, comme les sciences et les arts.

En effet un bon éclairage naturel, favorisé par des fenêtres bien conçues, réduit la fatigue oculaire et crée une ambiance agréable, ce qui peut améliorer la productivité et l'humeur des occupants. En outre, l'absence de confort visuel peut affecter le bien-être général des étudiants. Un environnement mal éclairé peut sembler oppressant et peu accueillant, ce qui peut réduire la motivation et l'engagement des étudiants. Un bon éclairage, en revanche, peut créer une atmosphère agréable et stimulante, favorisant ainsi un apprentissage plus efficace.

Le confort visuel dans les espaces éducatifs en Algérie, est souvent négligé. Les salles de classe, les ateliers de dessin et de sculpture ne bénéficient pas toujours d'un éclairage naturel adéquat, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur les étudiants et les enseignants.

Cette problématique est particulièrement pertinente dans le contexte des espaces éducatifs en Algérie, notamment à Béjaïa. Dans cette région, les salles de classe, les ateliers de dessin et de sculpture ne bénéficient pas toujours d'un éclairage naturel adéquat, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur les étudiants et les enseignants.

Il est donc essentiel de revoir la conception des espaces éducatifs à Béjaïa, en accordant une attention particulière aux fenêtres, afin de mieux intégrer les principes du confort visuel. Une question clé se pose alors :

- **Quel est l'impact des fenêtres et leurs caractéristiques sur le confort visuel dans les espaces éducatifs ?**
- **Quels sont les caractéristiques optimales des fenêtres qui y garantissent un confort visuel ?**

3. Hypothèses :

Afin d'examiner la relation entre les fenêtres et leurs caractéristiques et le confort visuel dans ces espaces, plusieurs hypothèses peuvent être formulées. Celles-ci portent sur l'influence de la conception et de l'usage des fenêtres sur l'expérience des étudiants et des enseignants, tant en termes d'apprentissage que de confort visuel. Dans cette perspective, l'étude considère les hypothèses suivantes :

- Les fenêtres et leurs caractéristiques sont susceptibles d'avoir un impact direct sur le confort visuel dans les espaces éducatifs artistiques, en influençant la quantité, la qualité et l'uniformité de la lumière naturelle nécessaire aux activités de création.
- Les caractéristiques pouvant optimiser le confort visuel dans les espaces éducatifs pourraient inclure une orientation nord pour un éclairage plus uniforme et une orientation sud accompagnée de protections solaires, des ratios adaptés favorisant un bon équilibre lumineux, ainsi qu'un vitrage à transmission contrôlée afin de limiter les éblouissements.

4. Contexte et objectifs de recherche :

Béjaïa, ville côtière du nord-est de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds, tempérés par la brise marine. Ces conditions climatiques influencent directement l'éclairage naturel des bâtiments, notamment dans les espaces éducatifs, où la gestion de la lumière du jour est essentielle pour garantir à la fois le confort visuel des usagers et l'efficacité énergétique des constructions. Ainsi, l'optimisation des ouvertures et de leurs caractéristiques constitue un enjeu majeur pour adapter ces espaces aux spécificités climatiques locales.

Dans ce contexte, le principal objectif de cette recherche est d'examiner l'impact des fenêtres et de leurs caractéristiques sur la performance et le confort visuels des espaces éducatifs, afin d'optimiser les paramètres de conception en tenant compte des conditions climatiques propres à Béjaïa. En réalisant cette étude, on vise ainsi à :

- Etudier et diagnostiquer l'état des lieux, en ce qui concerne le confort visuel qui dépend de l'éclairage latéral des espaces éducatifs existants.
- Définir les paramètres de conception des fenêtres qui peuvent contribuer à optimiser le confort visuel dans les espaces éducatifs.
- Améliorer et optimiser le confort visuel des espaces éducatifs.
- Minimiser la consommation énergétique.

5. Analyse conceptuelle :

Dans le cadre de cette étude, une analyse conceptuelle a été élaborée afin de clarifier les différents concepts et variables impliqués dans la recherche. L'objectif est de mieux comprendre l'impact des fenêtres et de leurs caractéristiques sur le confort visuel dans les espaces éducatifs. Cette analyse permet de structurer la réflexion autour de deux concepts principaux : **l'éclairage naturel**, considéré comme variable indépendante, et **le confort visuel**, comme variable dépendante. Ces concepts sont ensuite décomposés en dimensions et indicateurs mesurables, tels que la **luminance**, l'**éclairement**, ou encore l'**avis des occupants**, afin de guider les observations et les mesures sur le terrain.

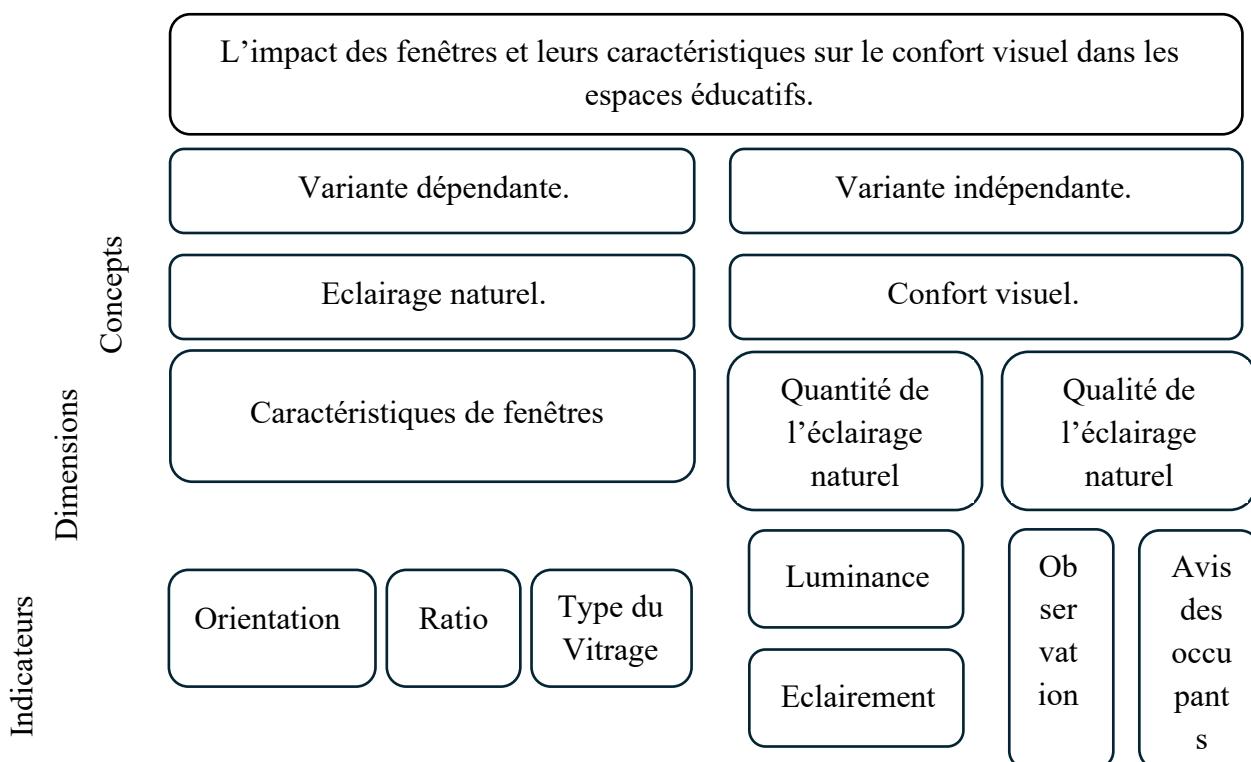


Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle (Source : Auteur, 2025)

6. Méthodologie de travail :

Afin d'aborder la problématique soulevée et tester les hypothèses formulées, cette recherche repose sur plusieurs méthodes d'investigation :

Approche bibliographique : Elle constitue une base pour l'analyse théorique de la lumière naturelle, de la fenêtre, du confort visuel et des espaces éducatifs. Cette partie vise à recueillir les exigences, normes et recommandations en matière d'éclairage naturel pour les espaces éducatifs.

Approche empirique : La deuxième étape de la démarche repose sur une approche à la fois quantitative et qualitative, appliquée in situ à un cas d'étude existant. L'analyse quantitative comprend des mesures d'éclairement effectuées à l'aide de l'instrument professionnel luxmètre afin d'assurer la fiabilité des résultats, ainsi que des mesures de luminance réalisées à partir de photographies prises avec un appareil photo Canon, puis analysées à l'aide du logiciel Aftab Alpha. En complément, une analyse qualitative est menée à travers un questionnaire diffusé auprès des usagers, afin de recueillir leurs perceptions et ressentis concernant le confort visuel dans l'espace étudié.

Approche numérique : Des simulations numériques paramétrique seront réalisées à l'aide du plugin LadyBug & HoneyBee pour le logiciel de modélisation Rhino/Grasshopper afin d'évaluer et d'optimiser les conditions de confort visuel dans ce type d'espaces éducatifs de cette région.

7. Structure du mémoire :

Le mémoire est bien structuré en deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

La partie théorique s'articule autour d'un chapitre introductif, suivi de deux chapitres développant les notions essentielles de l'étude. **Le chapitre introductif** présente la problématique, les hypothèses, le contexte et les objectifs de recherche. Il définit également la méthodologie adoptée et la structure du mémoire. **Le premier chapitre** traite des principes fondamentaux de la lumière naturelle, en abordant ses sources, ses grandeurs photométriques et ses modes de propagation, etc. Il explore également les stratégies d'optimisation et analyse le rôle des fenêtres dans la gestion de la lumière naturelle. Le deuxième chapitre est consacré au confort visuel dans les espaces éducatifs. Il définit le confort visuel et ses paramètres en mettant en avant le système visuel, les critères d'évaluation du confort lumineux, etc. Il examine aussi les exigences spécifiques des espaces éducatifs et les normes d'éclairage adaptées à ce type d'espace.

La partie pratique comprend deux chapitres consacrés à l'étude empirique et à la simulation numérique paramétrique. **Le troisième chapitre** analyse les conditions d'éclairage naturel dans les ateliers de dessin et de sculpture de la Maison de la Culture de Aamriw à Béjaïa. Il commence par la présentation du cas d'étude et des protocoles de mesure, puis examine les niveaux de luminance et d'éclairement relevés avant d'interpréter les résultats en les comparant aux recommandations existantes. En complément de cette analyse

quantitative, une approche qualitative est menée à travers un questionnaire destiné aux usagers des ateliers. Ce questionnaire vise à recueillir des perceptions subjectives sur la qualité de l'éclairage naturel, le confort visuel ressenti et d'éventuelles suggestions d'amélioration. **Le quatrième chapitre** est consacré à la simulation numérique paramétrique de l'éclairage naturel dans la Maison de la Culture de Aamriw à Béjaïa. Il présente le plugin LadyBug & HoneyBee, ses fonctionnalités et son utilisation, puis expose les résultats des simulations, leur interprétation et propose une comparaison avec l'étude empirique afin d'identifier des solutions pour optimiser la lumière naturelle et le confort visuel.

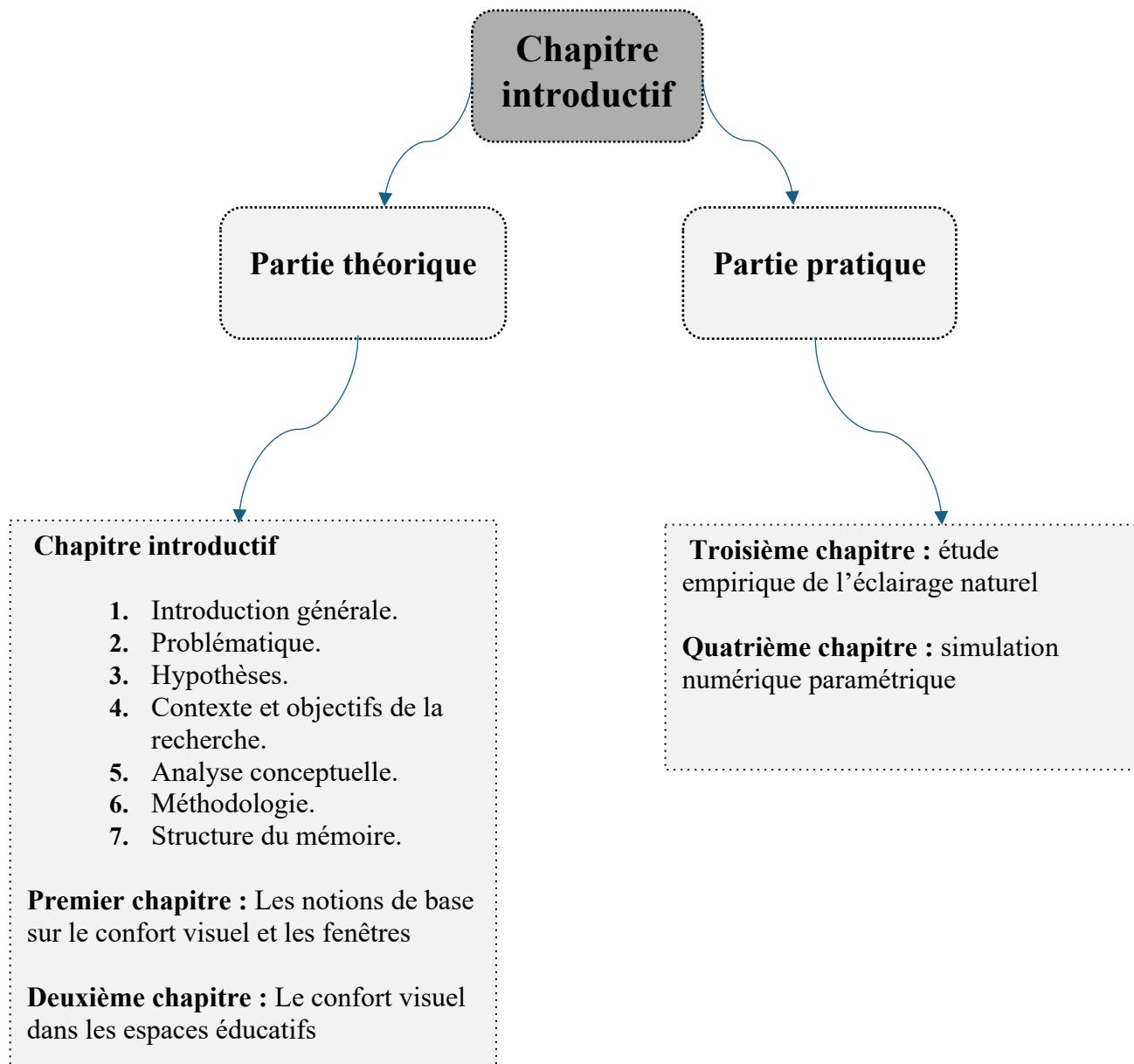


Figure 2 : Structure du mémoire (Source : Auteur, 2025)

CHAPITRE I :

Notions de base sur la lumière naturelle et la fenêtre

Introduction :

La lumière naturelle joue un rôle essentiel dans la conception des espaces architecturaux. Selon Le Lab Promodul (n.d.), elle correspond à la partie visible du rayonnement solaire et résulte de la combinaison de la lumière directe du soleil et de la lumière diffuse générée par l'atmosphère terrestre et les nuages. Bien plus qu'un simple moyen d'éclairer les espaces, Reinhart (2014) souligne qu'elle participe à la création d'environnements visuellement et thermiquement confortables pour les occupants. Une gestion appropriée de la lumière du jour constitue également un atout majeur pour réduire les consommations énergétiques tout en améliorant le bien-être des usagers (Reinhart, 2014).

Cependant, un apport excessif ou insuffisant de lumière peut entraîner des désagréments, tels que l'éblouissement ou un inconfort visuel. Il devient donc crucial de mettre en place des stratégies permettant de contrôler et d'optimiser la lumière naturelle afin de répondre aux besoins des occupants tout en assurant un équilibre harmonieux entre confort et performance.

Par ailleurs, Reinhart (2014) souligne que la perception d'un "bon éclairage" varie selon les individus, influencée par des facteurs culturels et évoluant dans le temps. Cette subjectivité impose aux concepteurs de s'appuyer sur des outils modernes, comme les simulations informatiques et les modélisations à l'échelle humaine, tout en intégrant les retours des utilisateurs pour évaluer la qualité lumineuse des espaces.

Ainsi, cette étude explore la prise en compte de l'éclairage naturel dans la conception architecturale, en mettant l'accent sur son rôle déterminant dans le confort visuel, la satisfaction des usagers et la réduction des besoins énergétiques.

I.1 La lumière naturelle :

La lumière naturelle est la partie visible du rayonnement électromagnétique émis par le soleil (figure I-1). Elle se propage dans le vide sous forme d'ondes rectilignes à très grande vitesse (299 792,458 km/s), et se caractérise par sa longueur d'onde et sa vitesse (BEGA, s. d. ; Dictionnaire Hachette, 2010).

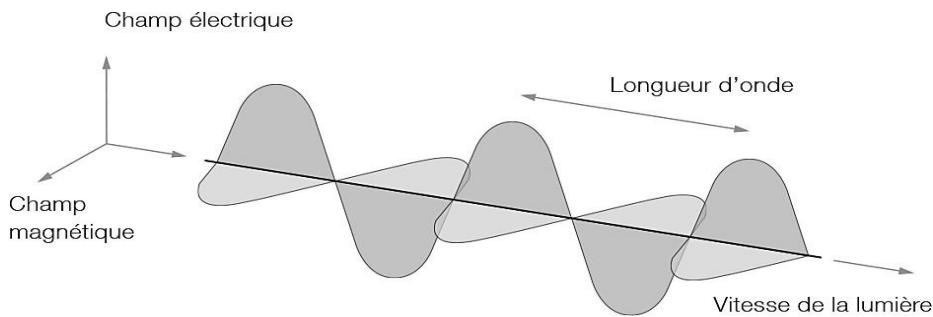


Figure I-1 : le rayonnement électromagnétique
(Source : <https://www.bega.com/fr/>, Sd)

En architecture, elle est bien plus qu'un simple apport lumineux : elle est perçue comme un véritable matériau de conception, capable de structurer l'espace, de révéler les volumes, et de susciter des émotions. Elle participe à la qualité spatiale en donnant une dimension sensible à l'environnement bâti (Gallas, 2013).

I.1.1 Sources de la lumière naturelle :

La lumière naturelle provient principalement du soleil et de la lune (figure I-2). Le soleil est la source primaire, émettant une quantité massive d'énergie, dont une fraction atteint la Terre après avoir traversé l'atmosphère (Biron, 2008). La Lune, quant à elle, agit comme une source

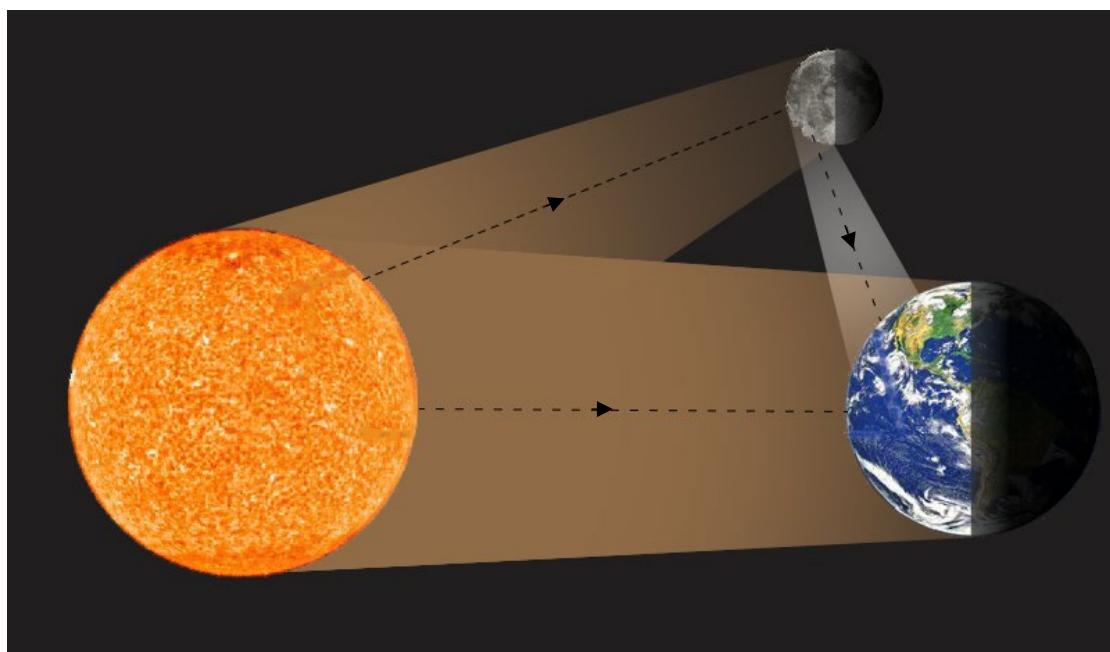


Figure I-2 : Sources de lumière naturelle (Source : Cogitospc. Sources de lumière. Consulté en 2025, https://www.cogitospc.fr/smartphone/cinquieme/des_signaux_pour_observer_et_communiquer/q01_Sources_de_lumiere.html , Adapté par auteur, 2025)

secondaire : elle reflète la lumière solaire contribuant ainsi à l'éclairage nocturne naturel (Quillet, 2005).

➤ **Le soleil, source primaire :**

Le soleil émet une puissance énergétique de 66 millions de W/m². Cependant, en raison de l'absorption et de la diffusion par l'atmosphère terrestre, seule une fraction de cette énergie atteint la surface de la Terre. Cette énergie est essentielle pour la photosynthèse des plantes et influence le climat et les conditions de vie sur Terre. Les variations d'intensité solaire selon l'heure de la journée et la saison ont également un impact sur la quantité de lumière naturelle reçue à la surface (Magali, s.d.).

➤ **La lune, source secondaire :**

Dans la pensée médiévale, reprise notamment par Dante, la Lune est perçue comme une source secondaire de lumière naturelle. Bien qu'elle reçoive sa lumière du Soleil, elle ne se contente pas de la réfléchir passivement. Selon certains savants de l'époque, elle en absorbe une partie, qu'elle conserve et réémet, ce qui lui confère une lumière dite « propre », mais dérivée de l'influence solaire (Quillet, 2005).

I.1.2 Types de ciel :

L'éclairage du ciel correspond à la portion du rayonnement solaire absorbée puis réémise par l'atmosphère. La lumière naturelle dépend de la position du soleil dans le ciel, influencée par l'heure, la latitude, mais aussi par divers facteurs tels que les conditions climatiques (couverture nuageuse), la pollution, le relief et l'orientation des surfaces. Pour mieux appréhender cette variabilité, des ciels standards (figure I-3) ont été établis afin de faciliter l'étude de l'éclairage naturel, chacun étant défini par la répartition de sa luminance sur la voûte céleste (Roditi, 2011).

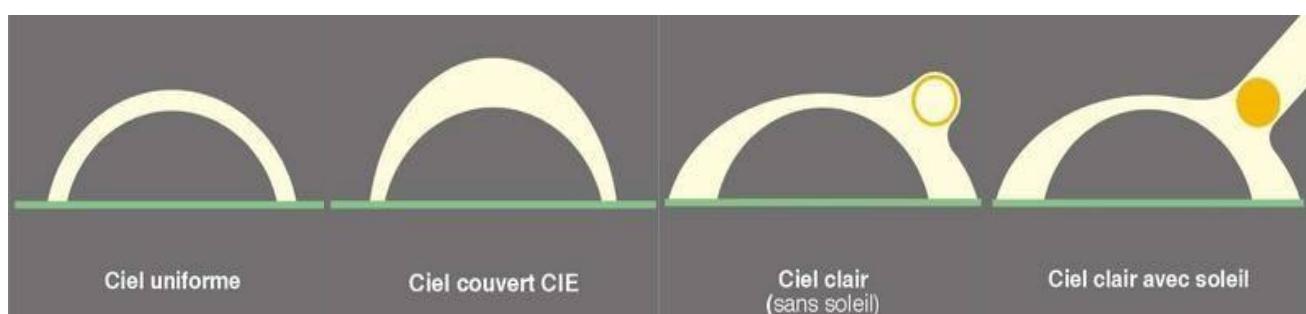


Figure I-3 : Différents types de ciel (Source : De Herde & Liebard 2005)

La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a défini **quatre types de ciels** standards (figure I-1) : le ciel couvert uniforme, où la lumière est homogène et sans directionnalité, typique des journées nuageuses ; le ciel couvert standard, présentant une luminance variable en fonction de la hauteur angulaire, observée lors de journées partiellement nuageuses ; le ciel clair sans soleil, caractérisé par une lumière diffuse sans rayonnement direct, propre aux journées sans nuages mais sans présence directe du soleil ; et enfin, le ciel clair avec soleil, combinant lumière directe et diffuse, créant des contrastes lumineux marqués, typiques des journées ensoleillées.

Ces variations influencent la quantité et la qualité de la lumière naturelle (figure I-4) pénétrant dans les espaces intérieurs (Reiter & De Herde, 2004).

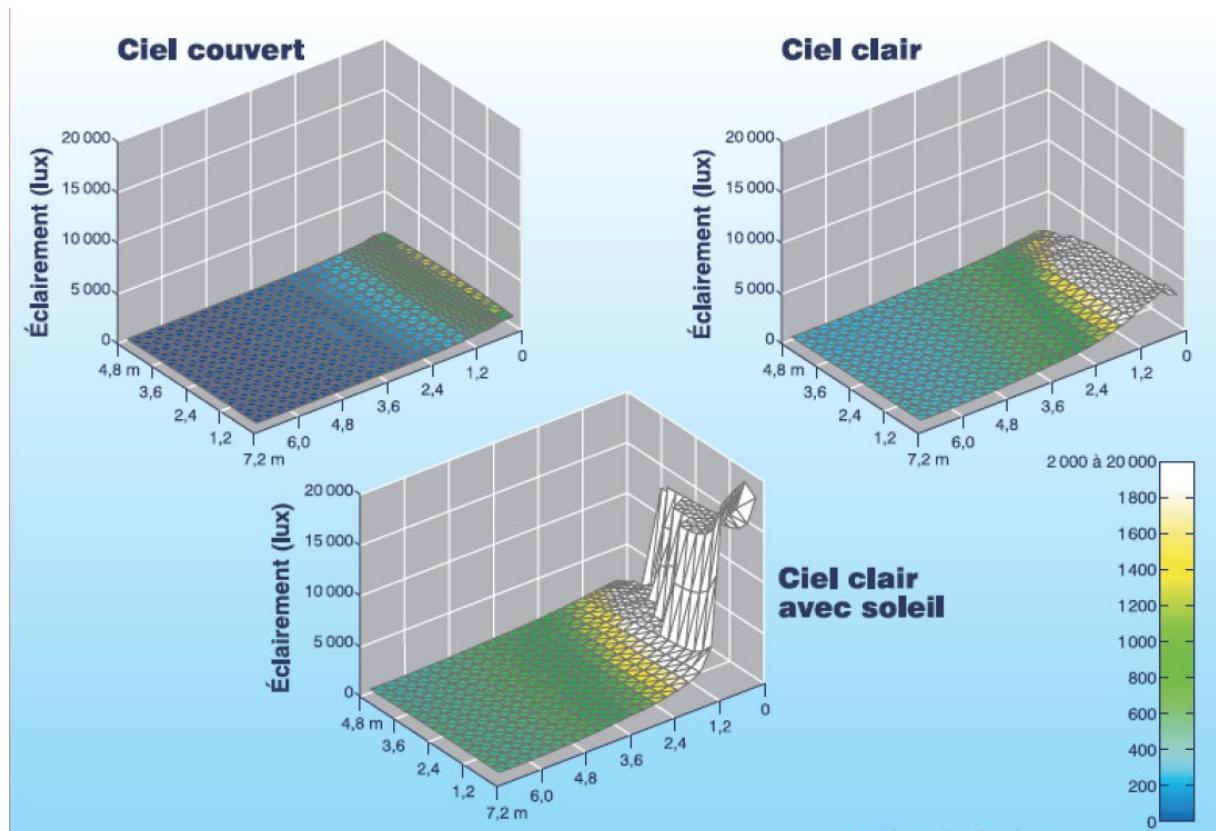


Figure I-4 : influence du type de ciel sur l'éclairement intérieur (Source : De Herde, 2005)

La figure illustre l'impact du type de ciel sur l'éclairement intérieur. Un ciel dégagé génère un éclairement direct et intense, créant des contrastes marqués, tandis qu'un ciel nuageux diffuse la lumière de manière uniforme mais de faible intensité, produisant une ambiance plus douce et homogène. Cette variation influence le confort visuel et les besoins en éclairage naturel dans les espaces intérieurs.

I.1.3 Les grandeurs photométriques

Les grandeurs photométriques sont des mesures utilisées pour quantifier la lumière en fonction de sa perception par l'œil humain (figure I-5). Elles sont essentielles pour évaluer l'éclairage naturel dans les bâtiments et garantir le confort visuel des occupants (Gregoire, 2017).

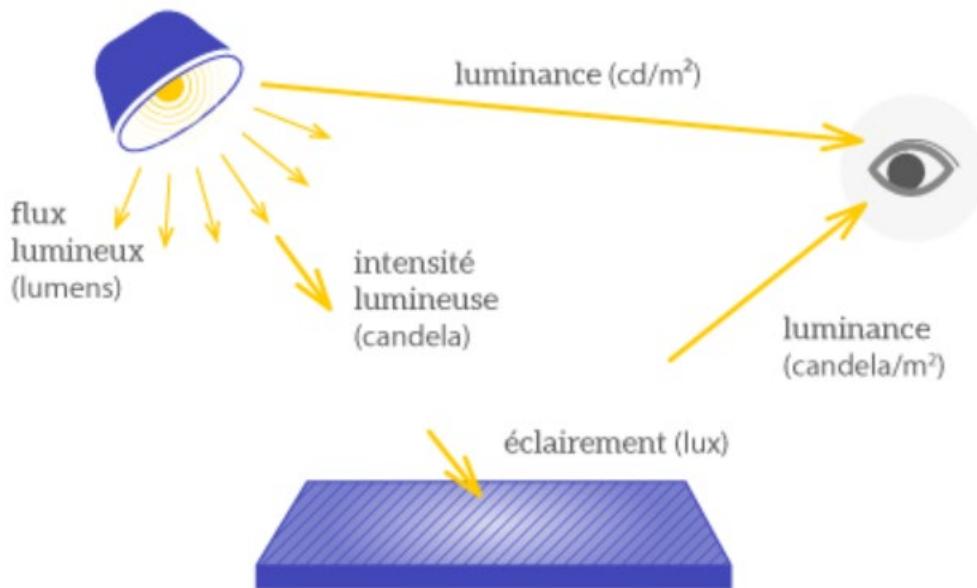


Figure I-5 : Les grandeurs photométriques (Source : <http://leclairage.fr/th-photometrie/>).

Cette figure présente les principales grandeurs photométriques : le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairement et la luminance. Elles permettent de caractériser la lumière émise, reçue ou perçue dans un espace.

➤ Flux lumineux (Φ)

Le **flux lumineux (Φ)** schématisé dans (la figure I-6) est la quantité totale de lumière émise par une source. Il est exprimé en **lumens (lm)** et est calculé par l'intégrale de l'intensité spectrale de la source multipliée par la sensibilité visuelle de l'œil humain sur toutes les longueurs d'onde :

$$\Phi = I \times \Delta\Omega \text{ (lm)}$$

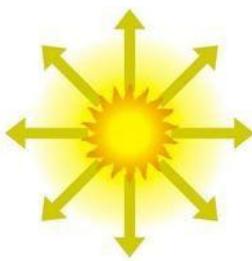


Figure I-6 : Flux lumineux (Source : Grégoire, 2017)

- **I** est l'intensité spectrale de la source.
- **$\Delta\Omega$** est l'angle solide et représente la portion de l'espace angulaire couverte par la source lumineuse et s'exprime en stéradians (sr). (CIE, 2004).

➤ **Intensité lumineuse (I) :**

L'**intensité lumineuse (I)** mesure la quantité de lumière émise dans une direction donnée (figure I-7). Elle est exprimée en **candéla (cd)** et est calculée comme suit :

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \text{ (cd)}$$

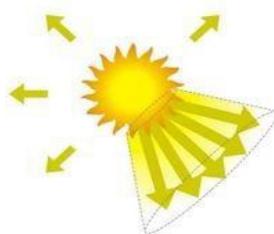


Figure I-7 : Intensité lumineuse et l'angle solide
(Source : Gregoire, 2017)

- **Ω** est l'angle solide en **stéradians (sr)** (Reiter & De Herde, 2003).

➤ **Éclairement (E) :**

L'**éclairement (E)** mesure la densité du flux lumineux sur une surface (figure I-8). Il est exprimé en **lux (lx)** et est calculé en fonction de l'intensité lumineuse et de la distance entre la source et la surface éclairée :



Figure I-8 : Eclairement (Source : Gregoire. 2017)

$$E = \frac{\Phi}{A} \text{ (lux)}$$

- **A** est la distance entre la source et la surface éclairée (Gallas, 2013).

➤ **Luminance (L) :**

La **luminance (L)** présenté par la (figure I-9) mesure l'intensité lumineuse perçue par l'œil humain à partir d'une surface donnée (Guémené, 2016). Elle est exprimée en **candelas par mètre carré (cd/m²)** et est calculée ainsi :

$$L = \frac{I}{S} \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

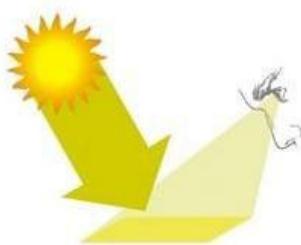


Figure I-9: Luminance (Source : Gregoire. 2017)

- **S** est la surface apparente de la source.
- **I** est l'intensité lumineuse en candelas

I.1.4 Facteur de lumière du jour (FLJ) :

Le **facteur de lumière du jour (FLJ)** est un indicateur de la performance de l'éclairage naturel dans un espace (figure I-10). Il est calculé en divisant l'éclairement mesuré à l'intérieur par l'éclairement mesuré à l'extérieur sous un ciel couvert, puis en multipliant par 100 pour obtenir un pourcentage :

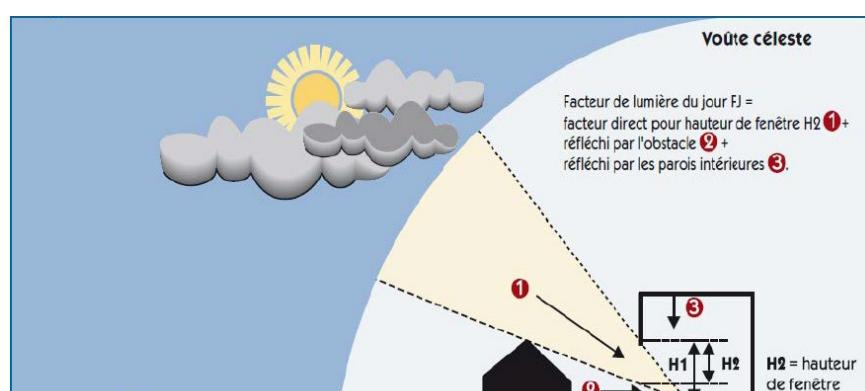


Figure I-10 : Les composants du facteur de lumière du jour
(Source : INRS4, 2012)

$$FLJ = \frac{E \text{ int}}{E \text{ ext}} \times 100\%$$

- ***E int*** est l'éclairement mesuré à l'intérieur du bâtiment.
- ***E ext*** est l'éclairement mesuré à l'extérieur sous un ciel couvert (Guide Bâtiment Durable, 2019).

I.1.5 La propagation de la lumière naturelle

La lumière naturelle se déplace en ligne droite tant qu'elle traverse un milieu homogène, c'est-à-dire un espace dont les propriétés restent constantes partout. Dès que le milieu change ou qu'un obstacle apparaît, cette trajectoire peut être modifiée (Reiter & De Herde, 2005).

À l'échelle architecturale, sa vitesse est si élevée qu'on peut la considérer comme instantanée. Lorsqu'elle entre en contact avec une paroi, la lumière peut être absorbée, réfléchie ou transmise selon la nature du matériau (figure I-11). Ces phénomènes sont décrits par trois coefficients : l'absorptivité, la reflectivité et la transmissivité, qui indiquent chacun la proportion du flux lumineux concerné (Zemmour Malika, 2018).

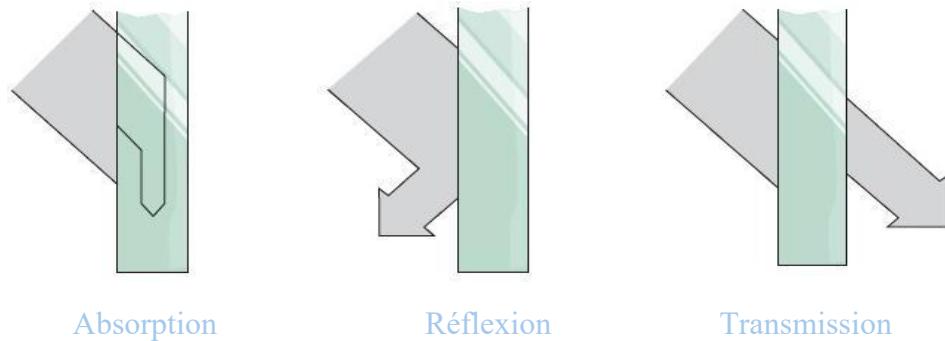


Figure I-11 : Systèmes de propagation de la lumière naturelle
(Source : Liebard & De Herde, 2005).

Ces interactions jouent un rôle essentiel dans la manière dont la lumière pénètre et se répartit à l'intérieur des bâtiments (Gallas, 2013).

➤ Absorption :

L'absorption se produit lorsque la lumière est absorbée par un matériau, convertissant l'énergie lumineuse en chaleur. Le degré d'absorption dépend des propriétés optiques du matériau et de la longueur d'onde de la lumière (Liebard & De Herde, 2005).

➤ Réflexion :

La réflexion (figure I-12) est le phénomène par lequel la lumière rebondit sur une surface (De Herde & Liebard, 2005).

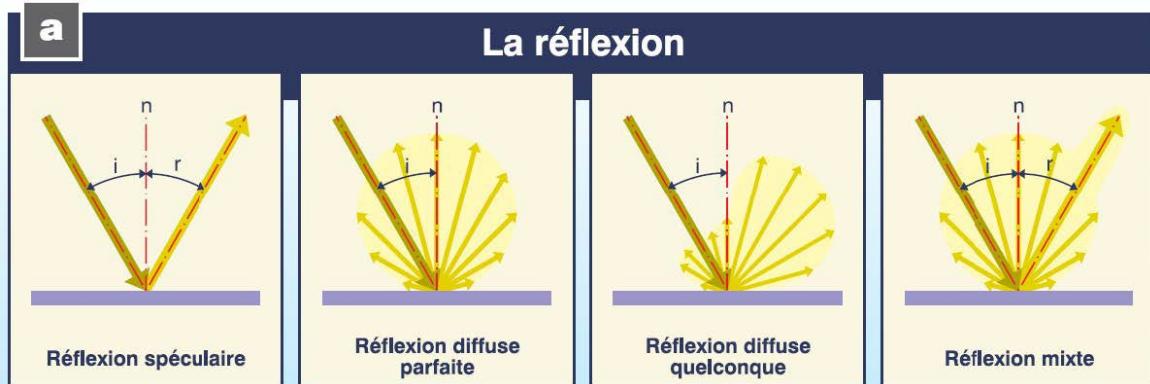


Figure I-12 : Les différents modes de réflexion (Source : Liebard & De Herde, 2005).

- **Spéculaire** : réflexion directe, comme sur un miroir.
- **Diffuse** : dispersion uniforme de la lumière, comme sur une surface mate.
- **Mixte** : combinaison des deux phénomènes, typique des surfaces semi-réfléchissantes.

La nature de la réflexion influence la distribution de la lumière dans un espace (Reiter & De Herde, 2003).

➤ Transmission :

La transmission est le passage de la lumière à travers un matériau. Selon la (figure I-13), elle peut être :

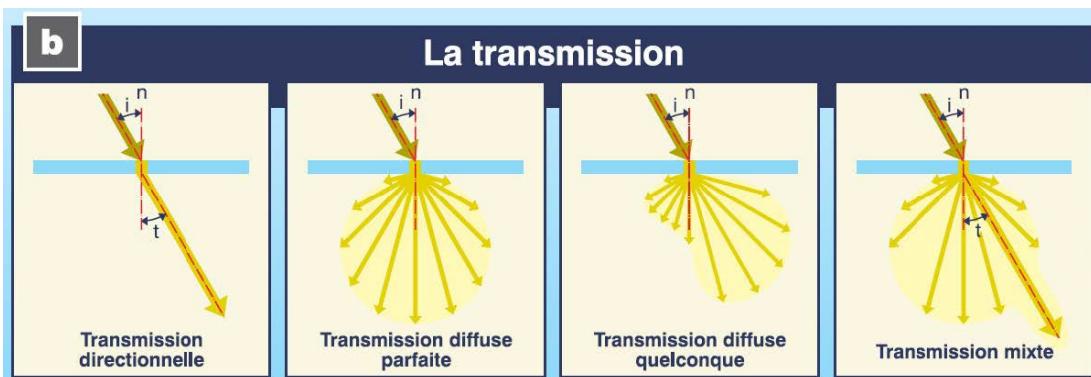


Figure I-13 : Les différents modes de transmission (Source : Liebard & De Herde, 2005).

- **Directe** : passage de la lumière sans modification de sa direction.
- **Diffuse** : dispersion de la lumière dans plusieurs directions.

- **Mixte** : combinaison des deux, typique des matériaux translucides.

La transmission affecte la quantité de lumière naturelle pénétrant dans un espace et la qualité de cette lumière (Guémené, 2016).

I.1.6 Stratégies de la lumière naturelle :

L’élaboration d’une stratégie d’éclairage naturel repose sur trois sources principales de lumière du jour qui pénètrent dans un espace :

- La lumière directe provenant du ciel, captée à travers les ouvertures vitrées.
- La lumière réfléchie sur les surfaces extérieures environnantes.
- La lumière renvoyée par les surfaces intérieures de l’espace.

Pour concevoir une stratégie efficace, il est crucial de maximiser l’apport de lumière naturelle tout en se protégeant des rayons solaires excessifs ou gênants. Ensuite, il convient d’assurer une bonne transmission et répartition de cette lumière à l’intérieur, tout en contrôlant son intensité afin de prévenir les désagréments liés à l’éblouissement (Daich, 2019).

Globalement, une stratégie d’éclairage naturel (figure I-14) a deux objectifs principaux : Garantir le confort visuel des occupants et réduire la dépendance à l’éclairage artificiel, et par conséquent, la consommation d’énergie.

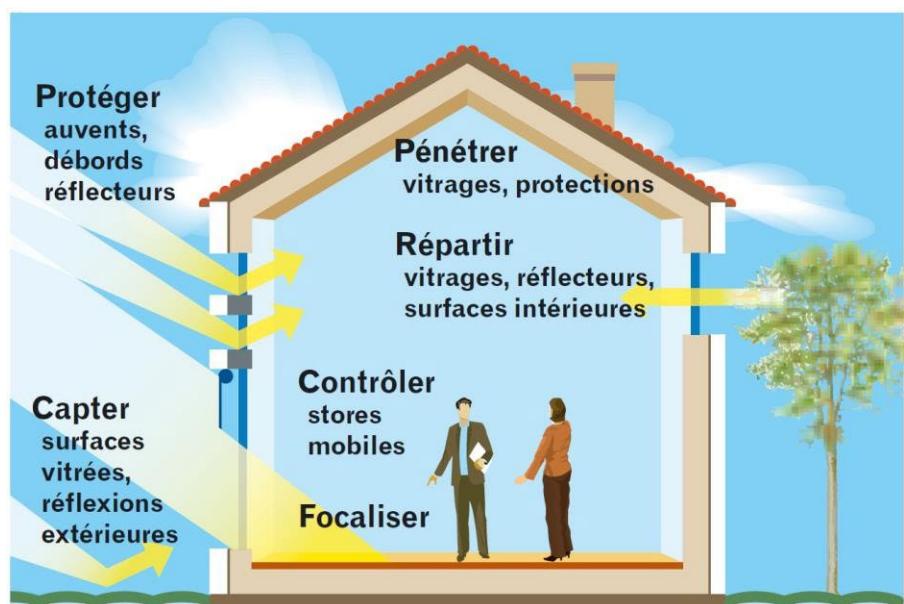


Figure I -14 : La stratégie de l’éclairage naturel
(Source : Liébard et De Herde, 2005, infographie Fabrice Mathé)

D’après De Herde & Liebard, (2005) L’exploitation de la lumière naturelle repose sur plusieurs stratégies fondamentales ; il s’agit d’abord de **capter** la lumière, en jouant sur

l'orientation et le positionnement des ouvertures (fenêtres, puits de lumière), ainsi que sur la nature des vitrages et les surfaces environnantes, afin d'optimiser l'entrée de lumière tout en réduisant les apports solaires excessifs (Magali, 2007).

Ensuite, il convient de **répartir** cette lumière à l'intérieur, en tenant compte des propriétés du vitrage, des caractéristiques des surfaces intérieures (comme la couleur et la texture) et de l'utilisation de dispositifs spécifiques, tels que les réflecteurs ou certains éléments pouvant modifier le parcours lumineux (De Herde & Liebard, 2005).

Il est également essentiel de **protéger et contrôler** l'apport lumineux, en limitant l'éblouissement et la surchauffe. Cela passe par l'usage de protections fixes ou mobiles (auvents, brise-soleils orientables, stores...) qui permettent de filtrer la lumière directe tout en laissant passer la lumière diffuse (Biron, 2008).

Enfin, on peut **focaliser et mettre en valeur** la lumière, qu'elle soit zénithale ou latérale, afin de souligner certains éléments architecturaux et de structurer la perception de l'espace (De Herde & Liebard, 2005).

I.1.7 Eclairage naturel :

Selon V. Tourre (2007), l'éclairage naturel correspond à l'entrée de la lumière du jour dans un espace construit. Il résulte de sa transmission à travers l'enveloppe extérieure du bâtiment, puis de sa diffusion à l'intérieur grâce à la réflexion sur les matériaux qui composent cet espace.

I.1.7.1 Types d'éclairage naturel :

L'éclairage naturel se décline selon la position des ouvertures et les dispositifs utilisés :

➤ Éclairage latéral :

L'éclairage latéral est assuré par des fenêtres et baies vitrées, permettant une lumière diffuse en journée (figure I-15).

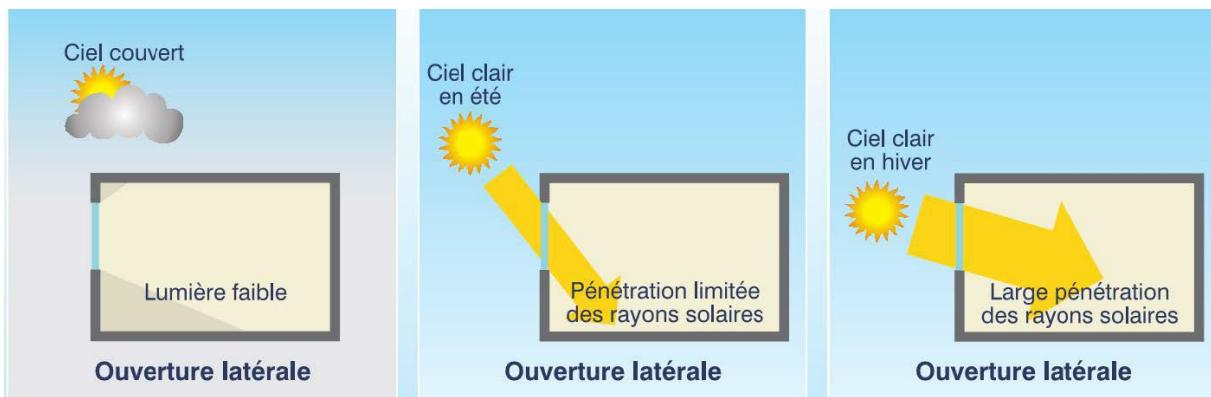


Figure I-15 : l'éclairage naturel (Source : Liébard, De Herde, 2005)

Ce type d'éclairage est particulièrement adapté aux espaces tels que les bureaux ou les salons, où une lumière uniforme est souhaitée. L'utilisation de vitrages à contrôle solaire peut également aider à réguler l'apport en lumière et en chaleur (Gallas, 2013).

❖ **Types d'éclairage latéral :**

Le tableau ci-dessous présente les différents types d'éclairage latéral, en mettant en évidence la description de chacun ainsi qu'une illustration :

Tableau I-1 : Types d'éclairage latéral (Source : Auteur, 2025).

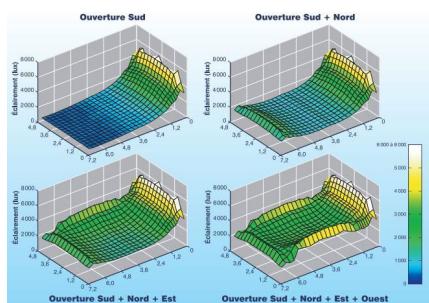
Type d'éclairage	Description	Illustration
Éclairage unilatéral	<p>La lumière pénètre par une ou plusieurs ouvertures situées sur une seule paroi verticale. Ce type présente des limites : il peut ne pas satisfaire les besoins en lumière naturelle et risque de générer de l'éblouissement (Lechener N., 2014).</p>	
Éclairage bilatéral	<p>Des ouvertures sont placées sur deux parois opposées, permettant une distribution plus uniforme de la lumière et une réduction des contrastes et de l'éblouissement. Ce système est idéal pour les espaces de travail (Lechener N., 2014).</p>	
Éclairage multilatéral	<p>La pièce est éclairée naturellement par des ouvertures situées sur plusieurs parois avec des orientations différentes. Il est souvent utilisé dans les bâtiments profonds et dans les espaces nécessitant un éclairage très homogène (Lechener N., 2014).</p>	

Figure I-16 : Système d'éclairage unilatéral. (Source : N. Lechener, 2014)

Figure I-17 : Système d'éclairage bilatéral (Source : N. Lechener, 2014)

Figure I-18 : Système d'éclairage multilatéral. (Source : A. Liébard, A. De Herde, 2005)

➤ I.7. Éclairage zénithal :

L'éclairage zénithal, provenant du haut, est une source naturelle d'énergie assurée par une ouverture plus ou moins large en toiture (figure I-19). En s'ouvrant largement sur la voûte céleste, il favorise la pénétration des rayonnements diffus. Ce type d'éclairage permet une distribution uniforme de la lumière naturelle, assurant ainsi une meilleure répartition lumineuse dans l'espace intérieur (Bernard Paule, Marc Fontoynon, 2018).

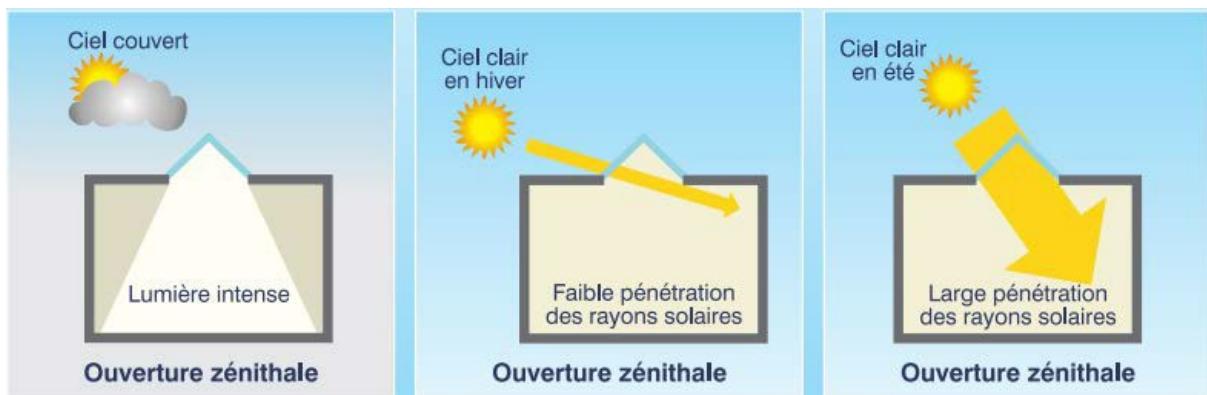


Figure I-19 : Eclairage zénithal (Source : Liébard, De Herde, 2005)

❖ Les systèmes courants d'éclairage zénithal :

Le tableau ci-dessous présente les différents systèmes courants d'éclairage zénithal, en mettant en évidence la description de chacun :

Tableau 2 : Systèmes courants d'éclairage zénithal (Source : Auteur, 2025)

Type de système	Description
Sheds (toitures en dents de scie)	Composés de surfaces vitrées inclinées pour capter les rayons du soleil et de surfaces opaques pour les diffuser. Offrent un éclairage homogène mais provoquent une répartition inégale de la lumière selon l'orientation (Lechener.N, 2014).
Tabatières (skylights)	Ouvertures horizontales suivant la pente du toit. Très performantes, elles apportent 3 à 5 fois plus de lumière qu'une fenêtre verticale (Lechener.N, 2014).
Lanterneaux	Parties de toiture surélevées munies de matériaux transparents, laissant entrer la lumière des deux côtés de la baie, ce qui permet une répartition symétrique de la lumière (Lechener.N, 2014).

Verrières	Fréquemment utilisées dans les halls ou grands espaces, elles sont souvent vitrées horizontalement ou en pente. Elles offrent un apport lumineux important mais nécessitent une implantation maîtrisée pour éviter les sur-éclairages (C. Terrier et B. Vandevyver, 1999).
Dômes	Économiques et efficaces pour atteindre un bon facteur de lumière du jour, mais peuvent provoquer de l'éblouissement. Nécessitent des protections solaires et une inclinaison adaptée (< 30° au-dessus de l'horizontale) (C. Terrier et B. Vandevyver, 1999).
Puits de lumière	Utilisés pour les zones centrales dépourvues d'ouverture sur l'extérieur. Captent la lumière en toiture pour éclairer les étages inférieurs (B. Lafitte, s.d)

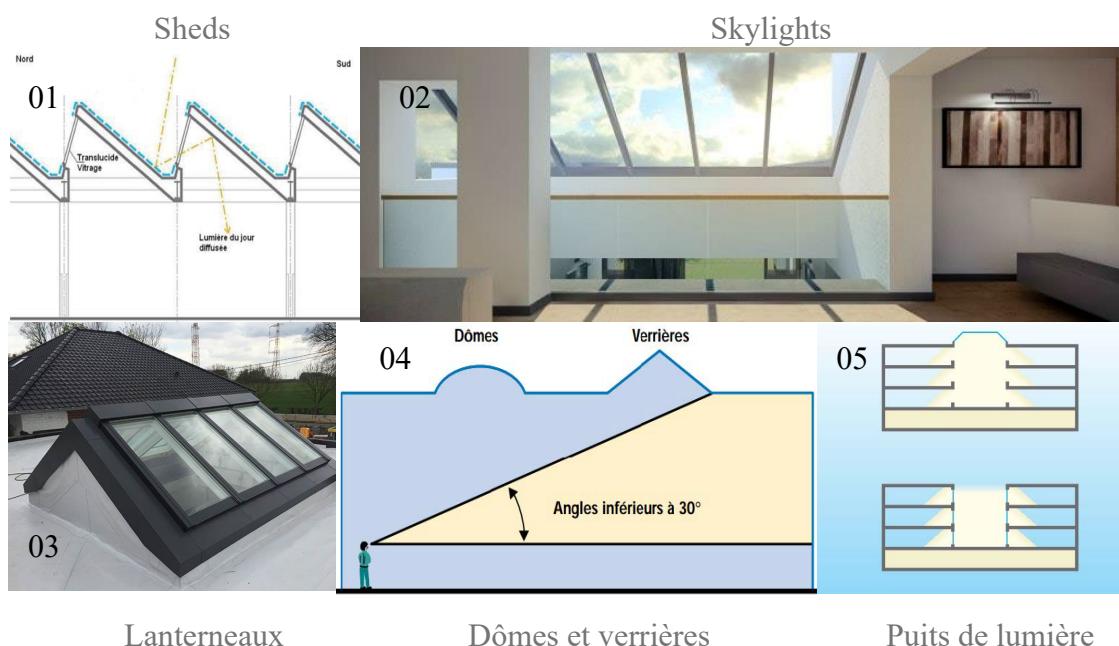


Figure I-20 : Principaux systèmes d'éclairage zénithal (Source : 01 ; 02 ; 03 ; 04 ; 05, Adaptée par Auteur, 2025)

Où les sources sont comme suit :

01 : www.archimedia.com,2021

02 : www.quelleenergie.fr,2021

03 : : <https://www.efc-bernard.be/fr/desenfumage.php>

04 : C. Terrier et B. Vandevyver, s.d

05 : A. Liébard, A. De Herde,2005

I.2 La fenêtre :

Sadineni et al., (2011) confirment que la fenêtre désigne les ouvertures dans l'enveloppe d'un bâtiment, permettant à la fois d'apporter éclairage naturel confortable durant la journée et ventilation, tout en offrant une connexion visuelle avec l'extérieur, ainsi qu'à son rôle crucial dans l'expression architecturale. Selon Benradouane & Benyoucef (2008), elle est l'un des éléments les plus complexes et coûteux d'un bâtiment bioclimatique en raison des fonctions contradictoires qu'elle doit assumer : lumière et obscurité, ouverture et intimité, protection solaire et ventilation.

Pour optimiser ses performances, plusieurs paramètres doivent être pris en compte, tels que la forme, les dimensions, l'orientation, le type de vitrage, et le pourcentage du ciel visible, influençant la lumière naturelle, la consommation d'énergie et le confort thermique (Elghamry & Hassan, 2020 ; Brown & DeKay, 2000).

I.2.1 Caractéristiques des fenêtres :

Selon Elghamry et Hassan (2020), les caractéristiques, dimensions, orientation et emplacement des fenêtres sur la façade sont des facteurs clés impactant à la fois les performances des fenêtres et leur contribution à l'amélioration de la performance environnementale interne de l'architecture, ainsi qu'à la gestion de la consommation énergétique du bâtiment.

I.2.1.1 La forme :

Comme la représente la (figure I-21), la forme de la fenêtre a un impact limité sur la quantité de lumière et d'énergie solaire pénétrant dans un espace, mais elle influence la manière dont ces éléments sont répartis à l'intérieur (Labreche, 2014).

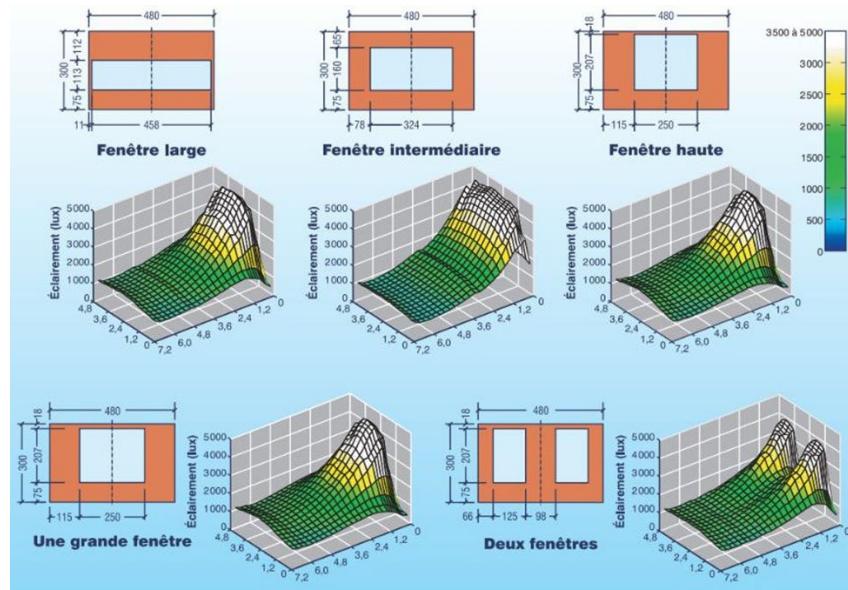


Figure I-21 : Influence de la forme de l'ouverture sur l'éclairement intérieur
(Source : Liébard, De Herde, 2005).

Parmi les formes les plus courantes (figure I-22), on trouve les fenêtres carrées ou rectangulaires, suivies des fenêtres cintrées, arrondies, ou en œil-de-bœuf. Moins fréquentes, les fenêtres triangulaires, en arc surbaissé, trapézoïdales ou ovales sont souvent utilisées dans des contextes spécifiques comme les toitures (Chakali, 2019).

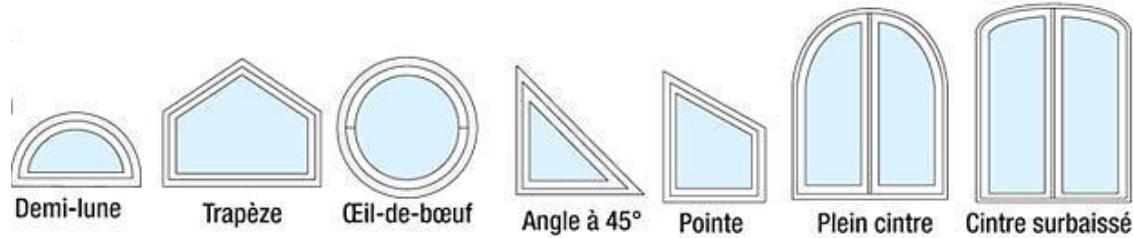


Figure I-22 : Formes des fenêtres
(Source : <https://www.systemed.fr>, consulté en 2025)

Les différentes formes de fenêtres influencent surtout la répartition de la lumière dans l'espace. Si les formes carrées et rectangulaires sont les plus courantes, d'autres, comme les cintrées, trapézoïdales ou en œil-de-bœuf, sont choisies pour des raisons esthétiques ou adaptées à des contextes spécifiques.

I.2.1.2 Orientation :

L'orientation des fenêtres est un facteur clé dans leur conception, influençant directement la quantité d'énergie solaire et de lumière naturelle reçue (tableau I-3), en fonction de l'emplacement géographique du bâtiment (Bouchahm & Bourebia, 2010).

Tableau I- 3 : Impact des orientations des fenêtres sur l'éclairage naturel (source : Auteur 2025)

Orientation	Impact
Nord	Les fenêtres orientées vers le nord captent une lumière constante tout au long de l'année, grâce au rayonnement solaire diffus.
Est et Ouest	En hiver, ces orientations captent moins de lumière, mais en été, elles reçoivent plus de lumière que celles orientées vers le sud.
Sud	Les fenêtres orientées au sud bénéficient d'un rayonnement solaire maximal en hiver et en mi-saison, tout en offrant une meilleure protection contre l'excès de soleil.

Selon S. Reiter et A. De Herde, ce choix doit également tenir compte de l'organisation des espaces intérieurs, du type d'activité, des moments d'occupation des pièces tout au long de la journée, ainsi que du mouvement du soleil.

I.2.1.3 Position :

La position de l'ouverture sur la façade influence la pénétration de la lumière naturelle dans une pièce. À cet égard, trois fenêtres similaires, mais placées à des endroits différents, ont été comparées (figure I-23).

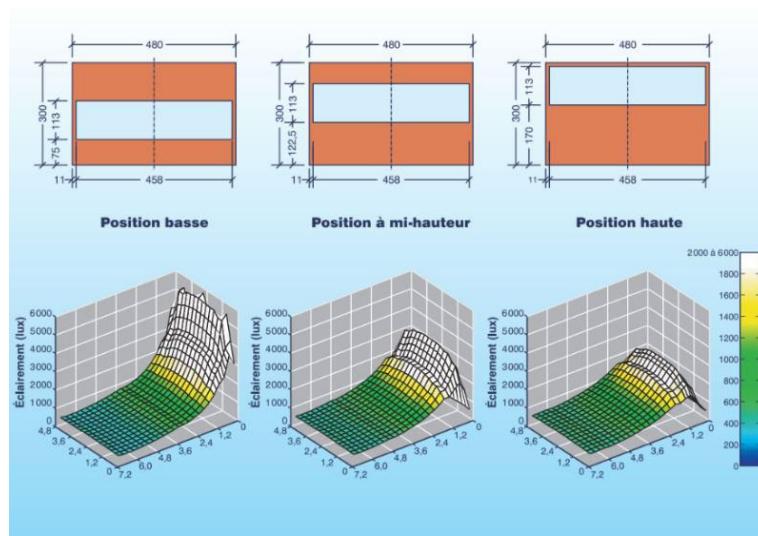


Figure I-23 : l'impact de la position de l'ouverture.
(Source : Liébard, De Herde, 2005)

Pour une surface vitrée identique, l'éclairement varie selon la position de la fenêtre ; ainsi, plus une fenêtre est placée en hauteur, mieux le fond de la pièce est éclairé (A. Liébard, A. De Herde, 2005).

I.2.1.4 Ratio :

Les dimensions des fenêtres jouent un rôle déterminant dans la quantité de lumière naturelle qui pénètre dans un espace, ce qui influence directement les besoins en éclairage artificiel du bâtiment (K. Lakhdari, 2021). En outre, le choix du type de fenêtre, de sa taille et du matériau du châssis affecte également l'entrée de lumière. En effet, les châssis limitent la surface vitrée et absorbent une partie de la lumière incidente (voir figure I-24).



Figure I-24 : Illustration de l'influence des ratios d'ouvertures sur l'apport de lumière naturelle dans un espace intérieur (Source : Archzine, « 100 idées pour bénéficier de la lumière naturelle dans la maison », <https://archzine.fr/maison/lumiere-naturelle>, consulté en 2025.)

Bien que les fenêtres fixes soient généralement préférées pour maximiser les apports en lumière naturelle, l'installation de fenêtres ouvrantes peut être nécessaire pour assurer une ventilation adéquate de l'espace (Liébard, De Herde, 2005).

I.2.1.5 Inclinaison :

Concernant l'inclinaison des ouvertures (figure I-25), on distingue deux types : latérales et zénithales. Chacune de ces formes réagit différemment au rayonnement solaire. Pour capter au mieux le rayonnement solaire, l'ouverture doit être perpendiculaire aux rayons du soleil. Une ouverture horizontale permet de couvrir une plus grande portion du ciel qu'une fenêtre verticale, offrant ainsi une plus grande quantité de lumière naturelle diffuse. De plus, une fenêtre inclinée vers le ciel capte davantage de lumière diffuse qu'une fenêtre verticale (Daich, 2011).

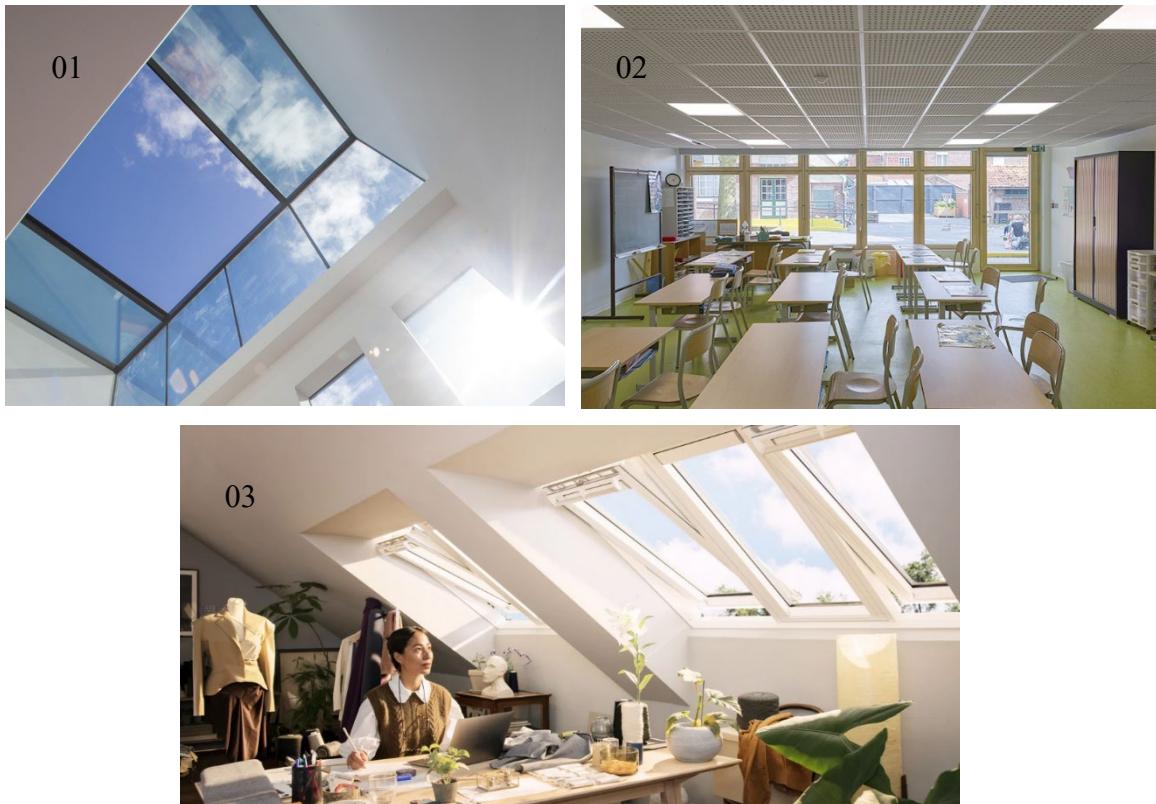


Figure I-25 : différentes inclinaisons de fenêtres

(Sources : 01 <https://specificationonline.co.uk/articles/2019-06-13/cantifix/cantifix-launch-new-rooflight-range-that-will-feature-in-london-landmark.> ; 02 <https://delsinnearchitecte.fr/projets/cole-passive-jacques-prevert-bailleul/>. ; 03 [https://www.maison-travaux.fr/renovation-par-piece/favoriser-lentree-de-la-lumiere-naturelle-dans-votre-interieur-474456.html.\)](https://www.maison-travaux.fr/renovation-par-piece/favoriser-lentree-de-la-lumiere-naturelle-dans-votre-interieur-474456.html.)

I.2.1.6 Vitrage :

Le vitrage influence de manière significative la qualité de la lumière naturelle dans un espace, ainsi que le confort visuel des usagers. Plusieurs études soulignent que ses propriétés optiques – en particulier la transmittance visible – jouent un rôle crucial dans la gestion de l'éclairage naturel, notamment lorsqu'il s'agit de limiter l'éblouissement et d'optimiser les apports lumineux (Lee et al., 2013 ; Hee et al., 2015).

Selon Alhagla et al. (2019), le type de vitrage est un paramètre déterminant pour préserver le confort visuel tout en limitant les gains thermiques et en réduisant la consommation d'énergie. On distingue principalement (voir figure I-26) deux grandes catégories de vitrages à haute performance (Carmody, 2005).

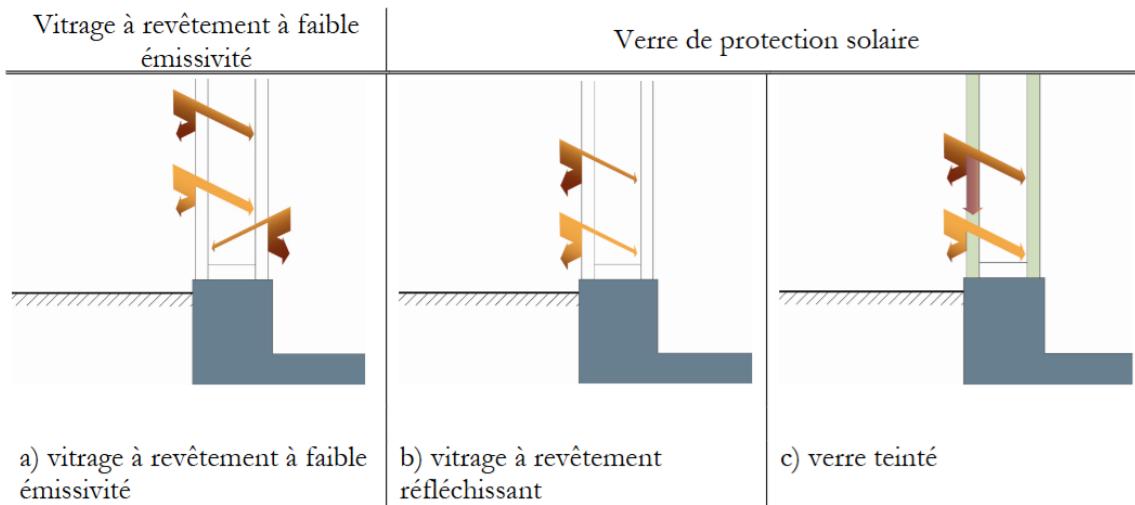


Figure I-26 : Représentation schématique de l'effet des types de vitrage sur la lumière transmise (Source : Pinault, 2009)

- **Vitrages à faible émissivité (low-e) :** Sont conçus pour réduire les pertes thermiques en réfléchissant le rayonnement infrarouge vers l'intérieur du bâtiment. Ces vitrages sont particulièrement bénéfiques dans les climats froids, car ils contribuent à l'efficacité énergétique en maintenant la chaleur à l'intérieur. Cependant, leur impact sur l'éclairage naturel reste limité, car ils n'affectent que marginalement la quantité de lumière visible transmise (Carmody, 2003).
- **Les verres de protection solaire :** comprennent plusieurs types, chacun ayant des effets distincts sur la gestion de la lumière naturelle et du confort visuel.
 - ✓ **Les verres réfléchissants :** (figure I-27), Sont conçus pour réduire l'éblouissement en réfléchissant une portion du rayonnement solaire. Bien qu'ils diminuent l'intensité lumineuse à l'intérieur du bâtiment, leur surface réfléchissante peut provoquer des reflets gênants à l'extérieur, ce qui peut nuire à l'esthétique et à l'intégration du bâtiment dans son environnement (Carmody, 2003).



Figure I-27 : Vitrages réfléchissants (Sources : 01 <https://qdyesh.en.made-in-china.com/product/idjfMhwrrYRe/China-High-Quality-3mm-One-Way-Mirror-Door-Window-Glass-One-Way-Gray-Glass.html>; 02 <https://www.fensterblick.de/vsg-glas.html>)

- ✓ **Les verres teintés :** (figure I-28) Quant à eux, absorbent une plus grande quantité de lumière, ce qui réduit la transmission totale de la lumière naturelle c'est-à-dire améliorer le confort visuel en réduisant l'éblouissement. En fonction de la teinte choisie (gris, bronze, bleu-vert), ces verres modifient non seulement la quantité de lumière transmise, mais peuvent également altérer la perception des couleurs à travers le vitrage (Lam, 1992).



Figure I-28 : Vitrages teintés (Sources : 01 <https://polarteinteppf.ca/vitres-teintees/tout-savoir-vitres-teintees-pour-fenetres-maison/>; 02 <https://www.toutverre.com/27-verre-colore>, Adaptée par auteur, 2025)

Certaines configurations de vitrage combinées à des dispositifs architecturaux peuvent améliorer la qualité de l'éclairage naturel. Par exemple, Labib et Mayhoub (2015) ont démontré que l'association d'un vitrage clair avec une étagère lumineuse permet d'augmenter l'uniformité de la lumière du jour tout en réduisant les effets d'éblouissement et de surchauffe.

Conclusion :

Ce premier chapitre a permis d'établir les fondements théoriques indispensables à la compréhension de la lumière naturelle et de son interaction avec l'architecture. En explorant la nature de la lumière, ses caractéristiques physiques, ainsi que les paramètres photométriques essentiels, on a pu cerner l'importance de cette ressource inépuisable dans la conception architecturale. L'étude des mécanismes visuels, à travers la perception de la lumière par l'œil humain, a également mis en évidence le lien entre lumière et confort visuel.

Enfin, l'analyse des ouvertures (les fenêtres) en tant que dispositifs de captation et de diffusion de la lumière naturelle a souligné leur rôle déterminant dans la qualité des ambiances lumineuses. Ces notions serviront de socle à la réflexion qui sera menée dans le chapitre suivant, axée sur le confort visuel dans les espaces éducatifs, avec une attention particulière portée aux besoins des usagers et aux critères de qualité lumineuse.

CHAPITRE II :

Le confort visuel dans les espaces éducatifs

Introduction

Le confort visuel dans les espaces éducatifs est un élément essentiel pour garantir des conditions optimales d'apprentissage. Selon Benharkat (2006), un environnement visuel confortable, favorable à l'exécution des tâches visuelles, repose sur plusieurs critères essentiels. Toutefois, il peut être difficile de satisfaire toutes ces exigences simultanément, nécessitant parfois une hiérarchisation en fonction des tâches visuelles spécifiques à accomplir dans chaque espace.

Dans les salles de classe, les tâches visuelles principales – la lecture, l'écriture et les activités artistiques – requièrent principalement un éclairage suffisant, uniforme, sans éblouissement, et un bon rendu des couleurs (Benharkat, 2006). Hiderit Moreno (2011), indique qu'un bon confort visuel est atteint lorsque les objets, comme le tableau ou les supports d'apprentissage, sont visibles sans provoquer de fatigue oculaire. De plus, la nature des tâches visuelles dans les salles de classe, qui impliquent des alternances fréquentes entre vision rapprochée et éloignée, nécessite un éclairage adapté pour éviter la fatigue et favoriser un confort visuel optimal.

Ainsi, ce chapitre s'intéresse à l'importance de l'éclairage dans les espaces scolaires et à la manière dont il peut être optimisé pour soutenir à la fois les tâches d'apprentissage et la santé des usagers, tout en respectant les normes d'éclairage recommandées pour différents types de tâches.

II.1 Confort visuel :

II.1.1 Définition :

Le confort visuel, défini comme une perception subjective de la qualité de l'environnement lumineux (Kaba, 2012), repose sur un équilibre entre la quantité, la répartition et la qualité de la lumière. Il permet d'effectuer une tâche visuelle sans gêne ni fatigue (Bodart, 2008 ; Mudri, 2002). Ce confort est garanti lorsqu'il est possible de percevoir clairement les objets, sans fatigue, dans un environnement agréable et équilibré, tout en recevant efficacement les informations visuelles. Il dépend de ses trois critères principaux, qui sont liés à cinq paramètres physiques fondamentaux (Kay & Afacan, 2017) : l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux. Ces éléments influencent non seulement la

clarté et la visibilité des objets, mais également le bien-être des occupants, en réduisant la fatigue et le stress causés par un éclairage inadapté (Bodart, 2002 ; Roulet, 2004).

II.1.2 Le système visuel et la lumière :

II1.2.1 Le spectre électromagnétique :

La partie visible du spectre électromagnétique correspond à une plage de longueurs d'onde comprise entre 380 et 770 nm. Les ondes dont les longueurs se situent en dehors de cette plage ne stimulent pas les récepteurs de l'œil humain (Guide CEATI, 2014).

II.1.2.2 L'effet visuel de la lumière :

La lumière peut être définie comme une énergie rayonnante perceptible par l'œil humain (Paule, 2007). Lorsque le rayonnement visible atteint l'œil, il est absorbé par deux types de récepteurs situés dans la rétine (figure II-1) :

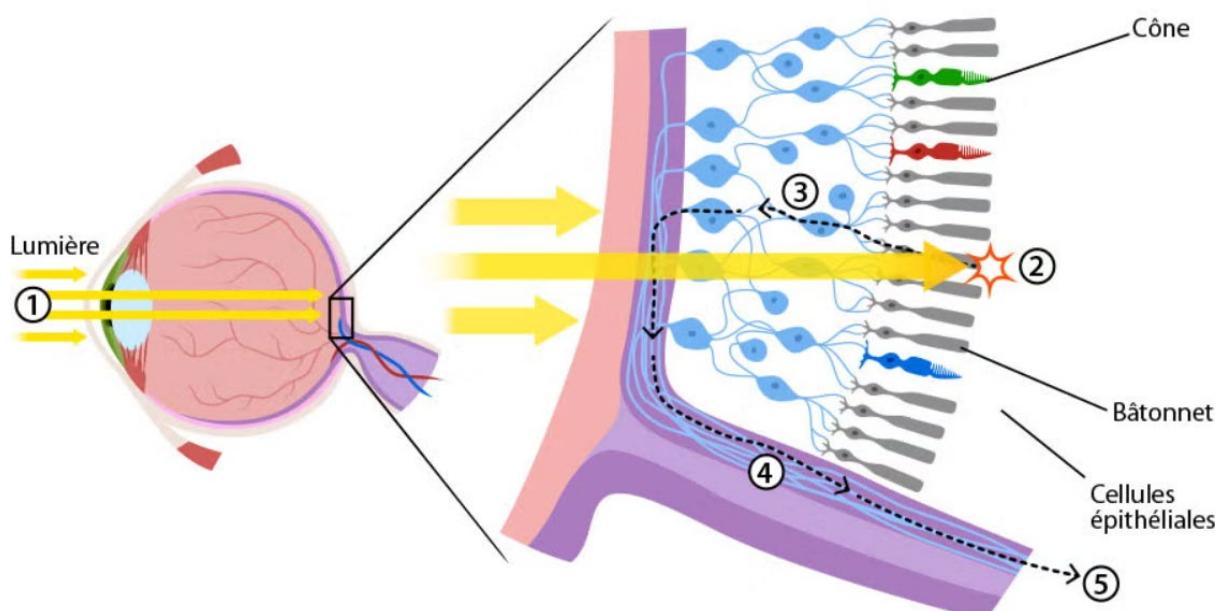


Figure II-1 : Schéma simplifié du parcours de la lumière jusqu'aux photorécepteurs de la rétine (Source : Ask A Biologist. (s.d.). Bâtonnets et cônes. Arizona State University. Consulté le 6 avril 2025)

- Les cônes, qui assurent la vision photopique (vision diurne). On distingue trois types de cônes, chacun étant sensible à une plage spécifique de longueurs d'onde correspondant aux couleurs rouge, vert et bleu (Guide CEATI, 2014).
- Les bâtonnets, responsables de la vision scotopique (vision en faible luminosité). Contrairement aux cônes, ils ne permettent pas de distinguer les couleurs (Paule, 2007).

Ces récepteurs transforment l'énergie lumineuse en impulsions électriques, qui sont ensuite transmises au cerveau via les nerfs optiques, où la sensation de lumière est créée (Guide CEATI, 2014 ; Paule, 2007).

II.1.2.3 La sensibilité spectrale de l'œil :

Le Guide CEATI (2014) indique que l'œil humain est sensible aux rayonnements lumineux compris entre 380 et 800 nanomètres, ce qui influence la manière dont nous percevons les couleurs et l'intensité lumineuse.

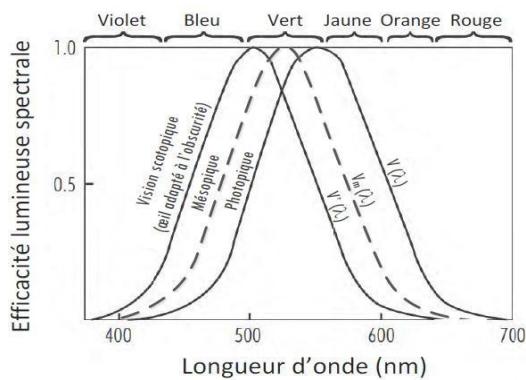


Figure II-2 : Courbe d'efficacité lumineuse spectrale
(Source : Guide CEATI, 2014)

Illustré de la (figure II-2), deux types de courbes traduisent cette sensibilité : la courbe photopique, qui correspond à la vision de jour et atteint son pic à 555 nm dans la zone jaune-vert, et la courbe scotopique, propre à la vision nocturne, dont la sensibilité maximale se situe autour de 507 nm, dans le bleu-vert.

II.1.2.4 Le champ visuel :

Le champ visuel correspond à l'ensemble de l'espace qu'une personne peut percevoir lorsqu'elle fixe un point immobile. Il représente la zone visible depuis une position oculaire donnée, et cette perception varie selon l'emplacement du point dans ce champ (Faure, 2006). Chez chaque individu, les dimensions du champ visuel varient légèrement :

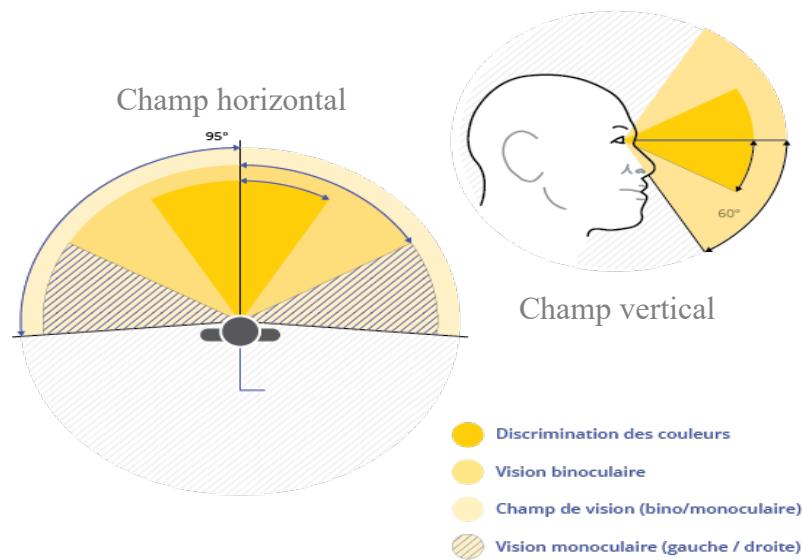


Figure II-3 : Le champ visuel (Source : Leclairage.fr, "Vision : applications pratiques", disponible sur <https://leclairage.fr/vision-applications-pratiques/>, consulté le 6 avril 2025, Adaptée par auteur, 2025).

- D'après (la figure II-3), on conclue que : sur le plan vertical, l'amplitude est d'environ 130°, limitée vers le haut par les arcades sourcilières et vers le bas par les joues.
- Sur le plan horizontal, elle peut atteindre jusqu'à 180° lorsque le regard reste fixe (Faure, 2006).

II.1.3 Les paramètres du confort visuel :

Les paramètres du confort visuel jouent un rôle fondamental dans la qualité de l'environnement lumineux et peuvent influencer directement la perception visuelle et le bien-être des occupants. Plusieurs facteurs physiques doivent être pris en compte pour garantir un environnement visuel confortable.

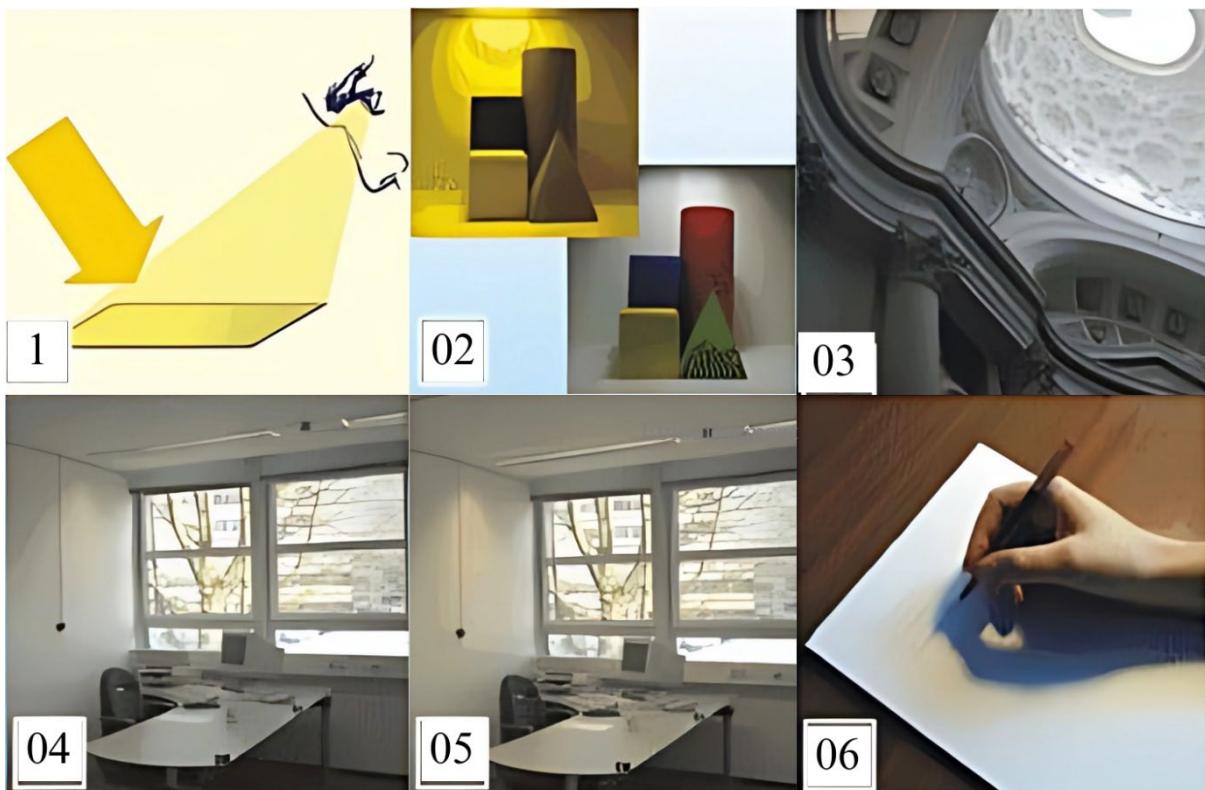


Figure II-4 : Paramètres du confort visuel (Source : Liebard & De Herde, 2005)

Où :

01 : Niveau d'éclairement

02 : Bon rendu de couleurs

03 : L'uniformité de la lumière

04 et 05 : Teinte de lumière et vue vers l'extérieur

06 : Ombres gênantes

➤ **Le niveau d'éclairement :**

Le niveau d'éclairement (figure II-5) est essentiel pour une vision claire et sans fatigue. Un éclairement insuffisant peut rendre difficile l'accomplissement de certaines tâches visuelles, tandis qu'un éclairement excessif peut entraîner une gêne visuelle.

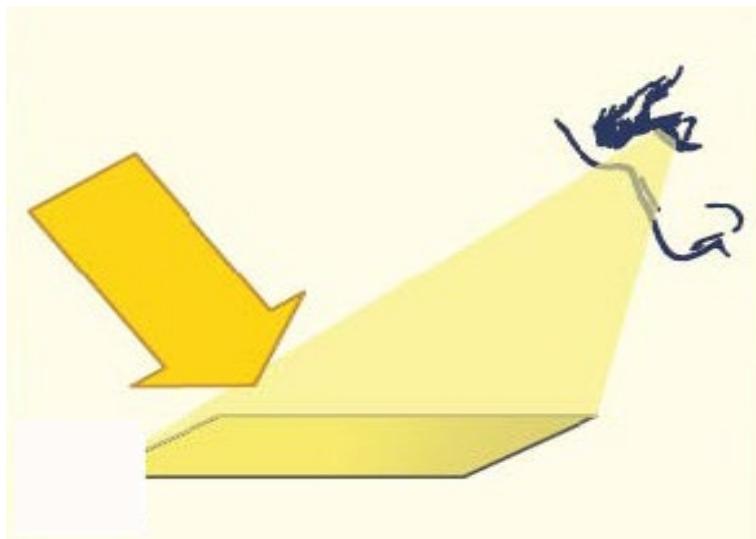


Figure III-5 Niveaux d'éclairement.
(Source : Liebard & De Herde, 2005)

L'éclairage optimal dépend principalement de la fonction de l'espace et des surfaces réfléchissantes qui s'y trouvent (Faure, 2006). À titre d'exemple selon diverses normes, l'éclairage moyen dans une salle de classe doit dépasser 300 lux, tandis que dans les laboratoires, les salles d'art et sur les tableaux blancs, un éclairage minimum de 500 lux est requis. La société d'ingénierie d'éclairage (IES) définit des niveaux d'éclairage recommandés en fonction du type d'espace, des activités visuelles réalisées, de l'âge des occupants et d'autres critères (Fang, 2017).

➤ **Le rendu des couleurs correct :**

Le rendu des couleurs est influencé par la source lumineuse et doit être optimisé pour que les objets apparaissent dans leurs couleurs naturelles (figure II-6).



Figure II-6 : Influence du rendu de couleur

(Source : Xuanthulab (s.d.). "Phối màu sắc cho căn phòng của bạn". Xuanthulab.net. Disponible sur : <https://xuanthulab.net/phoi-mau-sac-cho-can-phong-cua-ban.html>.)

Le rendu des couleurs est évalué à travers l'Indice de Rendu de Couleurs (IRC), qui varie de 0 à 100, avec 100 représentants la lumière solaire. Un IRC supérieur à 85 est considéré comme bon, entre 80 et 85 comme moyen, et entre 60 et 80 comme médiocre (Faure, 2006).

➤ **Le teint de la lumière :**

Le teint de la lumière, exprimé en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$), joue un rôle important dans la perception visuelle et doit être adapté au niveau d'éclairement souhaité. Selon la température de couleur, la lumière peut être chaude (moins de 3300 K), neutre (3300 à 5500 K) ou froide (plus de 5500 K). Ce paramètre influence la couleur perçue de l'espace et son ambiance générale (Guide CEATI, 2014).

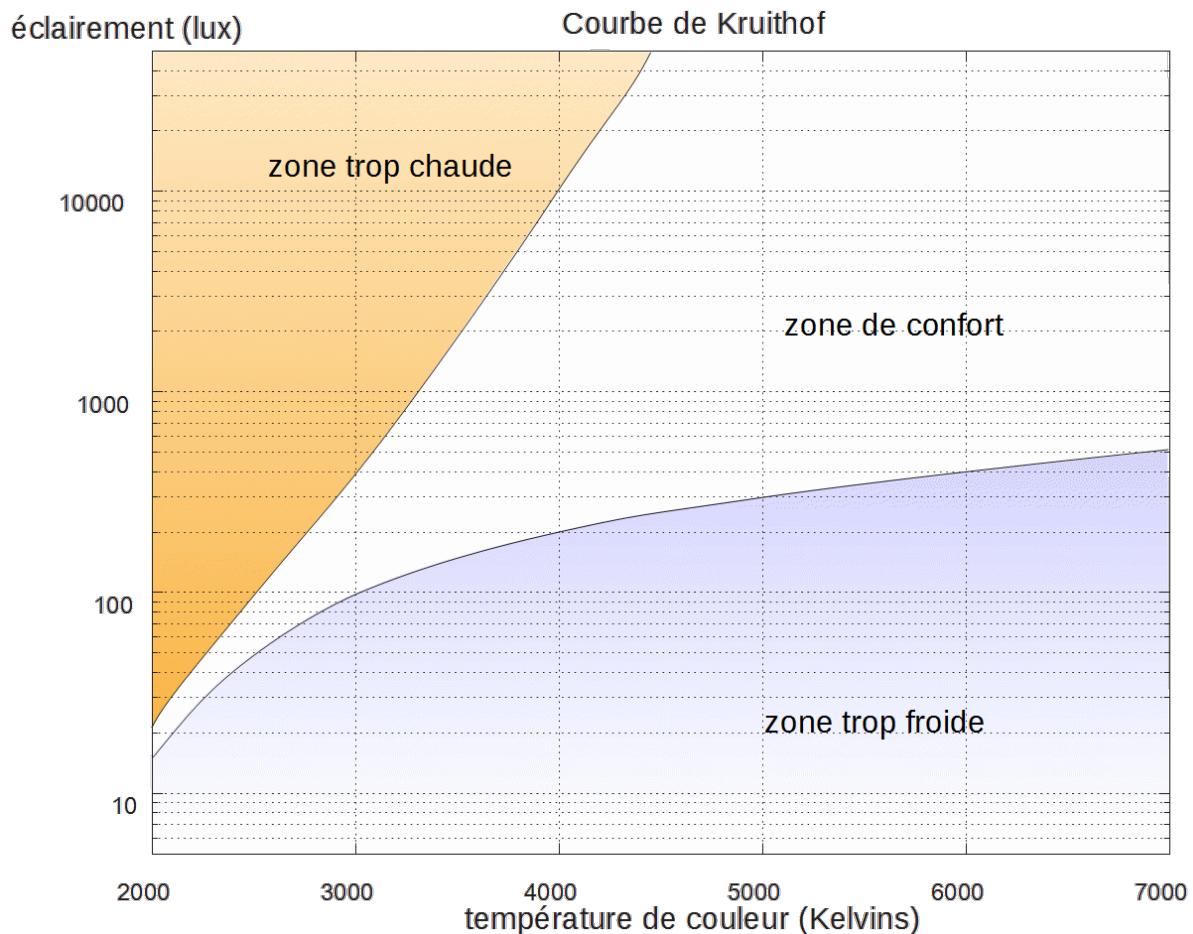


Figure II-7 : Le diagramme de Kruithof
 (Source : https://sitelec.org/themes/circadien/circadien.htm#google_vignette)

Le diagramme de Kruithof illustre les températures de couleur recommandées en fonction du niveau d'éclairage (Grégoire, 2017).

➤ **L'uniformité de la lumière :**

L'uniformité de l'éclairage est un facteur clé pour éviter la fatigue visuelle. Une lumière uniforme répartie de manière homogène dans l'espace permet de maintenir un confort visuel optimal. En revanche, un éclairage localisé, avec des zones de lumière et des zones d'ombre (figure II-8), peut causer des inconforts visuels, car l'œil doit constamment s'adapter aux variations de lumière, provoquant ainsi de la fatigue. Il est donc recommandé d'éviter des contrastes trop élevés entre les différentes zones d'un même champ visuel (Faure, 2006).



Figure II-8 : Abscence d'uniformité de la lumière dans la salle de classe

(Source : <https://www.doellinger-architekten.de/referenzen/barnim-gymnasium>)

➤ **L'absence de l'éblouissement :**

L'éblouissement visuel (figure II-9), est un phénomène qui survient lorsqu'une intensité lumineuse trop élevée dans le champ de vision perturbe la capacité de l'œil à percevoir correctement les éléments d'un environnement. Il peut se produire de manière directe ou indirecte.



Figure II-9 : Eblouissement dans une salle de classe

(Source : <https://www.amelioronslaville.com/archives/2015/12/salle-de-classe-fermee-a-cause-de-lamiant/>)

- **Types d'éblouissement :**

Éblouissement direct : l'éblouissement direct est causé par la présence d'une source lumineuse intense, comme la lumière solaire, dans le champ de vision. Plus la source lumineuse est proche du centre du cône de vision de l'œil, plus l'éblouissement est intense. Ce phénomène peut entraîner une réduction de la capacité à percevoir les détails, voire une gêne visuelle extrême. (Faure, 2006 ; Cadiergues, Sd).

Éblouissement indirect : l'éblouissement indirect, quant à lui, est généré par des réflexions de lumière sur des surfaces réfléchissantes telles que les écrans d'ordinateur, le papier ou des surfaces brillantes. Ces réflexions perturbent la vision en augmentant la luminance dans le champ de vision, causant ainsi une fatigue visuelle et une diminution de la clarté perçue. (Liebard & De Herde, 2005).

- **Réduction de l'éblouissement :** Pour réduire l'éblouissement dans un espace, plusieurs stratégies peuvent être mises en place. Il est recommandé d'éviter l'utilisation de sources lumineuses directes et d'opter pour un éclairage indirect ou filtré. L'utilisation de diffuseurs de lumière, de stores ou de rideaux peut également limiter l'intensité lumineuse perçue. Une gestion judicieuse de la direction de la

lumière et de la position des sources lumineuses, notamment par l'optimisation de l'éclairage naturel et artificiel, est essentielle pour éviter des contrastes lumineux excessifs. (Liebard & De Herde, 2005 ; CEATI, 2014).

- **Effets physiologiques et psychologiques :** L'éblouissement, qu'il soit direct ou indirect, peut avoir des effets physiologiques et psychologiques importants. Sur le plan physiologique, il peut entraîner une fatigue visuelle, une diminution de la performance, et même une gêne oculaire persistante. Psychologiquement, il peut induire une sensation de stress et d'irritation, réduisant ainsi le confort et l'efficacité dans les tâches quotidiennes. (Faure, 2006 ; De Herde & Liebard, 2005).
- **Luminance maximale acceptée et angle de vision :** Il est essentiel de contrôler la luminance dans un espace pour éviter l'éblouissement. La luminance maximale acceptée dépend de l'angle de vision. En effet, plus l'angle de vue par rapport à une source lumineuse est large, plus la lumière émise devient difficile à tolérer pour l'œil. (Paule, 2007 ; CEATI, 2014).

➤ **L'absence d'ombres gênantes :**

Les ombres gênantes, créées par des éléments qui bloquent la lumière entre la source lumineuse et l'objet observé, peuvent réduire les contrastes et perturber la vision (figure II-10).



Figure II-10 : Exemple d'ombre gênante
(Source : Liebard & De Herde, 2005)

Pour éviter cette gêne, certaines positions doivent être évitées, comme un éclairage venant de la droite pour les droitiers ou de la gauche pour les gauchers. Il est également conseillé d'éviter un éclairage provenant de derrière (Magali, s. d.).

➤ **Autres : La vue vers l'extérieur :**

Avoir une vue vers l'extérieur est un facteur qui améliore le confort visuel et le bien-être psychologique des occupants. Cela permet de réduire la sensation d'enfermement et d'offrir une perception visuelle plus agréable et diversifiée. Les baies vitrées, par exemple, favorisent une connexion visuelle avec l'extérieur et apportent des bienfaits esthétiques et fonctionnels (Liebard & De Herde, 2005).

II.1.4 Autres éléments influençant le confort visuel :

• **Les couleurs :**

La couleur des objets et de l'environnement joue un rôle essentiel sur le bien-être psychophysiologique des occupants d'une pièce (figure II-11), en influençant leur humeur et leur confort.



Figure II-11 : Salle de classe avec différentes températures de couleurs
(Source : Müezzinoğlu et al., 2020)

Où :

01 : Pièce avec couleur froide.

02 : Pièce avec couleur chaude.

03 : Pièce avec couleur neutre.

Les couleurs à longue longueur d'onde, comme le rouge et l'orange, ont un effet stimulant sur le métabolisme, tandis que celles à courte longueur d'onde, comme le bleu et le violet, apportent une sensation de calme. Les couleurs intermédiaires, telles que le vert et le jaune, ont un effet tonique, favorisant la concentration et la clarté d'esprit. À l'inverse, les couleurs sombres, comme le gris, peuvent induire une sensation de dépression. Par ailleurs, la couleur impacte aussi la perception de la taille des espaces et des volumes. Les objets de couleurs chaudes, tels que le rouge et l'orange, paraissent plus agréables lorsqu'ils sont éclairés par une lumière chaude, alors que cette lumière a tendance à assombrir les objets de couleurs froides,

comme le bleu. La lumière chaude, dominée par les couleurs rouges et oranges, accentue les caractéristiques des objets dans ces teintes (Trouve, 1991).

• Les matériaux

La perception des matériaux dans un espace est influencée par la direction de la lumière et la position de l'observateur. Tout comme la lumière, les matériaux solides jouent un rôle crucial dans l'ambiance d'une pièce, en particulier en ce qui concerne la quantité, la qualité et la direction de la lumière. Deux caractéristiques essentielles des matériaux à considérer sont leur texture (mate ou brillante) et leur couleur.



Figure II-12 : Impact des textures

(Source : <https://www.18h39.fr/inspiration-maison/tendances-deco/sol-tendance-mixer-parquet-carrelage-meme-piece.html>)

Cette combinaison génère des ambiances variées selon les besoins des concepteurs ou des occupants. La lumière naturelle, en fonction de son intensité, de son angle d'incidence et de sa qualité, met en valeur la texture et la couleur des matériaux, influençant ainsi l'atmosphère générale de l'espace (Matallah, 2015).

• La forme de la pièce

La forme de la pièce influence directement la manière dont la lumière naturelle se diffuse. Dans les pièces fermées, la lumière est généralement plus directe, tandis que dans les espaces ouverts, elle se diffuse davantage. L'éclairage des murs de la pièce peut mettre en évidence la géométrie de l'espace, créant une atmosphère plus contrainte si ces murs sont éclairés, car plus ils sont lumineux, plus ils semblent grands. En revanche, dans l'obscurité, les limites de la pièce deviennent floues, car il n'y a pas de réflexion lumineuse pour délimiter l'espace. (Kaya et Afacan, 2017).

• L'orientation des espaces

L'orientation des espaces joue un rôle important dans la création d'un confort visuel. Selon Matallah (2015), dans un bâtiment, il est essentiel de prendre en compte l'emplacement des espaces où l'occupant passe la majeure partie de sa journée. Il est également important de prévoir des zones nécessitant un éclairage intense, en les exposant judicieusement au soleil pour bénéficier d'une lumière naturelle adéquate et garantir un confort visuel optimal.

• Les ouvertures

Le choix des ouvertures (latérales ou zénithales) est crucial pour assurer un bon éclairage naturel dans la pièce. Les concepteurs intègrent des saillies ajourées sur les façades ou les toits pour établir un lien visuel avec l'extérieur, permettant ainsi un éclairage naturel efficace.

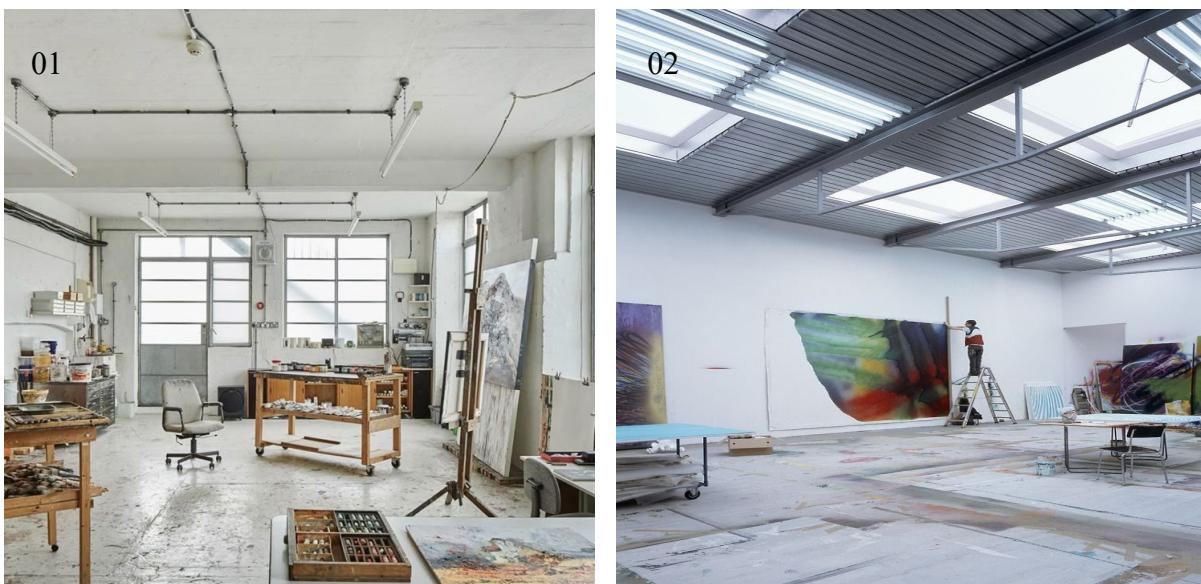


Figure II-13 : Ouvertures latérales et zénithales

(Source : 01 <https://br.pinterest.com/pin/92816442315758200/>; 02 <https://br.pinterest.com/pin/5559199536975605/>)

La sélection du type d'ouverture dépend du volume de l'espace et de sa fonction, chacun ayant ses avantages en termes de diffusion lumineuse.

II.2. Les espaces éducatifs :

Les salles de classe jouent un rôle fondamental dans l'éducation, où les élèves passent jusqu'à 70 % de leur journée scolaire. Au cours des deux dernières décennies, les outils pédagogiques ont progressivement évolué, remplaçant les méthodes traditionnelles. Dans les universités, les salles de classe, initialement axées sur l'écriture, sont désormais adaptées aux besoins des apprenants du XXI^e siècle. Dans plusieurs pays méditerranéens, cette évolution se

traduit par l'utilisation de projecteurs, de tableaux blancs et de bureaux, créant une interaction avec trois surfaces principales : le bureau (surface horizontale) et les supports verticaux (tableau blanc et écran de projection). Cette dynamique, où les utilisateurs passent fréquemment d'une surface à l'autre, rend les mesures statiques de l'éblouissement inadaptées, ce qui influence la répartition de la lumière et le confort visuel. Le confort visuel dans les bâtiments éducatifs est essentiel, car il impacte directement le bien-être et la qualité de l'apprentissage des élèves, une conception donc adéquate de l'éclairage peut améliorer immédiatement ce confort (Ibañez, 2017 et al. ; M. Winterbottom, 2009 et al. ; A.R. Musa et al., 2012).

Dans les ateliers d'architecture et les ateliers artistiques, l'agencement flexible des éléments comme les écrans, les tables et les chaises permet de réduire les tensions physiques, d'améliorer le confort et de favoriser la productivité (C. Cuttle, 2008). Cela met en évidence l'importance d'une conception réfléchie des espaces, non seulement pour garantir un confort visuel optimal, mais aussi pour assurer le bien-être des utilisateurs à long terme. En optimisant l'éclairage et l'organisation des espaces, ces ateliers deviennent des environnements propices à la créativité et à une productivité accrue.

II.2.1 Le confort visuel dans les espaces éducatifs :

Un environnement visuel confortable, essentiel pour la réalisation de tâches visuelles, peut être obtenu selon Benharkat (2006) en respectant les critères suivants :

- Un niveau d'éclairement adéquat.
- Une distribution uniforme de la lumière.
- L'absence de phénomènes d'éblouissement.
- L'absence d'ombres perturbantes.
- Un rendu des couleurs fidèle.
- Une teinte lumineuse plaisante.

Toutefois, il est souvent difficile de répondre à ces critères simultanément dans un même espace. Il est donc crucial de hiérarchiser ces éléments en fonction des tâches spécifiques à accomplir.

Dans le cadre des salles de classe, un confort visuel est atteint lorsque tous les objets peuvent être vus clairement sans provoquer de fatigue visuelle. Le contenu du tableau, les panneaux d'affichage et le matériel pédagogique doivent être éclairés de manière adéquate pour garantir leur lisibilité (Piderit Moreno, 2011). Il est donc essentiel que les espaces éducatifs soient conçus de manière à répondre aux exigences des activités scolaires tout en préservant la santé des élèves et du personnel enseignant.

II.2.2 Couleurs des parois recommandées :

Le confort visuel constitue un facteur déterminant dans la qualité des environnements éducatifs et professionnels. Plusieurs recherches ont souligné l'importance de l'interaction entre la lumière naturelle et les traitements colorés des surfaces dans la perception de l'espace, le bien-être et la performance des usagers.

Dans une étude menée par Yüceer et Lök (2020), les auteurs ont expérimenté différentes ambiances colorées au sein de studios de design. Trois environnements ont été créés à l'aide de couleurs chaudes, froides et neutres, puis soumis à l'évaluation d'étudiants à travers des questionnaires portant sur la qualité spatiale perçue, l'adaptation sociale et la productivité individuelle. Les résultats ont mis en évidence une préférence marquée pour les espaces colorés par rapport aux espaces neutres. En particulier, les auteurs ont précisé que l'espace aux couleurs froides (bleu) avait un effet positif sur l'adaptation sociale et la productivité individuelle (Yüceer & Lök, 2020).

Une autre recherche complémentaire, conduite par Vicaningrum et Marcillia (2024), s'est appuyée sur une simulation en réalité virtuelle de trois ateliers d'architecture (blanc, bleu, orange), intégrant des variations d'éclairage naturel à différents moments de la journée (8h, 12h, 16h).



Figure II-14 : les différentes simulations (Source : I. Vicaningrum & S. Marcillia, 2024 ; Adaptée par : auteur, 2025)

Douze participants (étudiants et professionnels) ont évalué le confort visuel de chaque configuration. Les résultats ont montré que les couleurs murales claires, notamment le blanc et l'orange, combinées à un bon apport de lumière naturelle, contribuaient significativement à l'amélioration du confort visuel, tout en favorisant la performance et la productivité des usagers. Les auteurs soulignent que l'usage de couleurs murales claires tend à améliorer l'environnement visuel de l'utilisateur, ce qui influence positivement les performances dans l'apprentissage (Vicaningrum & Marcillia, 2024).

Ainsi, ces deux études démontrent que le confort visuel dans les espaces éducatifs peut être amélioré non seulement par un bon éclairage naturel, mais également par un choix réfléchi

des couleurs qui sont les couleurs claires, influençant la perception spatiale, la concentration et le bien-être des occupants.

II.2.3 Tâches visuelles :

Les élèves et étudiants sont confrontés à diverses tâches visuelles dans une salle de classe, telles que :

- La lecture ou l'écriture d'un document posé sur le plan de travail.
- La lecture des informations inscrites au tableau.
- Le dessin sur un plan.
- L'observation prolongée du professeur ou d'un autre élève.
- La visualisation de films, de diapositives ou d'émissions télévisées.
- Le travail sur un ordinateur.

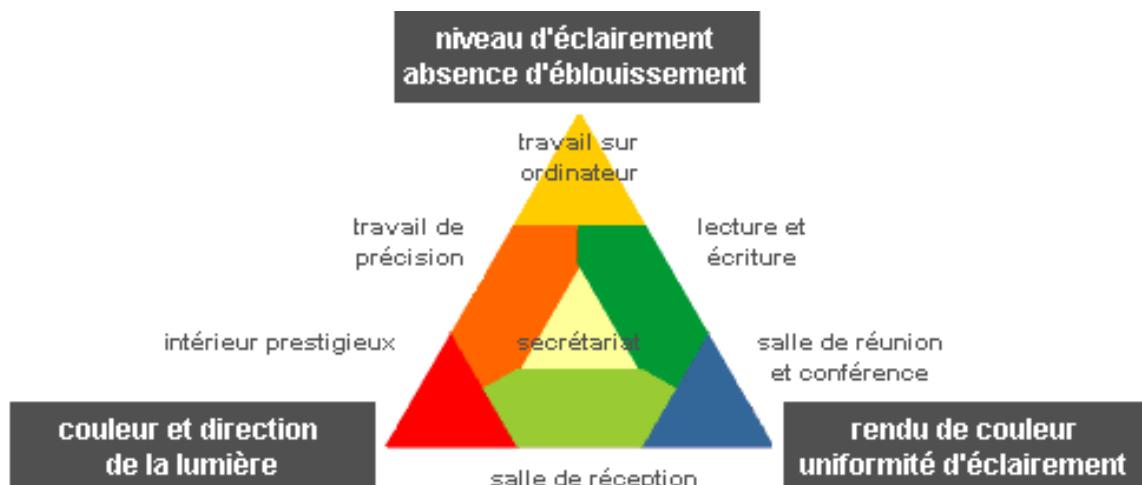


Figure II-15 : Paramètres du confort visuel en fonction de tache visuelles (Source : Messaoudi, 2018)

Ces activités (figure II-15) révèlent que la tâche visuelle principale dans les salles de classe repose sur des alternances fréquentes entre vision de près et vision de loin. En effet, l'élève passe de l'écriture sur sa table (vision rapprochée) à la lecture du tableau (vision éloignée), puis revient à son cahier (vision rapprochée), et observe à nouveau le professeur (vision éloignée), entraînant ainsi des changements constants d'accommodation et de convergence, ainsi que des ajustements rapides de l'adaptation visuelle (Messaoudi, 2018).

II.2.4 Normes d'éclairage dans les salles de classe :

Les normes relatives à l'éclairage des établissements scolaires diffèrent d'un pays à l'autre. La majorité des établissements se basent sur le niveau d'éclairement mesuré au niveau du plan de travail comme critère principal (Narboni, 2006). Toutefois, les besoins en éclairage varient en fonction des types d'espaces d'apprentissage (primaire, secondaire, universitaire), car les performances visuelles des enfants diffèrent de celles des adultes (Ben Cheikh, 2007).

Une étude des normes et recommandations internationales concernant les niveaux d'éclairement dans les salles de classe a été menée (figure II-16). Cette analyse montre que les normes recommandent en moyenne un niveau d'éclairement d'environ 500 lux (Bendekkiche, 2017).

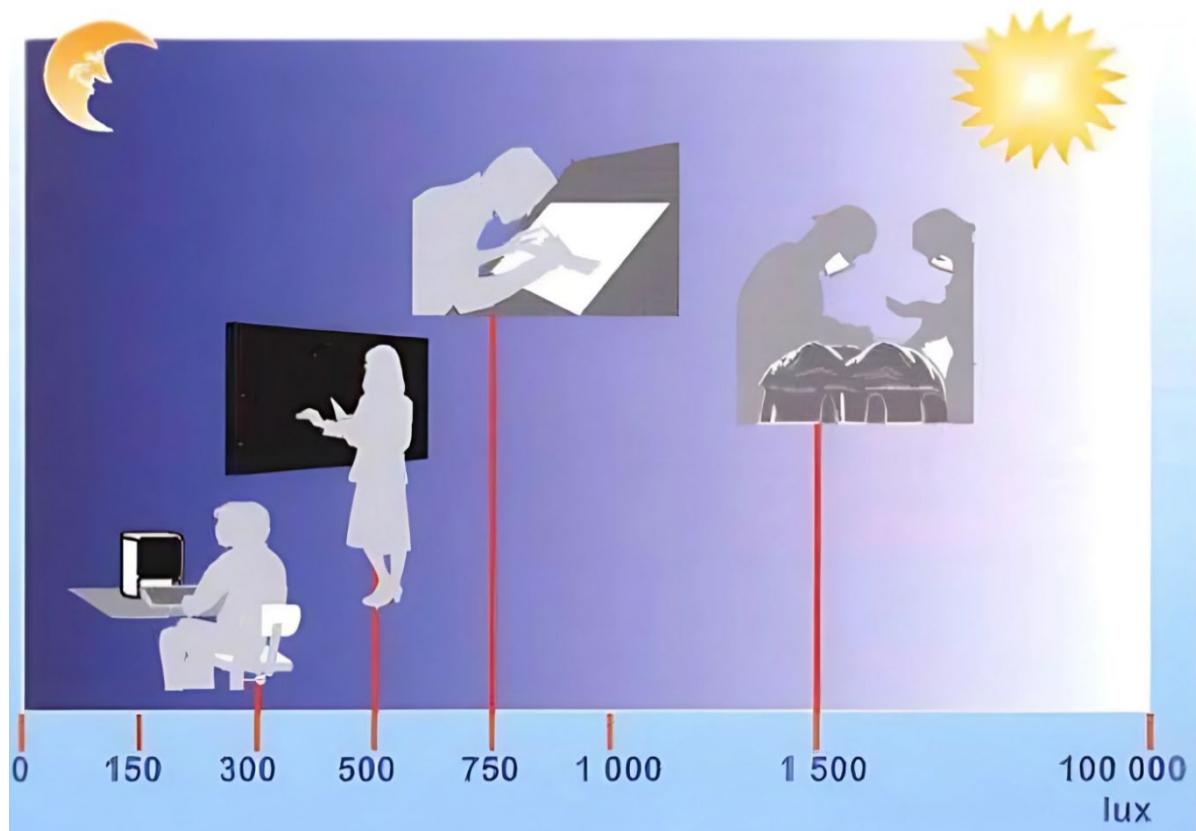


Figure II-16 : Niveau d'éclairement, provenant de l'éclairage naturel, recommandé selon l'activité (Source : Bendekkiche, 2017)

Le (tableau III-1) synthétise les niveaux d'éclairement suggérés par cinq normes, révélant des différences significatives. Il convient de souligner que ces valeurs concernent spécifiquement l'éclairage artificiel (Piderit Moreno, 2011).

Tableau II-1 : Normes d'éclairage dans les différentes salles de classe (Source : Auteur, 2025)

Type d'Espace	Niveau d'éclairement recommandé	Température de couleur	Indice de		Autres considérations
			Rendu des Couleurs (IRC)	Éblouissement (UGR)	
Salles de classe générales	300 lux	4000K-6500K	> 80	< 19	Éclairage uniforme, bonne visibilité des tableaux
Ateliers d'arts	500 - 750 lux	4000K- 6500K	> 80	< 19	Adaptation pour des tâches de précision
Ateliers de dessin technique	750 - 1000 lux	5000K- 5500K	> 80	< 19	Éclairage ciblé, bonne reproduction des couleurs
Salles de réunion	300 - 500 lux	4000K- 6500K	> 80	< 19	Éclairage flexible, adaptation pour les présentations visuelles

En Algérie, le guide du Ministère de l'Éducation Nationale fournit des indications sur les dimensions des salles de classe, leur orientation et les indices de vitrage recommandés. Cependant, il n'existe pas de directives précises concernant les exigences d'éclairage, telles que la luminance, l'uniformité, etc. Comparée aux réglementations internationales, la réglementation algérienne reste limitée sur ce sujet (Bendekkiche, 2017 ; Benharkat, 2006).

II.2.5 Stratégies de conception de l'éclairage dans les espaces éducatifs dans le climat méditerranéen :

Yunitsyna & Toska, 2023 confirment que dans les régions situées aux latitudes inférieures de l'hémisphère nord, caractérisées par un climat méditerranéen, la conception de l'éclairage naturel doit tenir compte de l'intensité élevée du rayonnement solaire et de sa variation selon les saisons. L'objectif est de maximiser l'apport en lumière du jour tout en préservant le confort visuel. Différentes stratégies architecturales et techniques sont ainsi proposées pour les adopter dans les établissements scolaires, en fonction du climat local, de l'orientation des bâtiments et des besoins spécifiques des usagers (tableau II-2).

Tableau II-2 : Stratégies de conception de l'éclairage dans les espaces éducatifs dans le climat méditerranéen (Source : Yunitsyna & Toska, 2023 ; Adapté par : auteur, 2025)

Stratégies	Pays
En Italie, des volets roulants et des végétations ont provoqué un éclairage du jour insatisfaisant dans l'école J.C. Maxwell.	Italie
À l'école de Campanie, l'éblouissement direct a entraîné l'utilisation d'ombrages improvisés.	Italie
En Espagne, des dispositifs de protection solaire en cage à œufs ont réduit de 50 % la consommation d'énergie pour l'éclairage artificiel. À Madrid, des systèmes d'éclairage LED et de peinture blanche ont été suggérés pour améliorer l'éclairement dans les salles de classe. Setiati et Budiarto recommandent de planifier plusieurs scénarios d'éclairage en fonction de l'utilisation et des besoins visuels.	Espagne
Dong et al. proposent l'utilisation de rideaux et de capteurs pour ajuster l'éclairage artificiel en fonction de l'intensité de la lumière naturelle.	
À l'université albanaise, des modules d'ombrage extérieurs repliables ont réduit le rayonnement solaire dans les salles de classe.	Albanie
En Sicile, le vitrage réfléchissant et les plafonds suspendus ont été utilisés pour contrôler l'éblouissement et assurer une distribution uniforme de la lumière.	Italie
En Libye, l'approche durable inclut la maximisation de la lumière naturelle et la protection contre l'éblouissement.	Libye
En Algérie, il est recommandé d'avoir un ratio fenêtre/mur de 30 % pour éviter l'éclairement excessif dans les salles de classe.	Algérie

L'analyse des différentes approches adoptées dans plusieurs pays montre qu'il n'existe pas une seule solution universelle pour la conception de l'éclairage naturel. Chaque stratégie est adaptée aux conditions climatiques locales, aux besoins des utilisateurs et aux contraintes spécifiques de l'architecture scolaire. Cela souligne l'importance d'une approche contextuelle, combinant maximisation de la lumière naturelle, contrôle de l'éblouissement et intégration harmonieuse des dispositifs d'ombrage pour garantir un confort visuel optimal dans les espaces éducatifs.

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière les multiples facteurs déterminant le confort visuel dans les espaces éducatifs, en soulignant l'importance d'un éclairage naturel bien maîtrisé. L'analyse des besoins spécifiques des usagers, selon les types d'activités pratiquées, a montré que la qualité de la lumière, sa distribution, son intensité et sa stabilité sont des critères essentiels pour assurer des conditions visuelles optimales.

Il ressort également que le confort visuel ne se limite pas à la quantité de lumière, mais inclut la gestion des contrastes, la prévention de l'éblouissement et la prise en compte de la perception subjective des usagers. Ces paramètres, lorsqu'ils sont intégrés dès la phase de conception, contribuent à créer un environnement d'apprentissage sain, stimulant et efficient.

Ces notions seront mobilisées dans le chapitre suivant, qui portera sur l'analyse concrète du confort visuel dans des espaces éducatifs existants, à travers une étude de cas approfondie.

CHAPITRE III :

Étude empirique de l'éclairage naturel dans les ateliers de dessin et de sculpture

Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'établir une étude empirique approfondie de la qualité de la lumière naturelle dans l'atelier d'arts étudié, en s'appuyant exclusivement sur des données recueillies *in situ*. L'approche adoptée combine à la fois, une étude quantitative objective et qualitative subjective, afin d'offrir une lecture complète et sensible de l'environnement lumineux.

La première partie est consacrée à une présentation générale du contexte de la ville de Béjaïa, ainsi que le cas d'étude. Ces éléments permettent de situer les conditions d'éclairage naturel au sein de leur réalité environnementale.

S'ensuit une étude quantitative fondée sur des mesures *in situ*, qui comprend des relevés d'éclairage (lux) et des mesures de luminance (cd/m^2) à trois moments de la journée, afin d'évaluer l'intensité perçue de la lumière sur différentes zones. Ces données sont analysées pour identifier les zones sous-éclairées, surexposées, ou hétérogènes, et permettre une première évaluation des conditions réelles de confort visuel dans l'espace.

Enfin, une enquête qualitative complète cette démarche. Un questionnaire structuré a été distribué à un échantillon d'usagers (élèves et enseignants), afin de recueillir leurs perceptions et ressentis sur le confort visuel dans cet espace destiné aux tâches artistiques. Cette approche sensible permet de confronter les mesures techniques aux expériences vécues, et d'enrichir l'analyse du confort visuel au quotidien.

À travers cette triangulation d'études le chapitre vise à mettre en évidence les atouts et les limites du dispositif lumineux actuel, en posant les bases nécessaires à une réflexion critique et à d'éventuelles propositions d'amélioration.

III.1 Présentation de la ville :

Cette étude se concentre sur la ville de Béjaïa, située sur la côte méditerranéenne de l'Algérie (figure III-1), où le climat favorable et l'ensoleillement important tout au long de l'année offrent des opportunités uniques pour l'exploitation de la lumière naturelle dans les espaces éducatifs. Cependant, malgré ces conditions climatiques avantageuses, certains établissements éducatifs ne tirent pas pleinement parti de cet atout naturel, ce qui peut entraîner des problématiques de confort visuel et une consommation énergétique excessive due à un recours insuffisant à l'éclairage naturel.



Figure III-1 : Situation de la ville de Béjaïa

(Source : <http://agoumatine.centerblog.net/>, 2007 ; adapté par : Auteur, 2025)

Béjaïa est une commune côtière d'Algérie, bordée par la mer Méditerranée, à environ 220 km à l'est d'Alger. Elle est le chef-lieu de la wilaya du même nom, située au nord-est du pays, au cœur de la région de la Kabylie.

III.1.1 Contexte climatique :

Béjaïa bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Le ciel est généralement dégagé (figure III-2) ou peu nuageux environ 88 % du temps en juillet, contre 52 % en janvier (Weatherspark, Wanderlog, 2024). Ces conditions garantissent une bonne disponibilité de lumière naturelle sur une grande partie de l'année, ce qui en fait un facteur favorable pour les études sur le confort visuel.

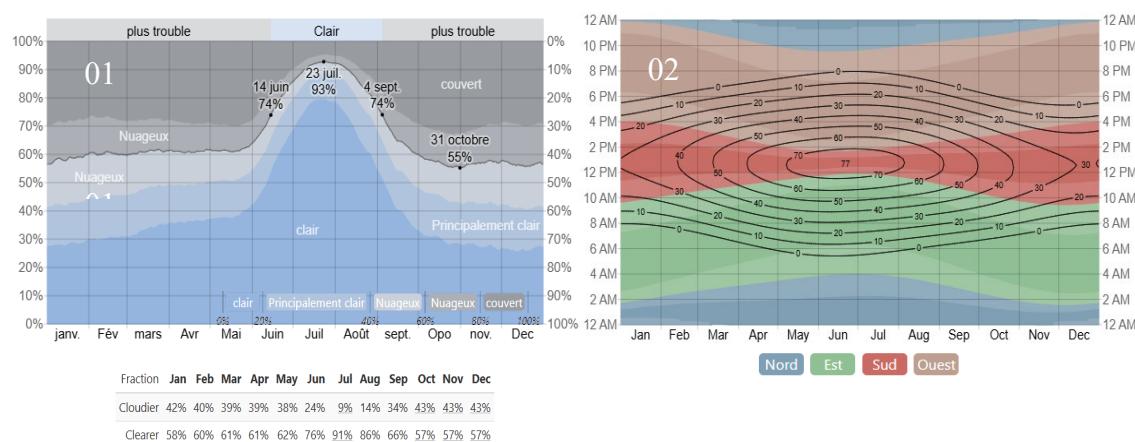


Figure III-2 : Contexte climatique de Béjaïa.
(Source : WeatherSpark, adapté par : Auteur, 2025.)

Où :

01 : Distribution temporelle selon les classes de couverture nuageuse (%) : À Béjaïa, la couverture nuageuse varie fortement selon les saisons. La période la plus claire s'étend de mi-

juin à début septembre, avec un pic de clarté en juillet (ciel dégagé ou partiellement nuageux 91 % du temps). À l'inverse, la période la plus nuageuse va de début septembre à mi-juin, avec un maximum de nébulosité en décembre (43 % du temps en moyenne).

02 : *Élévation et azimut du Soleil au cours de l'année 2025.* : La figure montre l'évolution de l'élévation et de l'azimut du soleil pour chaque heure et chaque jour de l'année. L'axe horizontal représente les jours, l'axe vertical les heures, la couleur de fond indique l'azimut solaire, et les lignes noires correspondent à des élévations solaires constantes.

Cependant pour évaluer les conditions d'éclairement naturel à Béjaïa, il est essentiel d'analyser les données climatiques locales, notamment l'ensoleillement et le rayonnement solaire. Les informations suivantes (figure III-3) sont issues de la base de données Meteonorm (2022) et permettent de mieux comprendre la répartition annuelle de l'ensoleillement et du rayonnement global.

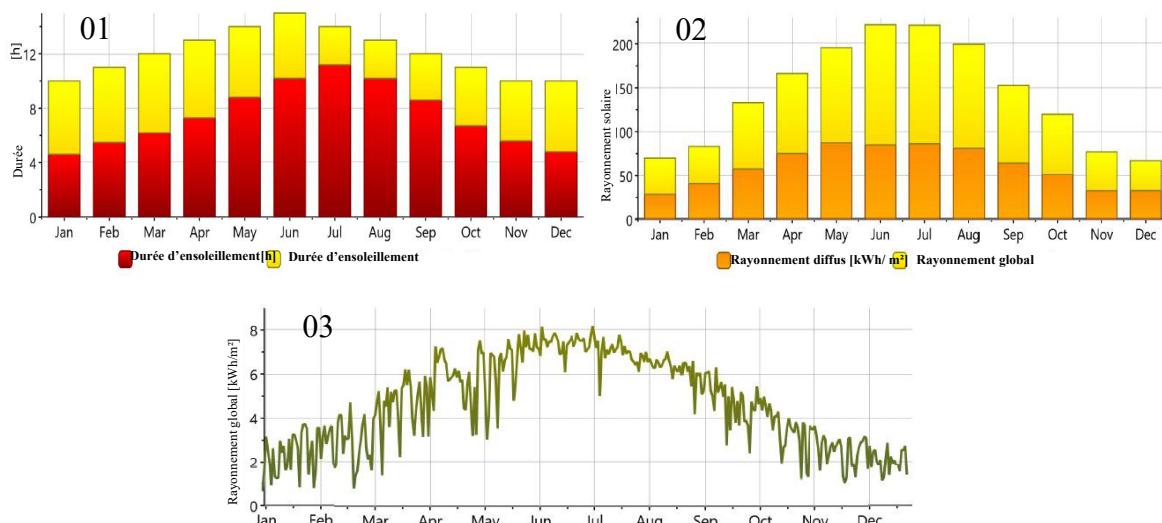


Figure III-4 : Ensoleillement à Béjaïa

(Source : meteonorm V8.1, 2025 ; adapté par : Auteur, 2025)

01 : À Béjaïa, le mois de juillet enregistre en moyenne le plus grand nombre d'heures d'ensoleillement quotidien, avec environ 11 heures par jour, soit un total de 363,66 heures sur l'ensemble du mois. En janvier, c'est le niveau le plus bas qui est observé, avec une moyenne de 5 heures d'ensoleillement par jour et un total mensuel de 208,27 heures. Sur l'ensemble de l'année, Béjaïa bénéficie d'environ 3264,33 heures d'ensoleillement, ce qui correspond à une moyenne de 107,21 heures par mois.

02 : Concernant les données de rayonnement solaire (source : Meteonorm, 2022), en juillet, le rayonnement diffus atteint 80 kWh/m² sur un total de 220 kWh/m² de rayonnement global. En janvier, il est de 25 kWh/m² sur 60 kWh/m² de rayonnement global.

03 : Le rayonnement global quotidien varie au cours de l'année et atteint son maximum en juin et juillet, avec une valeur de 8 kWh/m^2 .

III.2 Présentation du cas d'études :

Inaugurée en 1996, la Maison de la Culture de Béjaïa est un édifice administratif et culturel s'élevant sur deux étages et un rez-de-chaussée, avec une superficie totale de $6\,815 \text{ m}^2$. Son architecture est conçue pour accueillir divers événements culturels, tels que des expositions, des conférences, des spectacles et des ateliers artistiques. Les espaces intérieurs sont aménagés de manière fonctionnelle, offrant une grande flexibilité d'usage pour répondre aux besoins culturels et éducatifs.

La figure suivante (figure III-4) illustre la localisation de la Maison de la Culture de Béjaïa dans son contexte urbain. Elle permet de visualiser sa position stratégique au sein de la ville et sa proximité avec les principaux équipements culturels et éducatifs.

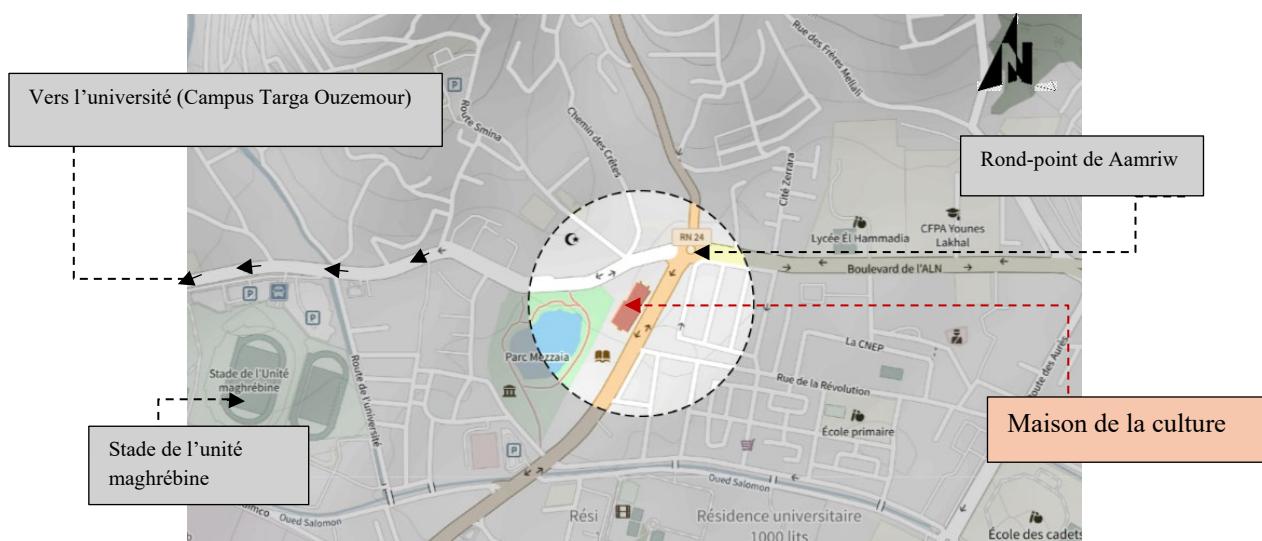


Figure III-6: Situation De la maison de la culture
(Source : Google Maps, Adapté par auteur 2025)

La maison de la culture de Béjaïa est située à Aamriw, sur le boulevard de Krim Belkacem, à l'est du centre-ville de Béjaïa. Facilement accessible via la RN 9, elle se trouve à proximité de plusieurs équipements culturels et éducatifs, notamment la Bibliothèque principale de Béjaïa, la Maison de jeunes Fatima Rahmani et le Musée de géologie. Grace à cette situation, elle s'impose comme un pôle central de diffusion artistique et d'expression culturelle.

III.2.2 Environnement immédiat : Le plan de masse de la Maison de la Culture de Béjaïa (figure III-5), enrichi par des photographies de son environnement immédiat, permet d'identifier les éléments contextuels influençant l'éclairage naturel dans l'atelier analysé.



Figure III-7 : Etude de l'environnement immédiat de la maison de la culture
 (Source : Auteur, 2025)

Le site bénéficie d'une ouverture à l'est, où la largeur de la voie attenante permet une bonne pénétration de la lumière du matin, sans obstruction notable. En revanche, à l'ouest, le bâtiment de la direction de la culture crée un masque solaire direct sur l'atelier de dessin étudié, particulièrement en après-midi. Bien que ce bâtiment soit de couleur blanche, ce qui favorise une légère réflexion lumineuse, sa proximité immédiate réduit l'apport solaire direct.

En complément, la végétation dense au nord-ouest, dans la direction d'orientation de l'atelier, constitue un second masque solaire important, limitant la lumière naturelle disponible. Cette combinaison de masques naturels et bâties influence fortement les niveaux d'éclairage naturel capté. Enfin, les revêtements clairs du parvis et des espaces extérieurs contribuent, quant à eux, à réfléchir une partie de la lumière, favorisant un éclairement diffus dans certaines zones.

Ces éléments doivent être rigoureusement pris en compte dans l'analyse et l'interprétation des mesures réalisées sur site.

III.2.3 Orientation et ensoleillement :

La Maison de la Culture de Aamriw présente une orientation générale à 30° vers le nord-est, ce qui influence l'exposition globale de ses espaces aux apports solaires. Toutefois, l'atelier de dessin étudié dans cette recherche est orienté vers le nord-ouest. Cette configuration spécifique a une incidence directe sur les conditions d'éclairement naturel, notamment en fin de journée, lorsque le soleil atteint son point le plus bas à l'ouest.

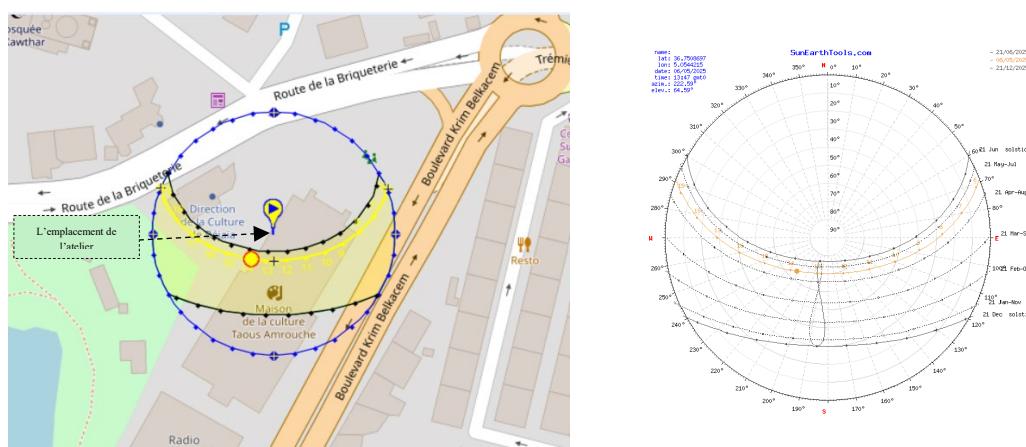


Figure III-8 : Ensoleillement de la maison de la culture
(Source : www.sunearthtools.com)

L'analyse de l'orientation a été appuyée par une représentation graphique à l'aide d'un diagramme solaire (sun path), permettant de visualiser précisément le parcours du soleil par rapport à l'atelier au cours de la journée (figure III-6). Ce support met en évidence la manière dont l'orientation nord-ouest influence les périodes d'ensoleillement direct et indirect, ainsi que les contrastes lumineux observés dans l'espace.

III.2.4 Présentation de l'atelier :

L'atelier de dessin et de peinture se trouve au premier étage de la Maison de la Culture de Béjaïa. Il fait partie des espaces pédagogiques principaux du bâtiment et a été choisi comme objet d'étude pour l'analyse de la lumière naturelle. Son emplacement, sa forme et son orientation ont une influence directe sur les conditions d'éclairement à l'intérieur.

III.2.4.1 Emplacement, forme et orientation :

L'atelier de dessin est situé au 2^{ème} étage de la Maison de la Culture de Béjaïa, dans l'aile nord-ouest du bâtiment (figure III-7). Il occupe une position entre la salle de rangement et l'atelier de céramique et poterie. Cette position limite les ouvertures sur plusieurs façades, ce qui influence directement l'accès à la lumière naturelle.

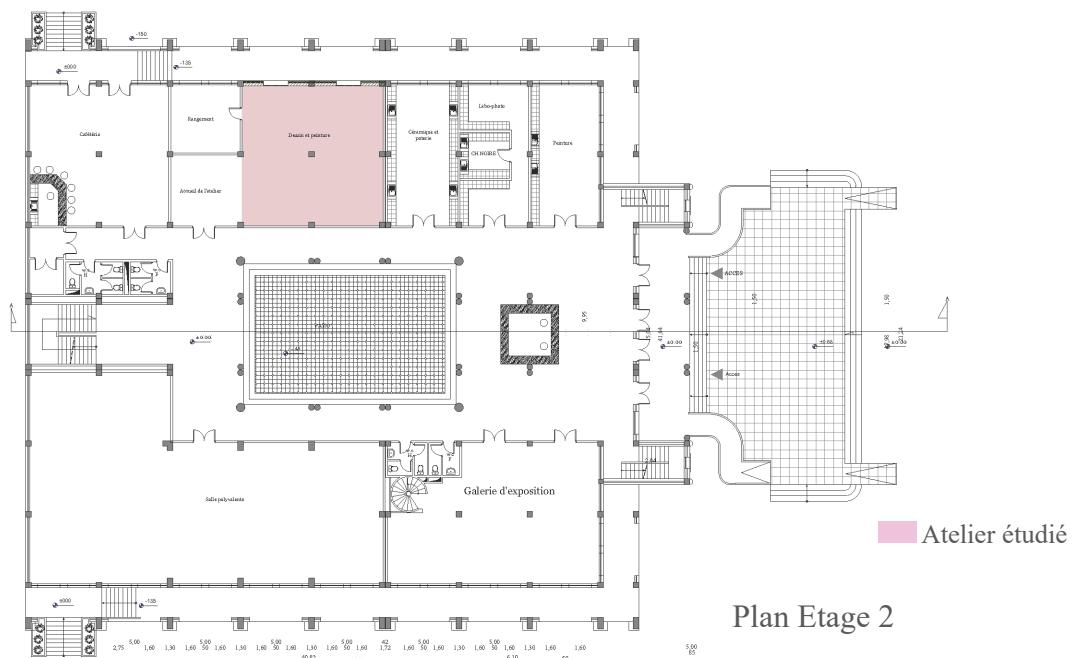


Figure III-9 : Emplacement, forme et orientation de l'atelier (Source : Auteur, 2025)

L'atelier présente une forme rectangulaire presque carrée, propice à une distribution uniforme de la lumière intérieure, à condition que les ouvertures soient bien placées.

L'orientation principale est nord-ouest, ce qui signifie que l'atelier bénéficie surtout d'une lumière en fin de journée. Toutefois, cette orientation est partiellement masquée par deux éléments ; Au nord-ouest, le bâtiment de la direction de la culture, proche et élevé, crée un masque solaire direct. Malgré sa couleur blanche, qui réfléchit une partie de la lumière, il constitue un obstacle notable à l'apport direct en lumière naturelle. D'autre part, une végétation

dense vient renforcer cet effet de masque, surtout en période estivale, lorsqu'elle est feuillue. Cela atténue la lumière incidente sur les ouvertures de cette façade (figure III-8).



Figure III-8 : Vue, de l'atelier, sur les masques solaires (Source : Auteur, 2025)

L'analyse de ces données est cruciale pour comprendre les variations de luminance enregistrées lors des mesures. En effet, l'emplacement en étage limite les masques bas, mais les obstacles proches et végétaux restreignent le potentiel de captation de lumière naturelle en profondeur, d'autant plus que les ouvertures apparaissent uniquement sur un côté de l'espace.

III.2.4.2 Couleurs et textures :

Les parois de l'atelier sont principalement peintes en blanc, à l'exception d'un mur traité dans une teinte beige, introduisant une légère variation chromatique sans altérer la neutralité de l'espace. L'ensemble des murs et le plafond présentent une finition mate, limitant les réflexions spéculaires et favorisant une diffusion homogène de la lumière naturelle. Le sol est revêtu de carreaux de céramique beige à surface légèrement lisse, susceptibles de générer des réflexions modérées sans compromettre le confort visuel. L'aménagement intérieur, quant à lui, se décline en nuances de marron, créant une ambiance chaleureuse et cohérente avec les tonalités globales de l'espace (figure III-9). Toutefois, ces teintes plus foncées absorbent davantage la lumière naturelle, ce qui peut légèrement réduire son niveau de diffusion dans l'atelier.

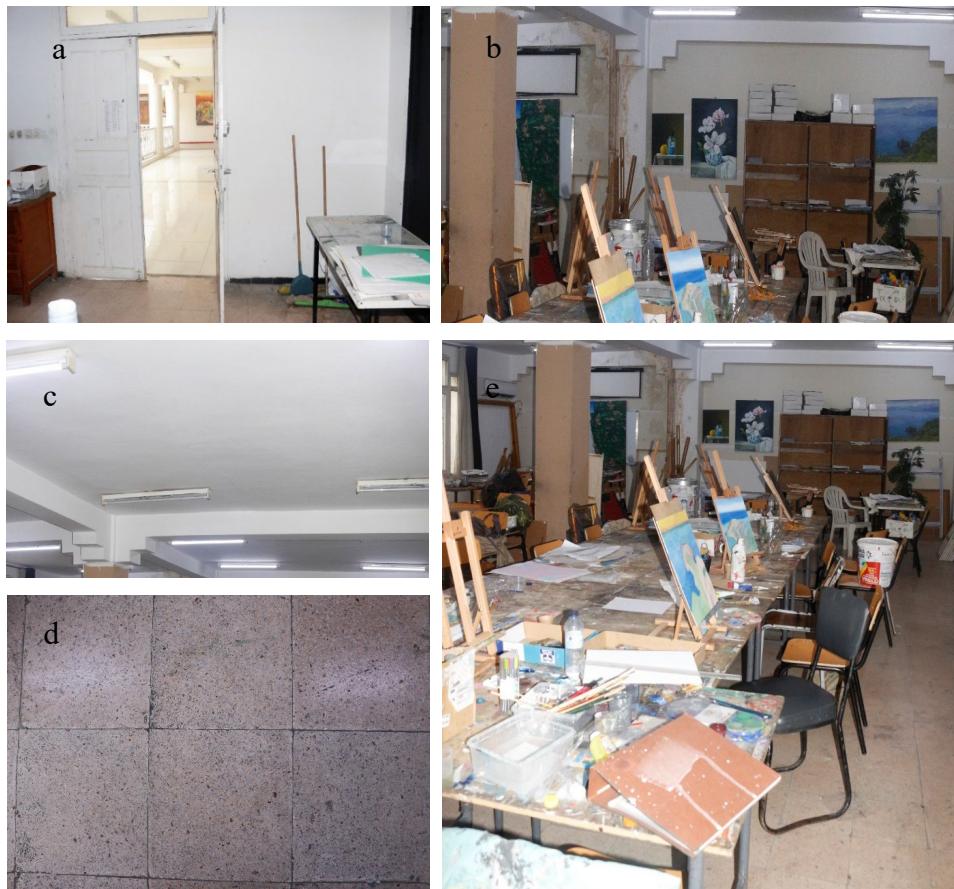


Figure III-10 : Couleurs et textures de différents parois et du mobilier de l'atelier
 (Source : Auteur, 2025)

Où :

- a. **Murs** : Blancs : indice de réflexion (IRC) entre 70 % et 85 % (*Didier D. et Olivier, s.d.*).
- b. Beige : IRC environ 61 % (*Guide sur l'accessibilité des bâtiments, s.d.*).
- c. **Plafond** : Blancs : indice de réflexion (IRC) entre 70 % et 85 % (*Didier D. et Olivier, s.d.*).
- d. **Sol** : IRC : 61 % (*Guide sur l'accessibilité des bâtiments, s.d.*).
- e. **Aménagement** : Marron : IRC entre 14 % et 25 % (*Guide sur l'accessibilité des bâtiments, s.d.*).

Les teintes blanches et beiges, caractérisées par des indices de réflexion de la lumière (IRL) élevés, participent activement à une diffusion homogène de la lumière naturelle, créant ainsi un éclairage doux et équilibré dans l'atelier. À l'inverse, les éléments d'aménagement de couleur marron, dont l'IRL est plus faible, tendent à absorber une partie de la lumière, ce qui peut entraîner une légère diminution de la luminosité globale. Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans l'évaluation de la performance lumineuse de l'espace.

III.3 Etude quantitative :

Cette partie vise à constituer une base de données des mesures permettant de valider le processus de modélisation sur Rhino/Grasshopper, un logiciel de modélisation paramétriques, et de simulation à l'aide des plugins Ladybug/Honeybee, animés par le moteur de calcul Radiance.

III.3.1 Protocoles de mesure :

III.3.1.1 Protocole de mesure de l'éclairement :

L'objectif est d'étudier l'éclairement afin d'identifier d'éventuels problèmes visuels et de comparer les résultats obtenus avec les normes en vigueur. Pour garantir des conditions optimales, les mesures seront effectuées uniquement lorsqu'un ciel totalement clair sera observé. Ainsi, trois moments clés de la journée ont été retenus, à savoir 9h, 12h et 15h. Ces horaires correspondent à différentes positions du soleil dans le ciel, ce qui permet une évaluation plus complète des variations lumineuses naturelles au cours de la journée.

Afin d'assurer une cohérence dans les relevés, les mesures seront réalisées sous l'éclairage naturel uniquement, sans protection solaire et sans éclairage artificiel. De plus, l'environnement immédiat sera décrit afin de tenir compte des éléments pouvant influencer la lumière naturelle, tels que la présence de surfaces réfléchissantes ou d'éventuelles obstructions (masques solaires).

- Instrument de prise de mesure :**

Pour assurer une acquisition fiable des données d'éclairement, une méthodologie rigoureuse a été mise en place. Toutes les mesures ont été réalisées à l'aide d'un luxmètre professionnel (figure III-10), garantissant une précision optimale.



Figure III-11 : Luxmètre (Source : Auteur, 2025)

Le luxmètre utilisé peut atteindre à une valeur maximale de 4000 lux.

- **Procédure de prise de mesure :**

Le cas d'étude se situe à la Maison de la Culture d'Aamriw à Béjaïa, plus précisément dans l'atelier de dessin situé en 2^{ème} étage, qui a été sélectionné en raison de ses similitudes avec l'atelier de sculpture. Ce choix permet d'extrapoler les résultats à d'autres espaces similaires au sein du bâtiment.

Afin d'obtenir une répartition homogène des points de mesure, une grille de 1m × 1m (figure III-11) sera tracée sur la surface d'étude. L'éclairement sera ensuite mesuré au centre de chaque carré, et ce, à hauteur du plan de travail (80 cm), correspondant à la position réelle d'utilisation de l'espace.

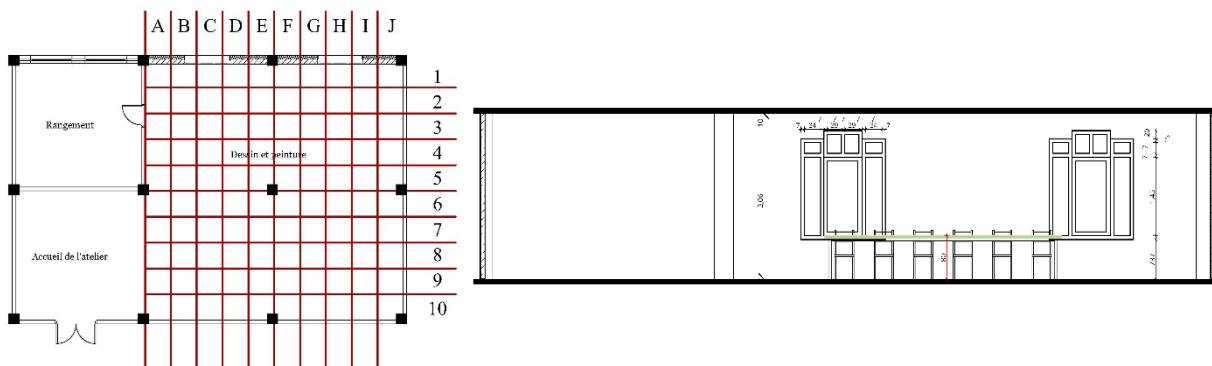


Figure III-12 : Plan et coupe de l'atelier avec une grille de 1*1 m (Source : Auteur, 2025)

Enfin, pour faciliter l'analyse et la comparaison avec les normes de confort visuel, l'ensemble des valeurs relevées sera consigné dans un tableau de données. Cette mise en forme

permettra d'identifier les éventuelles insuffisances en matière d'éclairage et d'orienter les recommandations pour améliorer le confort visuel des usagers.

III.3.1.2 Protocole de mesure de la luminance :

Cette partie vise à mesurer et analyser la luminance (exprimée en cd/m²) dans l'atelier de dessin de la Maison de la Culture d'Aamriw à Béjaïa, éclairé uniquement par la lumière naturelle. L'objectif est d'évaluer la qualité de la lumière naturelle dans l'espace, d'identifier les zones susceptibles de provoquer un inconfort visuel (éblouissement, contrastes excessifs), et de vérifier l'uniformité de la répartition lumineuse. Les mesures seront effectuées à différents moments de la journée – 9h, 12h et 15h – durant la journée du 03 mai, choisie pour la présence d'un ciel totalement clair, condition indispensable à l'analyse fiable de la luminance naturelle.

Plusieurs points de vue seront sélectionnés à l'intérieur de l'atelier, de manière à bien représenter l'espace étudié et à capter différentes orientations de lumière. L'acquisition des images repose sur l'utilisation d'un appareil photo Canon (figure III-12) réglé en mode manuel. Le bracketing d'exposition (AEB) sera activé pour capturer une série de trois images avec des expositions différentes (-2 EV, 0 EV, +2 EV), permettant la création d'images HDR (High Dynamic Range). Afin de garantir une qualité optimale, les réglages suivants seront adoptés : ISO 200, ouverture f/8, mise au point manuelle, et déclenchement via retardateur pour éviter les vibrations. Les photos seront exportées au format RAW (CR2), puis transférées sur ordinateur pour traitement.



Figure III-13 : Appareil photo utilisé pour la prise des images
(Source : Auteur, 2025)

Les fichiers RAW capturés seront fusionnés et convertis au format HDR à l'aide du logiciel Aftab Alpha (figure III-13). Ce logiciel permet non seulement de générer des cartes de luminance en fausses couleurs, mais aussi de produire des graphiques d'analyse facilitant

l'interprétation de la répartition lumineuse dans l'espace. Les zones de forte luminance, de contraste excessif ou de manque d'uniformité seront identifiées. L'ensemble des résultats sera ensuite comparé aux seuils de confort visuel admis, conformément aux normes en vigueur dans le domaine de l'éclairage naturel.

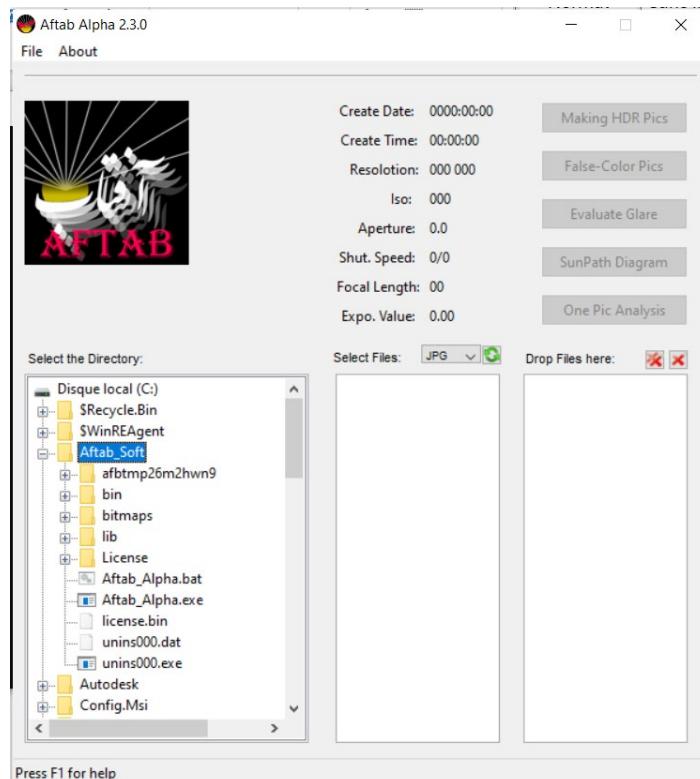


Figure III-15 : Interface du logiciel Aftab Alpha (Source : Auteur, 2025)

Enfin, les résultats seront archivés sous forme de cartes visuelles et de tableaux récapitulatifs pour chaque moment de la journée et chaque point de vue. Cette documentation permettra d'illustrer les écarts de luminance et d'appuyer l'analyse critique des qualités visuelles de l'espace étudié.

III.3.2 Interprétation des résultats :

III.3.2.1 Interprétation des résultats des mesures d'éclairement :

Afin d'évaluer les conditions d'éclairement naturel dans les ateliers artistiques, plus précisément celui de dessin et de peinture, une série de mesures a été menée sur site le 6 mai à trois moments clés de la journée : à 9h, 12h et 15h. Ces relevés ont été effectués à l'aide d'un luxmètre tenu à 80 cm du sol, selon une grille régulière couvrant l'ensemble de l'espace.

Les résultats, présentés sous forme de tableaux et de plans en fausses couleurs, permettent d'apprécier la distribution lumineuse en fonction de l'orientation, des conditions extérieures et

des caractéristiques architecturales du lieu. L'interprétation qui suit vise à identifier les zones sous-éclairées et surexposées, à évaluer l'uniformité de la lumière, et à en déduire les impacts sur le confort visuel dans un contexte pédagogique artistique.

III.3.2.1.1 Les mesures de 9h :

Le premier relevé a été réalisé à 9h du matin, en conditions de ciel clair. Cette tranche horaire permet d'observer l'éclairement en début de journée, à un moment où l'atelier orienté nord-ouest ne reçoit pas encore de lumière directe. Les valeurs relevées permettront d'identifier les zones naturellement les plus favorisées malgré l'orientation défavorable, et de mesurer l'effet des obstacles extérieurs et des caractéristiques de la baie vitrée sur l'éclairage intérieur.

Tableau III-1 : Résultats des mesures d'éclairement naturel à 9h (Source : Auteur, 2025).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	31	38	693	589	60	48	320	632	51	37
2	37	106	250	180	71	52	160	323	104	40
3	50	120	130	80	54	51	92	155	87	41
4	37	52	63	57	46	44	53	72	76	40
5	50	90	81	70	43	39	57	66	49	38
6	56	82	72	75	67	60	70	83	90	70
7	55	60	52	46	36	33	33	34	31	22
8	26	36	32	29	23	24	30	37	31	33
9	30	43	31	41	45	39	42	57	59	43
10	40	38	55	41	39	36	30	37	64	61

D'après (le tableau III-1) de mesures réalisées à 9h, l'éclairement naturel dans l'atelier reste globalement faible et très contrasté. Certaines zones situées à proximité immédiate des ouvertures, comme les points C1 (693 lux) ou H1 (632 lux), présentent des niveaux relativement élevés. En revanche, la majorité des points mesurés affichent des valeurs inférieures à 100 lux, avec des minima atteignant 22 lux (J7).

Cette hétérogénéité s'explique par l'orientation nord-ouest de l'atelier, qui n'est pas favorable à la réception de lumière directe en matinée. De plus, la présence d'obstacles extérieurs, notamment des arbres et un bâtiment institutionnel situé du côté nord-ouest, limite considérablement la pénétration lumineuse.

Cette distribution irrégulière est confirmée par le plan en fausses couleurs à 9h, où seules quelques zones apparaissent en vert et bleu cyan, tandis que la majorité de l'espace est dominée par des teintes violettes et blues foncées (figure III-14). Cela témoigne d'un éclairement insuffisant et localisé, peu favorable au confort visuel requis pour des activités artistiques précises.

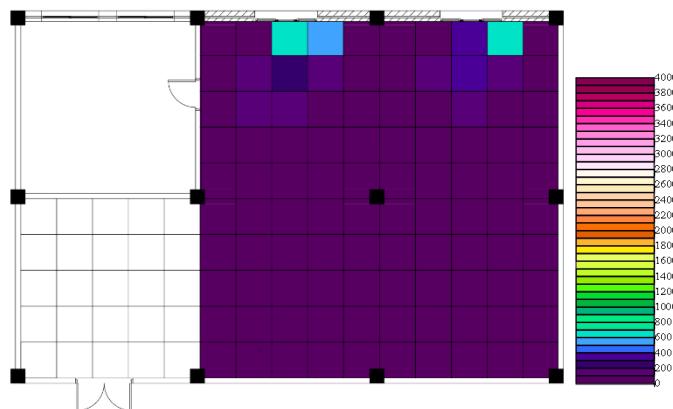


Figure III-14 : Visualisation spatiale de l'éclairement naturel à 9h en fausses couleurs
(Source : Auteur, 2025)

L'analyse architecturale révèle également que la configuration des fenêtres constitue un facteur limitant : la fenêtre est compartimentée en plusieurs petites ouvertures séparées par des cadres épais, et munie de grilles métalliques décoratives (figure III-15). Ce dispositif réduit la surface effective de vitrage, tout en créant des ombres portées et une diffusion désordonnée de la lumière incidente.

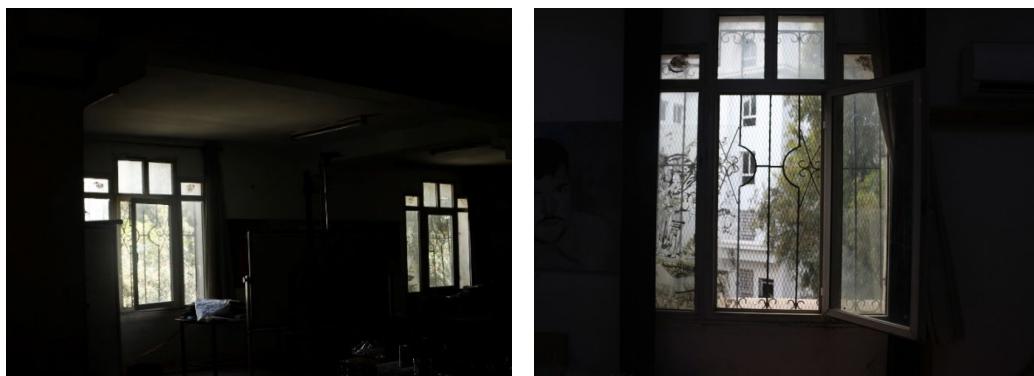


Figure III-15: Caractéristique de la fenêtre du l'atelier
(Source : Auteur, 2025)

Par ailleurs, le vitrage utilisé présente une texture floutée, qui altère la transparence et provoque une diffusion non directionnelle du flux lumineux, réduisant ainsi l'éclairement direct. Cette caractéristique, souvent utilisée pour filtrer la vue, affaiblit la qualité de la lumière perçue à l'intérieur, et pénalise les zones éloignées des baies.

III.3.2.1.2 Les mesures du 12h :

La seconde série de mesures a été effectuée à midi, lorsque le soleil est à son zénith. Bien que la façade nord-ouest soit encore à l'ombre, cette période permet d'évaluer la capacité de la lumière diffuse à pénétrer dans l'espace. Les données mesurées à cet horaire servent à analyser le confort visuel dans une situation de lumière zénithale indirecte.

Tableau III-2 : Résultats des mesures d'éclairement naturel à 12h (Source : Auteur, 2025).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	19	50	501	45	31	32	61	380	158	27
2	43	70	185	263	122	60	75	170	409	72
3	57	118	86	22	32	34	66	127	128	42
4	38	96	84	28	38	40	59	102	98	48
5	19	73	81	51	46	43	52	67	76	52
6	30	59	56	37	30	28	37	50	47	32
7	29	34	28	21	25	32	34	44	36	22
8	18	26	20	22	22	23	24	24	31	21
9	21	23	23	12	22	22	24	21	25	23
10	24	26	25	23	22	19	21	29	31	20

Selon les données relevées à midi (tableau III-2), une amélioration générale des niveaux d'éclairement peut être constatée. Certains points tels que C1 (501 lux), D2 (263 lux) ou I2 (409 lux) dépassent ponctuellement les seuils recommandés pour les activités visuelles. Toutefois, une grande partie de l'atelier demeure sous-éclairée, avec de nombreux points situés en dessous de 100 lux, voire de 30 lux dans certaines zones profondes (ex. D9 : 12 lux).

La représentation en couleurs (figure III-16) correspondant à 12h traduit ce déséquilibre, avec des zones claires localisées près des ouvertures et de larges bandes bleutées vers le fond de la salle. Le confort visuel reste donc partiellement atteint, et fortement dépendant de la localisation du poste de travail.

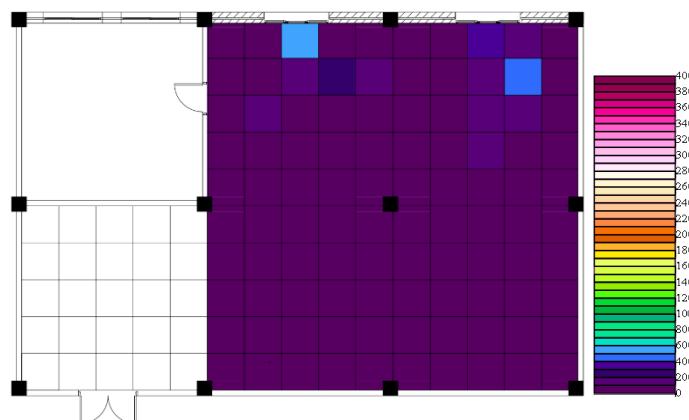


Figure III-19 : Visualisation spatiale de l'éclairement naturel à 12h en fausses couleurs
(Source : Auteur, 2025).

À ce stade, l'élévation du soleil permet une meilleure pénétration lumineuse diffuse, mais l'absence d'ensoleillement direct sur la façade nord-ouest, combinée à la profondeur de la pièce et à la présence du mobilier, empêche une diffusion homogène de la lumière.

La fenêtre, dans sa configuration actuelle, ne permet pas d'exploiter pleinement la lumière disponible. Le rapport surface vitrée/surface murale est insuffisant, et les éléments obstruants (grilles, cadres) limitent la transmission lumineuse (figure III-13).

Le vitrage, par sa finition floutée ou texturée, agit comme un filtre diffusant qui atténue la lumière incidente, sans pour autant l'orienter ou la réfléchir vers les zones plus profondes. Cela limite fortement la portée effective de la lumière naturelle.

III.3.2.1.3 Les mesures du 15h :

Le dernier relevé a été effectué à 15h, heure à laquelle la façade nord-ouest commence à recevoir un ensoleillement direct. Cette séquence est essentielle pour observer l'effet de l'exposition solaire directe sur la répartition de la lumière naturelle, et pour identifier d'éventuelles zones de surexposition ou de déséquilibre lumineux dans l'espace.

Tableau III-3 : Résultats des mesures d'éclairement naturel à 15h (Source : Auteur, 2025).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	40	107	4000	4000	120	62	3210	4000	1725	65
2	67	316	1845	1480	240	83	174	1064	1457	1080
3	226	670	898	243	184	143	180	852	761	350
4	180	336	296	216	178	176	189	353	563	182
5	112	282	230	196	156	164	167	272	273	120
6	65	93	102	129	87	90	123	144	150	46
7	46	43	49	32	61	52	55	56	45	47
8	49	55	41	40	45	46	45	37	35	31
9	42	40	42	45	31	30	46	47	41	34
10	44	45	47	32	41	36	39	48	46	40

D'après les résultats enregistrés à 15h (tableau III-3), une forte élévation de l'éclairement est observée sur l'ensemble des zones proches de la façade nord-ouest. Plusieurs points, comme G1, H1 et I2, affichent des valeurs extrêmes notées « MAX », témoignant d'une surexposition pouvant dépasser les 4000 lux (caractéristique de l'instrument). Cette intensité lumineuse résulte de l'ensoleillement direct en fin de journée, favorable à cette orientation.

Toutefois, certaines zones plus éloignées des ouvertures, notamment dans les couins sud-est (J9 : 34 lux ; J10 : 40 lux), restent faiblement éclairées. Cette configuration est exacerbée par le manque de dispositifs architecturaux adaptés à la diffusion ou au contrôle solaire.

Comme on voit clairement dans (la figure III-17), le plan en fausses couleurs à 15h met en évidence cette distribution déséquilibrée, avec des zones fortement surexposées en rouge vif à proximité de la baie, et des zones toujours sous-éclairées en bleu à l'arrière. Ce contraste visuel accentue les risques de fatigue oculaire, d'éblouissement, et de perte de lisibilité sur les surfaces de travail.

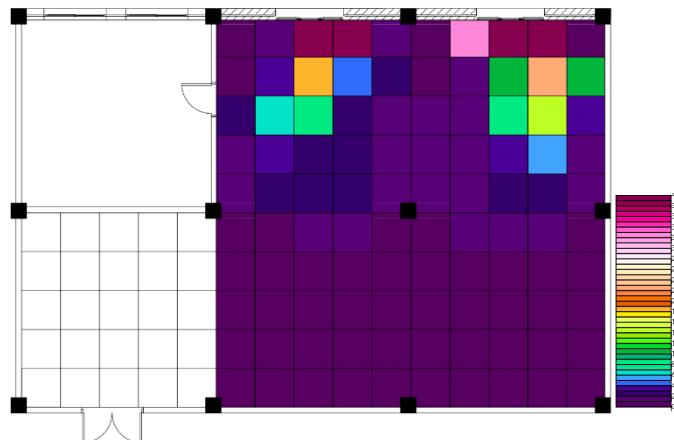


Figure III-20 : Visualisation spatiale de l'éclairage naturel à 15h en fausses couleurs
(Source : Auteur, 2025).

Les fenêtres, bien qu'elle laisse entrer un flux lumineux important à cette heure, ne le distribue pas efficacement dans la profondeur de l'espace. Son ouverture partielle, son modèle à petits vitrages compartimentés, ainsi que la présence de grilles décoratives, entravent la diffusion homogène.

Le vitrage, en raison de sa texture floutée, limite la clarté et la portée de la lumière, ce qui accentue l'effet de concentration lumineuse à l'avant et laisse les zones éloignées dans l'ombre.

Les résultats des mesures d'éclairage réalisées à différents moments de la journée montrent une lumière naturelle très variable dans l'atelier, tant sur le plan spatial que temporel. L'éclairage est insuffisant le matin, peu uniforme à midi, et excessif en façade à 15h, générant des contrastes inconfortables.

Cette situation s'explique notamment par une configuration de la fenêtre peu adaptée : vitrage flouté, surface vitrée limitée, et absence de dispositifs de redirection, ainsi qu'à l'orientation de l'atelier vers le nord-ouest.

L'étude met en évidence la nécessité d'améliorer la conception des ouvertures et le contrôle de la lumière pour garantir un éclairage naturel adapté aux activités artistiques.

III.3.2.2 Interprétation des résultats des mesures de luminance :

Afin d'évaluer objectivement les conditions d'éclairage naturel dans l'atelier, les données issues des campagnes de mesures ont été analysées de manière détaillée. L'interprétation qui suit repose sur une lecture croisée des valeurs relevées, des visualisations en fausses couleurs, des courbes de luminance, ainsi que des photographies réelles de l'espace.

Chaque cas est examiné en tenant compte des spécificités spatiales, de l'orientation, de la nature du vitrage, de la configuration des ouvertures, ainsi que de l'impact du mobilier et des

obstacles environnants. Cette approche permet de relier les observations quantitatives aux causes architecturales et contextuelles, afin d'en dégager des constats précis sur la qualité de la lumière naturelle à différents moments de la journée.

III.3.2.2.1 Les mesures de 9h :

- **Prises 1 et 2 – Vue sur la baie vitrée :**

À 9h, les images issues des Prises 1 et 2 montrent une luminance globalement faible et concentrée (figure III-18). Sur la Prise 1, la fenêtre constitue la principale source lumineuse, apparaissant en teintes chaudes (jaune à rouge), avec des pics de luminance dépassant les 250 à 300 cd/m². Le reste de la scène reste dominé par des teintes froides (bleu-vert), traduisant des luminances inférieures à 100 cd/m².

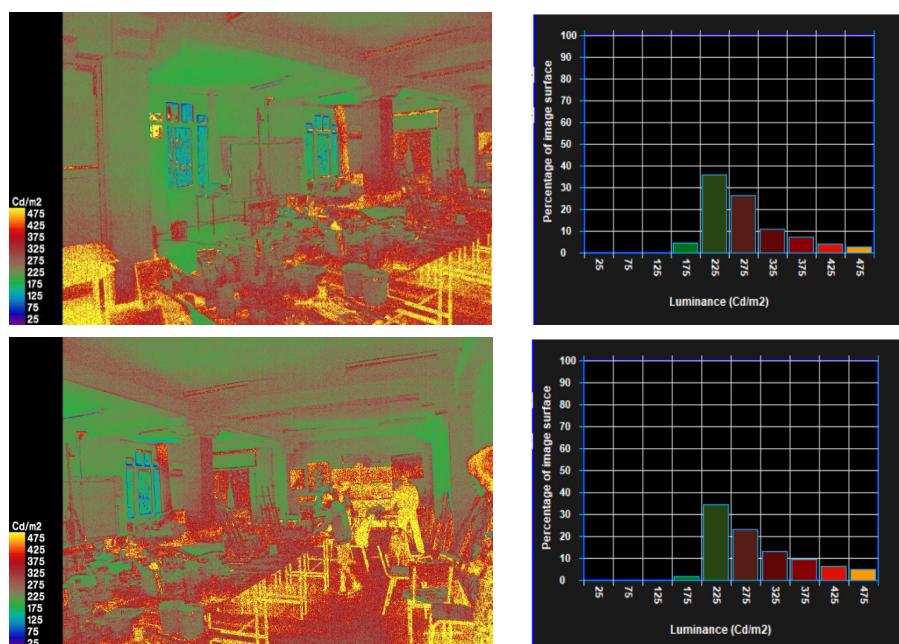


Figure III-21 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prises 1 et 2
(Source : Auteur, 2025)

La Prise 2 révèle une scène encore plus sombre, les surfaces de travail et les murs restant en dessous de 80 cd/m². Les courbes associées montrent une forte disparité de luminance, concentrée en façade, ce qui confirme la mauvaise distribution de la lumière dans l'espace à cette heure.

Cette configuration s'explique par l'orientation nord-ouest, peu favorable à l'ensoleillement du matin, et par un vitrage flouté, qui diffuse et atténue le flux lumineux. Il en résulte une ambiances visuelle contrastée, peu confortable pour une activité artistique exigeant de la clarté.

- **Prises 3 et 4 – Surfaces de travail et ambiance générale :**

Les Prises 3 et 4 illustrent des angles différents de l'atelier à 9h (figure III-19). La Prise 3 offre une vue plus globale, avec quelques zones en teintes vert-jaune près des ouvertures, traduisant une luminance modérée (100–200 cd/m²). Toutefois, la majorité des éléments observés restent en teintes bleutées, avec des valeurs < 80 cd/m².

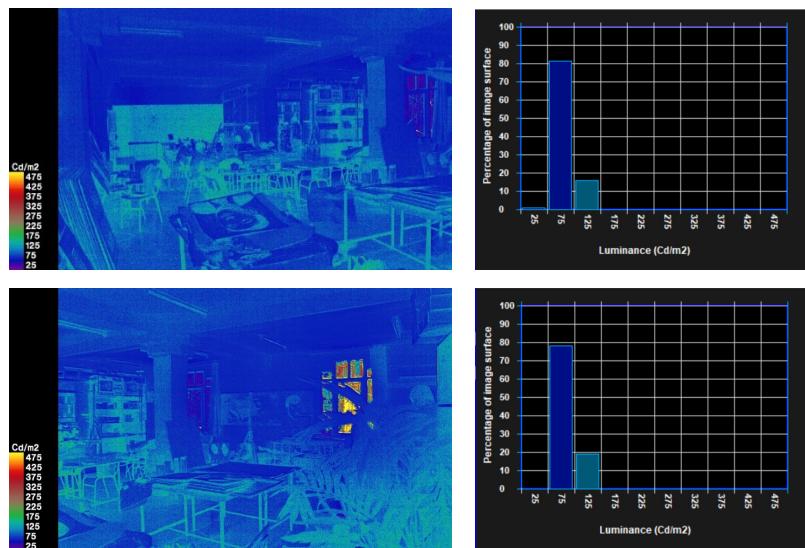


Figure III-22 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prises 3 et 4
(Source : Auteur, 2025)

La Prise 4, centrée sur le sol et le mobilier, montre une luminance particulièrement basse sur les surfaces de travail, ce qui suggère un éclairement inadéquat des zones fonctionnelles.

Le mobilier, les objets opaques et la profondeur de l'espace participent à cette atténuation lumineuse, renforçant les ombres. L'analyse indique un déficit d'uniformité et une luminance fonctionnelle trop faible pour garantir un confort visuel suffisant.

- **Prises 5 et 6 – Profondeur de champ et contraste local :**

Les Prises 5 et 6 à 9h explorent davantage la profondeur de la pièce (figure III-20). La distribution lumineuse y est très hétérogène, avec quelques surfaces en vert clair (autour de 100–150 cd/m²), mais majoritairement des zones sombres.

Les graphes associés montrent des courbes peu étalées, avec des valeurs largement inférieures au seuil de confort recommandé.

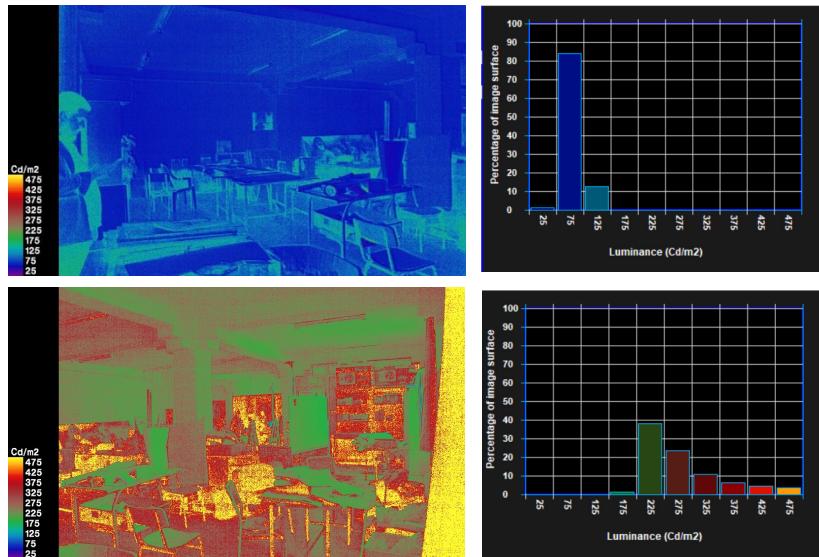


Figure III-23 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prises 5 et 6
(Source : Auteur, 2025)

Cela souligne que la lumière, déjà faible en façade à cette heure, n'atteint pas les zones éloignées. Le vitrage flouté ne permet pas une bonne redirection, et les effets de masques extérieurs aggravent ce phénomène.

- **Prise 7 – Vue latérale en fond d'atelier :**

La Prise 7 réalisée à 9h montre une scène où la luminance est très faible dans l'ensemble du champ (figure III-21). Les teintes froides dominent, traduisant des valeurs < 80 cd/m².

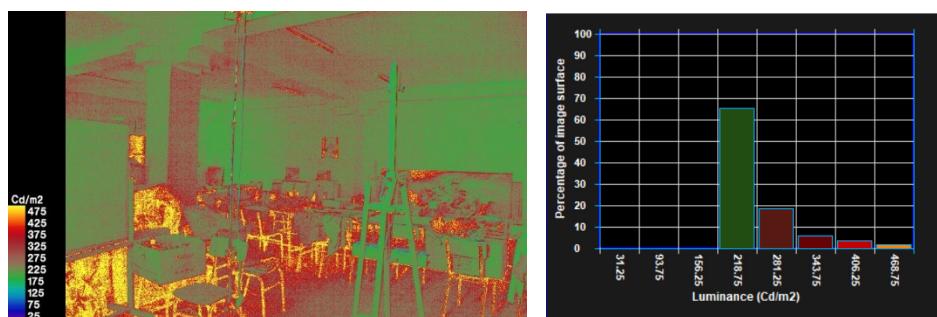


Figure III-24 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 9h, prise 7
(Source : Auteur, 2025)

Aucune zone ne dépasse le seuil des 200 cd/m², et le contraste visuel est faible, ce qui crée une ambiance sombre et visuellement pauvre, peu propice à une tâche artistique.

Cette prise confirme le manque de profondeur de pénétration de la lumière naturelle dans l'atelier à cette heure-là, expliqué par l'orientation nord-ouest puisque le soleil est dans son emplacement dans l'est.

III.3.2.2.2 Les mesures du 12h :

- **Prises 1 et 2 – Vue sur la baie vitrée :**

À 12h, les Prises 1 et 2 révèlent une amélioration légère des conditions lumineuses (figure III-22). Les teintes évoluent vers le vert-jaune, et certaines zones atteignent 150 à 300 cd/m², notamment à proximité des fenêtres ou sur des surfaces réfléchissantes.

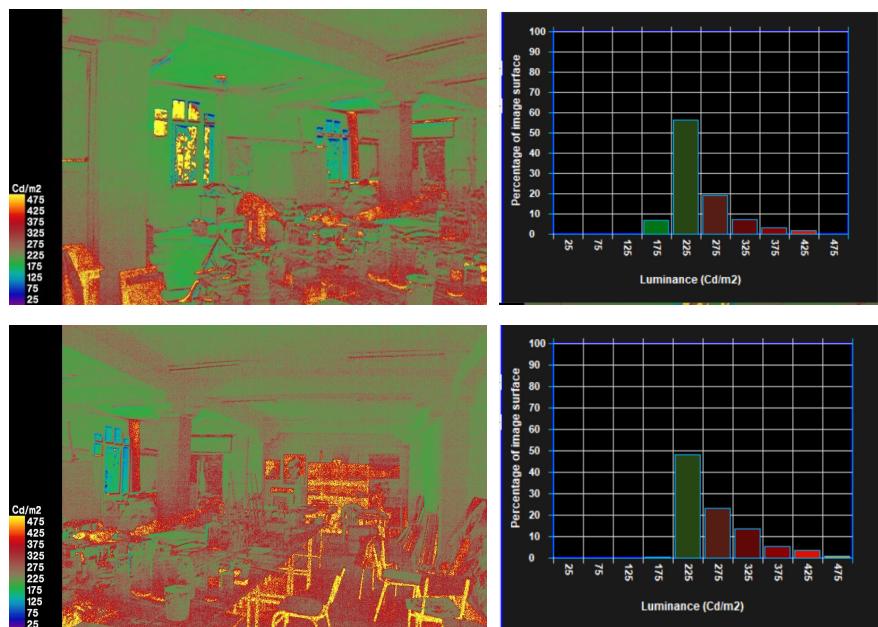


Figure III-25 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prises 1 et 2
(Source : Auteur, 2025)

Toutefois, la répartition reste très inégale. De nombreuses zones latérales ou éloignées conservent des teintes bleues, indiquant une luminance toujours inférieure à 100 cd/m².

Bien que le soleil soit à son zénith, la façade nord-ouest reste dans l'ombre directe, en raison des masques solaires, et les caractéristiques de la fenêtre (le ratio d'ouverture et le vitrage flouté) diffusent sans renforcer la pénétration de la lumière. L'ensemble présente une amélioration modérée, mais encore insuffisante pour assurer un confort visuel généralisé.

- **Prises 3 et 4 – Surfaces de travail et ambiance générale :**

Les Prises 3 et 4 à midi montrent un atelier plus lumineux qu'à 9h, avec davantage de teintes vertes et quelques zones jaune pâle (figure III-3). La luminance atteint localement 200 à 400 cd/m², mais reste très variable.

Les surfaces de travail, observées dans la Prise 4, restent en grande partie sous les 120 cd/m², ce qui reste inférieur aux recommandations pour un bon confort visuel (250 cd/m² minimum pour le dessin par exemple).

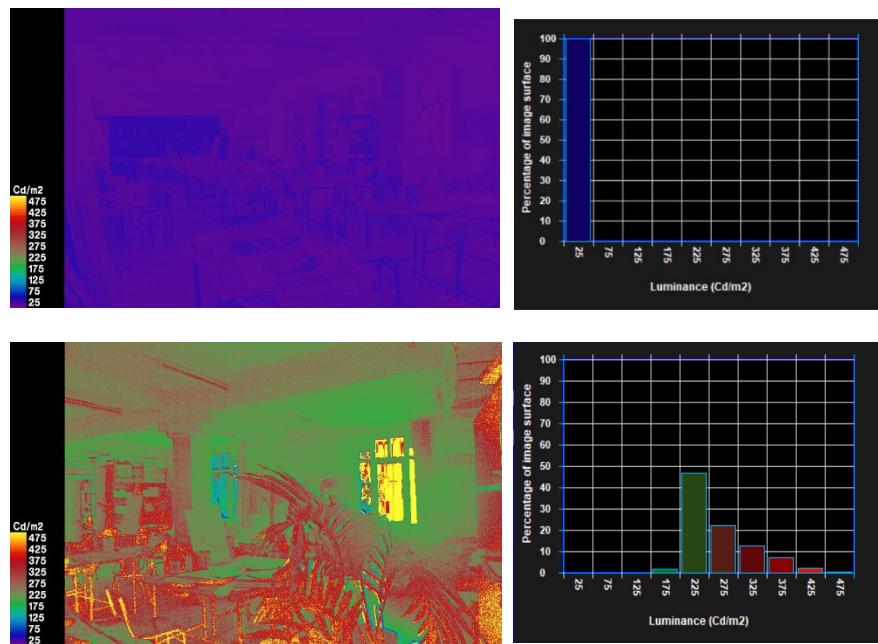


Figure III-26 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prises 3 et 4
(Source : Auteur, 2025)

L'effet de diffusion est ici visible : la lumière se propage un peu plus loin, mais reste atténuée par le vitrage et limitée par l'agencement de l'espace. Le mobilier, les textures sombres et les parois opaques renforcent les zones d'ombre.

- **Prises 5 et 6 – Profondeur de champ et contraste local :**

Les Prises 5 et 6 révèlent une distribution lumineuse contrastée, avec des zones éclairées atteignant 300 cd/m², mais toujours une proportion importante de zones sous-éclairées.

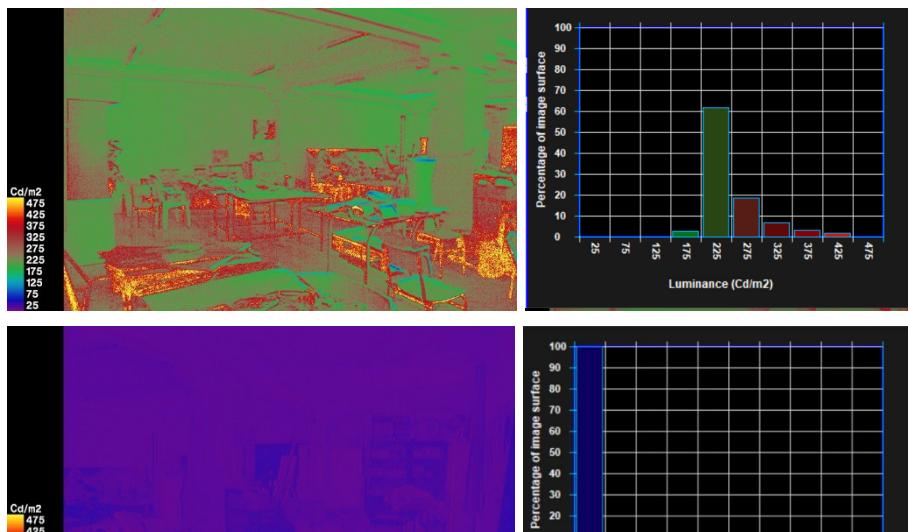


Figure III-27 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prises 5 et 6
(Source : Auteur, 2025)

La luminance est clairement plus présente sur les surfaces verticales que sur les zones de travail horizontales (figure III-24). Cela confirme un éclairage oblique ou latéral, peu efficace pour les tâches de précision.

L'hétérogénéité de la luminance reste un facteur limitant majeur, avec une ambiance visuelle instable et des risques d'inconfort visuel.

- **Prise 7 – Vue latérale en fond d'atelier :**

La Prise 7 à 12h met en évidence un contraste important entre les zones proches de la façade et les parties plus profondes de l'atelier (figure III-25). Les zones éloignées affichent une luminance inférieure à 100 cd/m², parfois même < 50 cd/m².

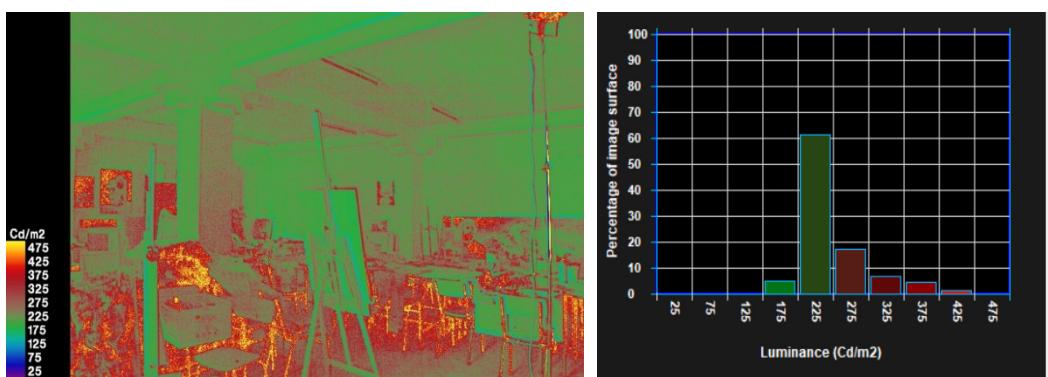


Figure III-28 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 12h, prise 7
(Source : Auteur, 2025)

Le plan en fausses couleurs montre une nette dissymétrie, avec des zones en vert/jaune à l'avant et des teintes bleues en fond. Cette différence souligne le manque d'uniformité de l'ambiance lumineuse à midi malgré des conditions extérieures favorables.

La combinaison d'une fenêtre morcelée et d'un vitrage peu transparent entrave la pénétration lumineuse, notamment dans les zones éloignées des ouvertures, mettant en évidence les limites architecturales et l'inconfort visuel actuels.

III.3.2.2.3 Les mesures du 15h :

- **Prises 1 et 2 – Vue sur la baie vitrée :**

Les fausses couleurs des Prises 1 et 2 (figure III-26) montrent une élévation marquée des niveaux de luminance dans les zones proches de la baie vitrée, où des teintes jaune à rouge indiquent des valeurs dépassant 400 à 600 cd/m², voire davantage.

Cette intensité s'explique par la faveur de l'orientation nord-ouest à cette heure, qui permet à la lumière directe de frapper la façade. Les photos réelles montrent une forte brillance de la fenêtre, confirmée par les pics visibles sur les graphes.

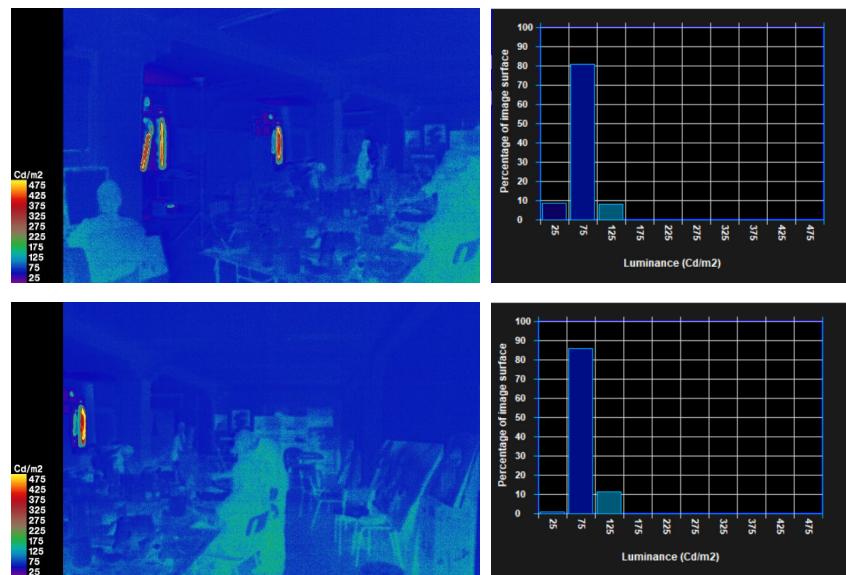


Figure III-29 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prises 1 et 2
(Source : Auteur, 2025)

Toutefois, les zones plus profondes de l'atelier, notamment vers le fond ou à l'opposé des ouvertures, restent faiblement éclairées ($<100 \text{ cd/m}^2$), souvent en bleu ou vert sur les cartes. Le vitrage flouté, bien qu'il admette plus de lumière à cette heure, n'assure pas une diffusion suffisante, et la forme compartimentée de la fenêtre concentre la lumière sur une zone étroite.

Cette configuration génère un fort contraste lumineux, avec un risque d'éblouissement près de la fenêtre, et un manque de visibilité dans les zones en retrait. La distribution demeure non uniforme, posant problème pour l'usage pédagogique.

- **Prises 3 et 4 – Surfaces de travail et ambiance générale :**

La carte de luminance des Prises 3 et 4 montrent une luminance majoritairement basse, avec des teintes dominantes bleues à bleu-vert, soit des valeurs comprises entre 60 et 90 cd/m^2 , centrées autour de 75 cd/m^2 (figure III-27).

Cette lecture est confirmée par les histogrammes, avec une concentration nette dans la classe de 75 cd/m^2 , et très peu de pixels au-delà de 150 cd/m^2 . Aucune zone n'indique de surbrillance marquée.

Bien que la façade nord-ouest soit exposée à la lumière de l'après-midi, l'ombre portée par le bâtiment R+4 de la direction de la culture ainsi que la présence d'arbres du même côté viennent masquer partiellement les ouvertures, réduisant fortement l'entrée de lumière naturelle.

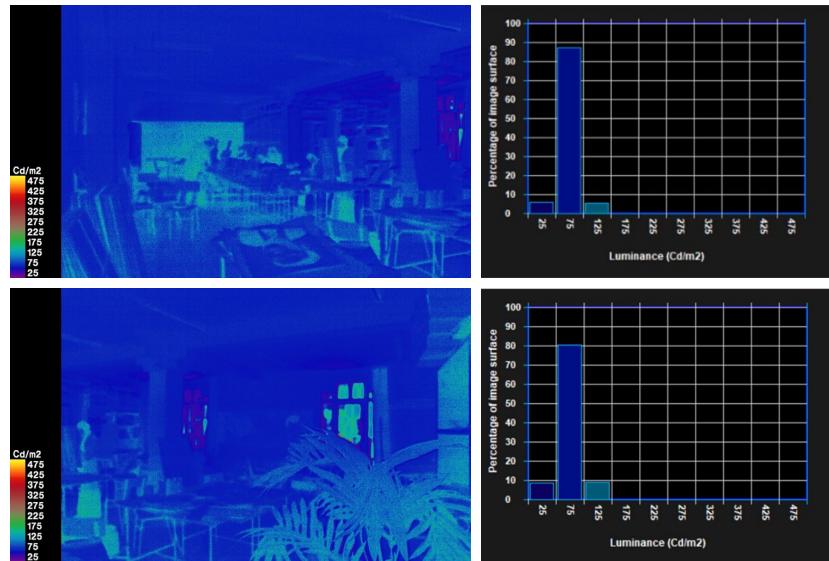


Figure III-30 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prises 3 et 4
(Source : Auteur, 2025)

Ce phénomène est renforcé par le vitrage flouté, qui diffuse sans concentrer la lumière, et par l'absence de surfaces internes réfléchissantes. L'ensemble de la scène conserve donc une ambiance sombre, peu contrastée, peu favorable à la pratique d'activités artistiques nécessitant de la précision visuelle.

- **Prises 5 et 6 – Profondeur de champ et contraste local :**

Les cartes en fausses couleurs des Prises 5 et 6 à 15h montrent une prédominance de teintes bleu-vert, avec peu de zones en jaune (figure III-28). Les valeurs de luminance sont majoritairement comprises entre 65 et 120 cd/m², avec quelques pics atteignant environ 150 cd/m² sur des éléments localisés.

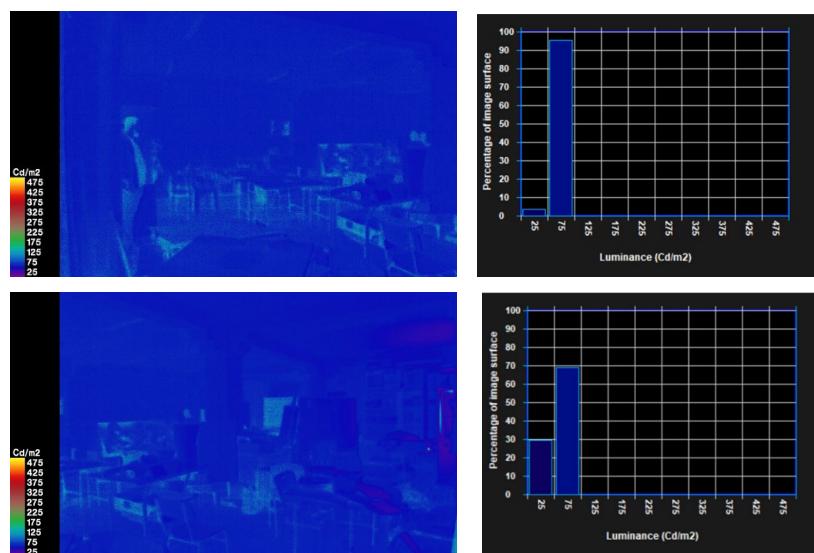


Figure III-31 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prises 5 et 6
(Source : Auteur, 2025)

Les histogrammes associés révèlent une concentration marquée autour de 75 à 100 cd/m², ce qui confirme une ambiance lumineuse modérément faible, malgré l'heure normalement favorable.

Cette situation s'explique notamment par la présence du bâtiment R+4 situé à proximité immédiate côté nord-ouest, qui projette une ombre importante sur la façade vitrée. Les arbres densifient cet ombrage, réduisant encore l'éclairement incident direct sur l'ouverture principale.

De plus, le vitrage flouté empêche une transmission franche de la lumière, et la forme compartimentée de la baie disperse le flux lumineux en plusieurs segments faibles. Ces prises montrent aussi que les surfaces de travail ou le sol restent en dessous des seuils de luminance recommandés pour le confort visuel (>250 cd/m²), ce qui souligne une inefficacité lumineuse fonctionnelle, malgré une lumière extérieure disponible.

- **Prise 7 – Vue latérale en fond d'atelier :**

À 15h, la Prise 7 montre une luminance globalement faible, avec des valeurs concentrées autour de **75 cd/m²**, comme l'indiquent les fausses couleurs et l'histogramme (figure III-29).

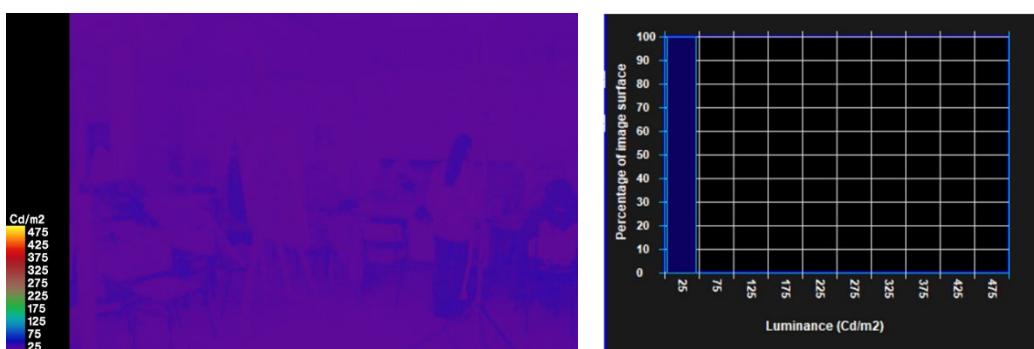


Figure III-32 : Cartes de luminance en fausses couleurs et histogrammes à 15h, prise 7
(Source : Auteur, 2025)

Malgré la présence de deux ouvertures vitrées, le ratio d'ouverture reste insuffisant par rapport à la surface de la pièce, ce qui limite la pénétration lumineuse.

Cette faiblesse est accentuée par les masques extérieurs bloquant partiellement la lumière à cette heure. Il en résulte donc une ambiance visuelle sombre et peu fonctionnelle, surtout dans les zones éloignées des fenêtres.

L'ensemble des interprétations menées à partir des prises de luminance aux trois horaires clés permet de dresser un constat global sur la qualité de l'éclairage naturel dans l'atelier.

- ✓ Les mesures réalisées à 9h, 12h et 15h montrent une luminance globalement faible dans l'atelier, avec des valeurs souvent inférieures à 100 cd/m², en particulier dans les zones éloignées des ouvertures.

- ✓ Malgré la présence de deux baies vitrées, le ratio d'ouverture reste insuffisant pour assurer un bon éclairage naturel, surtout dans un espace profond.
- ✓ L'orientation nord-ouest, associée aux masques extérieurs (bâtiment R+4 et arbres), limite fortement la pénétration lumineuse à toutes les heures.
- ✓ La lumière reste mal répartie, avec des contrastes marqués entre les zones proches des fenêtres et le fond de la pièce, ce qui nuit au confort visuel et à la qualité des conditions de travail.

Les mesures sur site révèlent une cohérence entre les résultats d'éclairement et de luminance, qui confirment tous deux une insuffisance générale de la lumière naturelle dans l'atelier.

Les valeurs d'éclairement sont faibles à 9h et 12h, avec une amélioration localisée à 15h, sans jamais atteindre une distribution uniforme. De même, la luminance reste majoritairement inférieure à 100 cd/m², particulièrement dans les zones profondes, même en condition de ciel clair.

Ces résultats s'expliquent principalement par un ratio d'ouverture limité, la profondeur de l'espace, l'orientation nord-ouest, le vitrage semi-transparent et la présence de masques extérieurs importants (bâtiment voisin et arbres). Il en résulte une ambiance lumineuse peu homogène, avec des contrastes visuels marqués et des zones peu adaptées aux exigences de confort visuel pour des activités artistiques.

III.4 Évaluation qualitative :

L'évaluation qualitative vise à recueillir les perceptions subjectives des usagers des ateliers de dessin et de sculpture concernant la qualité de l'éclairage naturel et son impact sur leur confort visuel. Cette approche complémentaire permet d'enrichir les résultats quantitatifs obtenus précédemment et d'identifier des pistes d'amélioration adaptées aux besoins réels des occupants.

III.4.1 Le protocole :

Pour mener cette étude qualitative, un questionnaire a été élaboré et distribué aux usagers des ateliers artistiques de la Maison de la Culture de Béjaïa. Le questionnaire, anonyme et volontaire, a été conçu pour explorer plusieurs dimensions du confort visuel liées à l'éclairage naturel, notamment :

- L'uniformité de la lumière (répartition homogène ou présence de zones trop éclairées/sombres).

- L'intensité de l'éclairage naturel (suffisante, excessive ou insuffisante).
- Les sources d'inconfort visuel (éblouissement, reflets, ombres gênantes).
- L'impact des caractéristiques des fenêtres (orientation, ratio, type de vitrage) sur la qualité de l'éclairage.

Le questionnaire a été administré à un échantillon diversifié d'usagers, incluant des élèves et des enseignants, afin de refléter une variété de perspectives. Les données collectées ont ensuite été analysées qualitativement pour identifier les tendances principales et les points de convergence/divergence entre les répondants.

III.4.2 Le questionnaire développé

Le questionnaire se compose de deux parties principales :

- Informations générales : Profil des participants (âge, sexe, rôle dans les ateliers).
- Questions spécifiques : Évaluation subjective de l'éclairage naturel et du confort visuel.

Les questions ont été formulées sous forme d'échelle de satisfaction ou de choix multiples (5 choix) pour faciliter les réponses aux participants et cibler l'analyse.

III.4.3 Les participants :

Le nombre de questionnaires déstribué était 30 mais le nombre de réponse était de 15 seulement, répartis comme suit :

- Âge : Majoritairement des jeunes adultes âgés de 18 à 25 ans (étudiants), avec une minorité de répondants âgés de 25 à 45 ans (enseignants).
- Sexe : Une répartition relativement équilibrée entre hommes et femmes.
- Rôle : Principalement des étudiants (99 %) et des enseignants (1 %).

Cette diversité dans le profil des participants garantit une représentation large des expériences et des perceptions liées à l'éclairage naturel dans les ateliers.

III.4.4 Résultats et interprétation :

L'analyse globale des réponses au questionnaire révèle une perception nuancée mais globalement critique de la part des usagers concernant les conditions de lumière naturelle dans l'atelier. Le schéma radar obtenu permet de visualiser rapidement les écarts de satisfaction sur les différents aspects évalués, notamment le confort visuel, la qualité des ouvertures, et l'adaptation aux besoins spécifiques.

Tableau III-4 : Nombre de répondant pour chaque modalité de réponse (Source : Auteur, 2025)

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19
R1	6	1	10	15	3	2	2	10	1	3	1	0	0	0	10	1	1	2	8
R2	2	12	5	0	4	8	11	5	5	0	0	11	4	11	1	1	5	2	2
R3	2	2	0	0	8	2	2	0	1	2	10	1	2	4	4	4	5	1	3
R4	3	0	0	0	0	2	0	0	2	5	1	1	7	0	0	3	2	1	2
R5	2	0	0	0	0	1	0	0	6	5	3	2	2	0	0	6	2	9	0

Le tableau ci-dessus présente la répartition du nombre de répondants pour chaque modalité de réponse aux 18 questions fermées du questionnaire. Cette lecture statistique permet de visualiser directement les tendances dominantes, en complément de l'interprétation graphique réalisée à travers le schéma radar.

➤ Confort visuel perçu : une insatisfaction dominante

Les questions Q1 à Q7, centrées sur la quantité, la répartition et les effets de la lumière, obtiennent des scores faibles à moyens sur le schéma radar (valeurs situées entre 1 et 3 sur une échelle de 1 à 5).

Selon le tableau de réponses, la quantité de lumière (Q1) est jugée insuffisante par la majorité des répondants.

La répartition de la lumière (Q2 et Q3) est perçue comme hétérogène, notamment avec une gêne importante dans les zones éloignées des ouvertures.

Des phénomènes d'éblouissement sont fréquemment signalés (Q4), notamment à 15h, traduisant une exposition excessive en façade et un déséquilibre lumineux global, ce que le graphe radar met clairement en évidence par une chute sur cet axe.

Les réponses indiquent également une forte dépendance à l'éclairage artificiel (Q5), même en journée, ce qui ressort aussi bien du tableau de fréquence que du profil du radar (figure III-30).

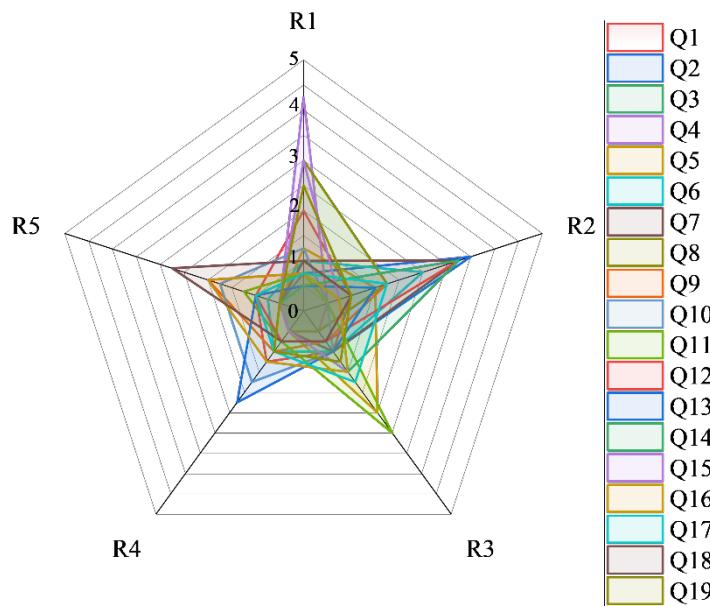


Figure III-34 : Schéma radar résumant les résultats des questionnaires
 (Source : Auteur, 2025)

Ces résultats confirment les constats mesurés et simulés précédemment : l'éclairage naturel est jugé ni suffisant ni bien réparti, affectant le confort visuel global.

➤ Perception des ouvertures : peu adaptées et sous-dimensionnées

Les questions Q8 à Q13, relatives aux caractéristiques des fenêtres, montrent également un niveau de satisfaction faible à modéré, selon le graphe radar, avec une courbe clairement rétractée sur cet ensemble d'axes.

Le nombre et la surface des ouvertures (Q8, Q9) sont jugés insuffisants par la majorité des participants, comme le confirme le nombre élevé de réponses de 1 ou 3 dans le tableau.

La forme des fenêtres (Q10) et leur emplacement (Q11) ne sont pas perçus comme favorables à une bonne diffusion de la lumière.

Très peu d'élèves considèrent les ouvertures adaptées à leur activité artistique (Q12), et beaucoup soulignent l'absence de dispositifs de redirection ou de protection solaire (Q13), ce qui ressort clairement dans les deux sources d'analyse.

Ces réponses indiquent une perception claire d'un manque d'efficacité architecturale des ouvertures : leur forme, leur orientation et leur disposition ne répondent pas aux besoins lumineux réels de l'espace.

➤ Besoins spécifiques non satisfaits

Les questions Q14 à Q18, centrées sur les besoins visuels liés à la pratique artistique, présentent sur le graphe radar une zone particulièrement comprimée vers le centre, traduisant une satisfaction faible à modérée.

Les tâches de précision comme le dessin ou la peinture ne bénéficient pas d'un éclairage jugé adéquat (Q14, Q15), ce que confirment les fréquences des réponses faibles dans le tableau.

Le confort visuel prolongé est remis en cause par une majorité d'usagers (Q16).

La capacité à distinguer correctement les formes et les couleurs (Q17 et Q18) est jugée moyennement satisfaisante à insatisfaisante, un point à nouveau visible sur la dépression graphique de cette zone sur le radar.

Ces réponses traduisent une inadéquation entre les conditions lumineuses actuelles et les exigences visuelles spécifiques aux pratiques artistiques.

L'interprétation des résultats de l'analyse qualitative, à l'aide de schéma radar et des données du tableau de réponses, met en évidence un manque de confort visuel perçu à plusieurs niveaux : quantité de lumière, uniformité, efficacité des ouvertures, et adaptation aux besoins spécifiques.

Ces perceptions confirment les résultats empiriques établis précédemment, et soulignent la nécessité d'une reconfiguration architecturale de l'éclairage naturel dans cet espace pédagogique à travers l'optimisation des caractéristiques des fenêtres.

Conclusion

L'évaluation in situ de la lumière naturelle dans l'atelier de dessin a permis de dresser un état des lieux précis des conditions lumineuses existantes. L'analyse croisée des mesures physiques (éclairement et luminance) et des perceptions des usagers met en évidence des insuffisances claires en matière de confort visuel, notamment en ce qui concerne la quantité de lumière disponible, sa répartition dans l'espace et l'adaptation aux besoins spécifiques des pratiques artistiques.

Si quelques apports lumineux ponctuels sont observés à certaines heures, l'ensemble du dispositif reste globalement inadapté, tant du point de vue de la conception architecturale des fenêtres que de l'usage ressenti.

Cette première phase d'analyse permet ainsi de fonder objectivement la suite de l'étude, qui s'appuiera sur une approche numérique afin de modéliser, simuler et approfondir l'évaluation du confort visuel, dans une perspective d'optimisation.

CHAPITRE IV :

Simulation paramétrique

Introduction

Ce chapitre expose le déroulement de l'étude paramétrique multicritères et du processus d'optimisation, réalisés à l'aide de simulations numériques sous Rhino/Grasshopper. L'objectif est d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres architecturaux (orientation, dimensions des fenêtres et type de vitrage) sur l'éclairement, la luminance et le confort visuel dans l'atelier de sculpture de la Maison de la Culture de Béjaïa. Afin d'assurer la fiabilité des résultats, une phase de validation du modèle numérique a été menée en confrontant les données simulées aux mesures issues de l'étude de terrain. Cette étape a permis de préciser le rôle de chaque paramètre sur les performances lumineuses de l'espace. Enfin, une optimisation multi-objective a été réalisée, dans le but d'identifier la configuration de fenêtres la plus favorable au confort visuel, en réponse aux particularités climatiques de la région de Béjaïa.

IV.1 Simulation paramétrique :

La conception assistée par ordinateur connaît aujourd'hui une évolution marquée, notamment grâce à l'intégration d'outils paramétriques comme Grasshopper, fonctionnant avec Rhinoceros. Ces plateformes permettent une exploration fine des paramètres architecturaux influençant la lumière naturelle. Dans cette étude, l'analyse du confort visuel, en particulier de l'éclairement et de la luminance, a été réalisée en s'appuyant sur les plug-ins Honeybee et Ladybug. Dédiés à la simulation environnementale, ces outils offrent des fonctionnalités avancées pour évaluer la performance lumineuse des espaces. L'optimisation des paramètres a ensuite été réalisée, afin de déterminer les configurations les plus adaptées à l'amélioration du confort visuel (K. Lakhdari, 2021).

IV.1.1 Présentation du logiciel de simulation et des plug-ins utilisés :

Parmi les différents logiciels utilisés pour la simulation des performances lumineuses des bâtiments, cette étude repose sur l'utilisation de Grasshopper, un plug-in de Rhinoceros 3D. Développé par Robert McNeel & Associates, Rhinoceros 3D est un logiciel de conception assistée par ordinateur très utilisé en architecture et en design industriel (K. Lakhdari). Combiné à Grasshopper, il permet la création de géométries complexes à travers une approche de programmation visuelle flexible, où les relations entre les éléments sont établies en connectant des composants graphiques sur un canevas numérique, rendant l'outil plus intuitif que les langages de programmation traditionnels (Fang, 2017).

Dans cette recherche, Grasshopper est enrichi par les plug-ins Ladybug et Honeybee, spécifiquement mobilisés pour simuler le comportement de la lumière naturelle et évaluer le confort visuel à l'intérieur des espaces. Ladybug permet l'importation de données climatiques au format EnergyPlus (epw) et leur exploitation graphique (roses des vents, études d'ensoleillement, rayonnement solaire). Honeybee utilise des moteurs de simulation validés (figure IV-1) tels que Radiance pour l'analyse de la luminance et de l'éclairement, et Daysim pour les calculs dynamiques de lumière du jour (Ward, 2004 ; Reinhart et Walkenhorst, 2001). Ces outils ont été choisis pour leur fiabilité et leur pertinence dans l'étude des ambiances lumineuses, conformément aux standards scientifiques actuels (Roudsari et al., 2013).

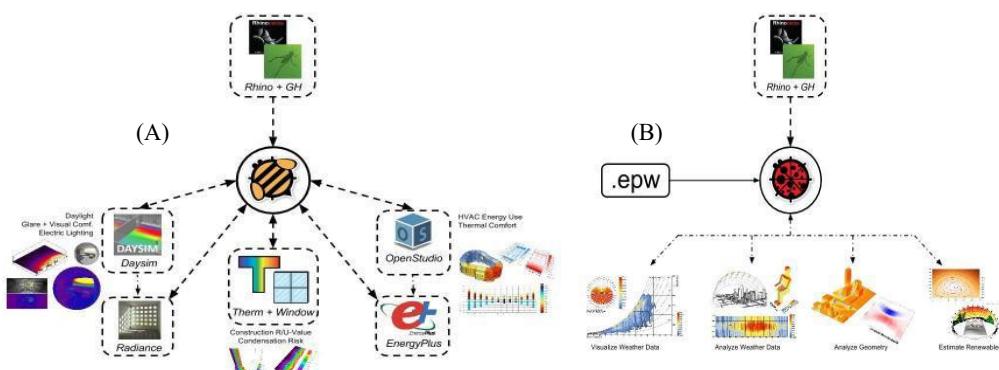


Figure IV-1 : (A) Honeybee (B) Ladybug plug-ins pour grasshopper 3D.
(Source: <https://parametricmonkey.com>)

Dans le cas présent, ces outils reposent sur le moteur de simulation Radiance, développé par Greg Ward au Lawrence Berkeley National Laboratory, reconnu pour sa capacité à modéliser de manière réaliste le comportement de la lumière. Radiance prend en compte la géométrie de la scène, les caractéristiques optiques des matériaux ainsi que les conditions d'éclairage naturel ou artificiel, offrant ainsi une grande précision dans l'évaluation du confort visuel (Ward, 1995).

II.1.2 Processus de validation du modèle numérique :

Dans le but d'évaluer le confort visuel dans l'atelier étudié et comparer les données mesurées sur site avec des résultats simulés, une modélisation numérique de l'atelier a été réalisée à l'aide des outils Ladybug et Honeybee, intégrés à Grasshopper pour Rhino. Ces plugins permettent d'effectuer des simulations précises d'éclairement naturel à partir de données météorologiques réelles.

La simulation a été paramétrée pour le 6 mai, date correspondant exactement à celle des mesures in situ. Le choix de cette date permet d'assurer une comparabilité directe entre les données simulées et les observations réelles.

Le processus a débuté par la construction d'un modèle 3D précis de l'atelier à l'aide du logiciel Rhino. Ce modèle intègre les dimensions réelles de l'espace (longueur, largeur, hauteur sous plafond), la position exacte des deux ouvertures vitrées situées sur la façade nord-ouest, ainsi que les éléments fixes influençant la lumière, tels que les murs, le sol, le plafond et une simplification du mobilier. Les masques extérieurs majeurs, à savoir le bâtiment voisin R+4 et les arbres présents côté nord-ouest, ont également été modélisés pour refléter les conditions réelles du site (figure IV-2).

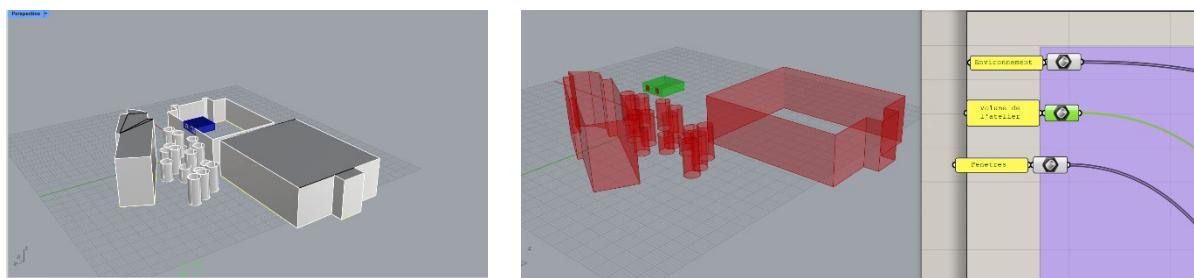


Figure IV-2 : Modélisation en 3d et paramétrage sur Grasshopper

(Source : Auteur,2025)

L'orientation du bâtiment a été respectée, en veillant à positionner correctement la façade principale. Les données météorologiques ont été intégrées via un fichier EPW correspondant à la localisation réelle de Béjaïa, afin de simuler les conditions d'éclairement du 6 mai, date identique à celle des mesures in situ.

Les paramètres de simulation ont ensuite été définis avec précision. Le type d'étude choisi est une analyse d'éclairement naturel (Illuminance Analysis), en modifiant les horaires pour chaque cas : 9h, 12h et 15h, en condition de ciel clair. Le plan de mesure a été placé à 80 cm de hauteur, conformément aux relevés réels effectués avec le luxmètre. La résolution du maillage (grid size) a été adaptée à la taille de l'espace, de manière à couvrir la zone d'occupation principale de l'atelier (figure IV-3).

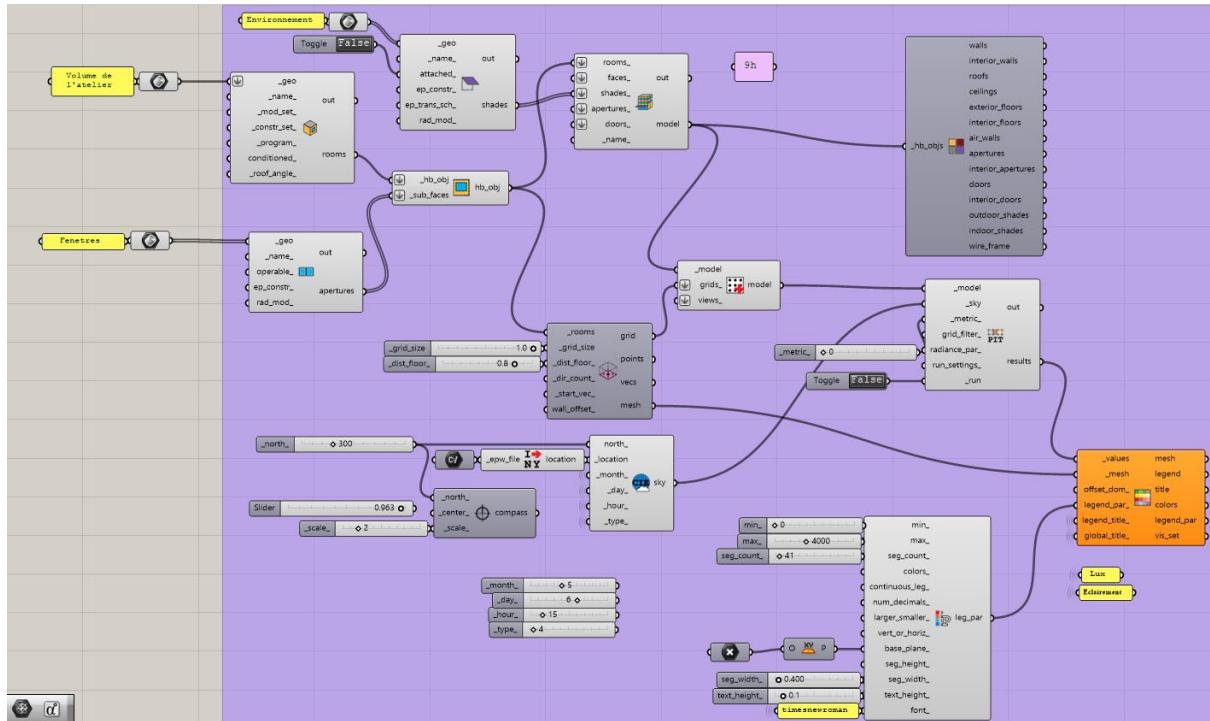


Figure IV-3 : Processus du paramétrage du modèle de simulation (Source : Auteur, 2025)

Chaque simulation a été lancée séparément dans Honeybee, générant des plans en fausses couleurs traduisant les niveaux d'éclairement (en lux) pour chaque horaire. Les résultats ont ensuite été exportés sous forme d'images. Ces résultats sont interprétés et comparés aux mesures in situ, afin d'évaluer la fiabilité du modèle et de tirer des conclusions sur la qualité de la lumière naturelle dans l'atelier.

II.1.3 Résultats et interprétation :

L'analyse représente la configuration existante de l'atelier sans intervention sur les paramètres architecturaux. Ce modèle de référence permet d'établir une base comparative avec les mesures effectuées in situ, afin de valider le modèle et le processus de simulation.

II.1.3.1 La simulation à 9h :

À 9h, les résultats de simulation montrent une dominance des teintes bleu foncé à bleu clair, correspondant à des valeurs inférieures entre 500 et 700 lux près des fenêtres, et dans le reste de la salle, inférieures à 100 lux, selon l'échelle fournie (figure IV-4).

Ces valeurs sont nettement en dessous des seuils recommandés pour les activités de dessin ou de sculpture, qui nécessitent généralement un éclairement supérieur à 500 lux sur les plans de travail.

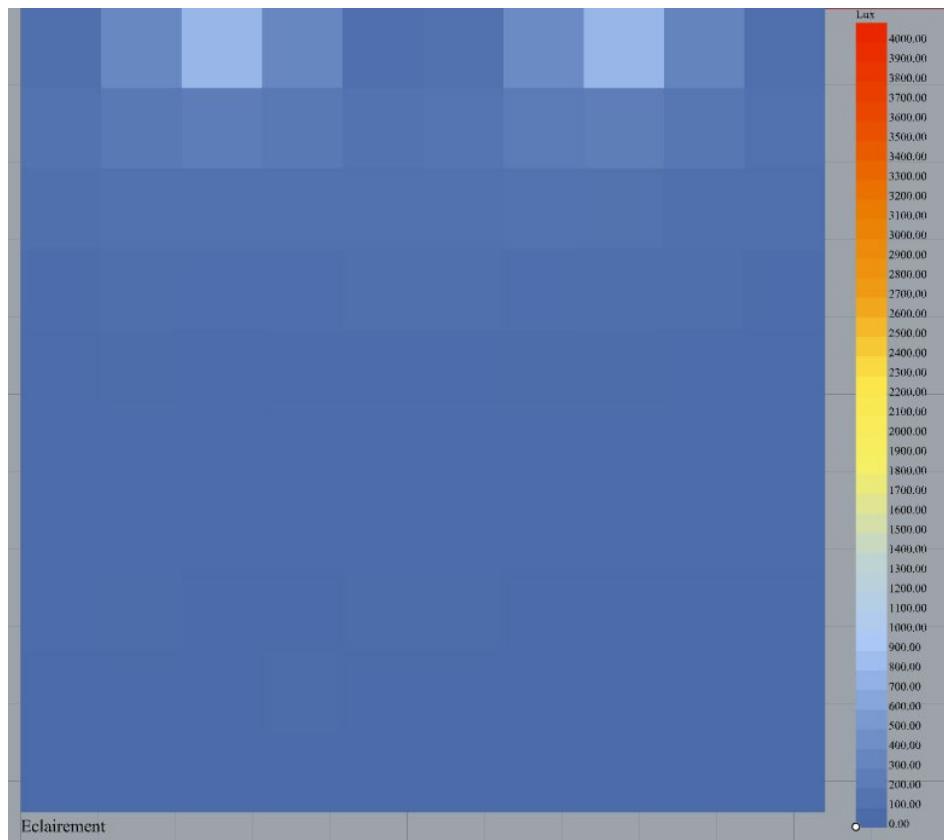


Figure IV-4 : Résultat de simulation d'éclairement à 9h (Source : Auteur, 2025)

Cette faiblesse généralisée de l'éclairement s'explique par la mauvaise orientation nord-ouest à cette heure de la journée, qui maintient la façade dans l'ombre. De plus, la présence du bâtiment en R+4 et des arbres situés juste en face des baies vitrées accentue l'ombrage extérieur, réduisant l'accès au ciel clair.

Malgré la présence de deux ouvertures vitrées, le ratio d'ouverture reste faible par rapport à la profondeur de la pièce. La lumière naturelle pénètre peu, et sa diffusion est limitée, d'où une ambiance uniformément sombre, confirmée à la fois par la simulation et les mesures in situ.

II.1.3.2 La simulation à 12h :

À 12h, les résultats de simulation montrent une luminance plus faible encore qu'à 9h, avec des teintes bleues foncées très marquées dans l'ensemble de l'espace, traduisant des niveaux d'éclairement majoritairement inférieurs à 300 lux, et souvent proches de 100 lux, avec quelques nuances en bleu claires qui indiquent des valeurs près de 600 lux dans les zones les plus proches aux fenêtres.

Contrairement à ce qu'on pourrait attendre à midi, l'atelier ne bénéficie pas d'un apport lumineux efficace, du fait de l'absence d'ensoleillement direct sur la façade nord-ouest (figure IV-5).

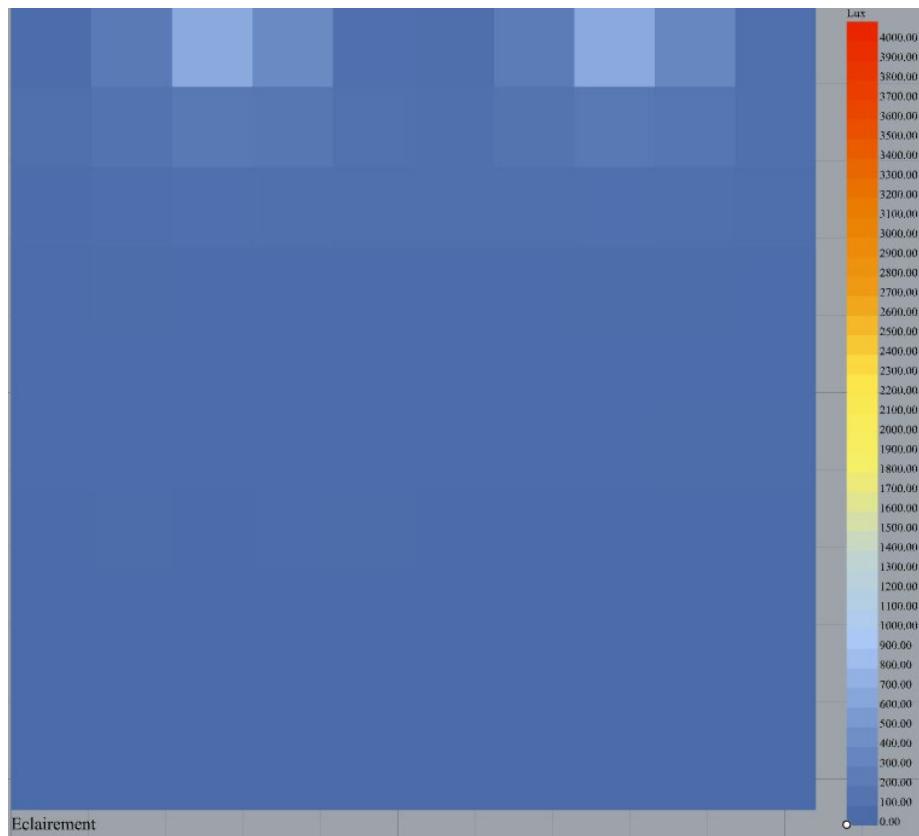


Figure IV-5 : Résultat de simulation d'éclairement à 12h (Source : Auteur, 2025)

L'ombrage diffus causé par les masques solaires bloque une partie significative du ciel visible, et la lumière du zénith reste insuffisamment captée par les ouvertures. Le ratio vitré réduit, combiné à la profondeur du local, limite fortement la diffusion de la lumière naturelle dans l'espace.

Comparé à la simulation de 9h, la situation est plus sombre à 12h, avec une répartition plus homogène, mais trop faible pour satisfaire aux exigences du confort visuel.

II.1.3.3 La simulation à 15h :

À 15h, la simulation montre une élévation marquée de l'éclairement naturel dans la zone proche des ouvertures, avec des valeurs dépassant 4000 lux, visibles en rouge intense sur les fausses couleurs (figure IV-6). Ces niveaux traduisent une surexposition importante, bien au-delà des seuils recommandés pour le confort visuel dans un tel espace (idéalement entre 500 et 2500 lux, selon l'activité artistique).

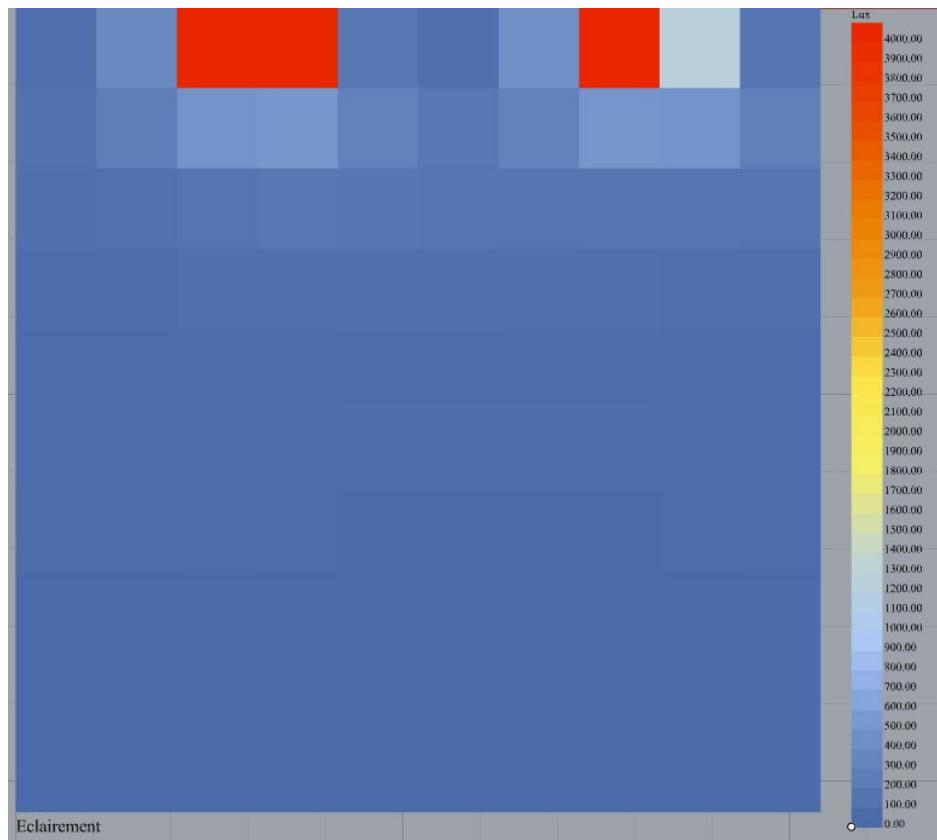


Figure IV-6 : Résultat de simulation d'éclairement à 15h (Source : Auteur, 2025)

Cette surexposition s'explique par la faveur de l'orientation nord-ouest à cette heure, lorsque le soleil commence à frapper la façade latéralement. Toutefois, cet apport lumineux n'est ni diffusé ni contrôlé, du fait d'un ratio d'ouverture limité combiné à l'absence de systèmes de redirection ou de protection solaire.

À l'opposé, les zones éloignées des baies vitrées, en fond de salle, conservent un niveau d'éclairement modéré à faible, souvent inférieur à 100 lux, ce qui apparaît en teintes bleues foncées. Cette inégalité est accentuée par la profondeur de l'atelier et la présence des masques extérieurs, qui maintiennent certaines parties dans l'ombre.

Il en résulte une grande disparité spatiale de la lumière, avec d'un côté un risque d'éblouissement ou de fatigue visuelle près des ouvertures, et de l'autre des zones peu éclairées, peu propices à un travail artistique précis. Ce contraste visuel excessif est peu favorable à la concentration et au confort oculaire, en particulier pour des usagers évoluant dans un espace sans éclairage artificiel complémentaire.

Afin d'évaluer la précision du modèle numérique établi et de renforcer la crédibilité des résultats simulés, une comparaison a été effectuée entre les données issues de la simulation d'éclairement naturel et les mesures prises sur site à différentes heures de la journée.

Ainsi, la confrontation des résultats simulés avec les données mesurées sur site révèle une cohérence globale satisfaisante, tant en termes de valeurs d'éclairement que de répartition spatiale de la lumière.

À 9h, les deux méthodes confirment un éclairement très faible, concentré près des ouvertures, avec des zones profondes largement sous-éclairées.

À 12h, les simulations et les mesures indiquent une ambiance lumineuse globalement sombre, malgré la clarté extérieure, avec des valeurs souvent inférieures à 300 lux.

À 15h, les deux approches révèlent une forte surexposition localisée à l'avant de l'atelier (>4000 lux en simulation), contrastant avec la persistance de zones insuffisamment éclairées en fond de salle arrivée jusqu'à moins de 100 lux.

Cette concordance entre données empiriques et numériques permet de valider le processus de simulation, en démontrant sa capacité à reproduire fidèlement les conditions lumineuses réelles. Elle confère ainsi une légitimité méthodologique à l'usage de Ladybug et Honeybee pour l'évaluation du confort visuel dans l'espace étudié.

IV.2 Approche paramétrique et optimisation multicritère :

Une fois le modèle numérique validé, une exploration paramétrique a été menée afin d'analyser l'impact de différents paramètres architecturaux sur la qualité de l'éclairage naturel dans les ateliers d'art. L'espace étudié c'est le même atelier étudié dans l'étude empirique.

L'analyse s'est articulée en plusieurs phases. Dans un premier temps, une comparaison du confort visuel a été réalisée entre diverses configurations d'ateliers, notamment selon les caractéristiques et le ratio des ouvertures. Ensuite, l'étude s'est focalisée sur l'effet de plusieurs variables, telles que l'orientation, le type de vitrage et la forme de l'espace, influençant le ratio de surface vitrée. L'objectif était de comprendre leurs effets croisés sur la distribution de la lumière naturelle. Enfin, une phase d'optimisation multicritère a été engagée afin de déterminer les scénarios les plus favorables en matière de confort visuel, tout en tenant compte des exigences spécifiques liées aux pratiques artistiques.

IV.2.1 Paramètres de simulation :

Le confort visuel offert par la lumière naturelle dans un atelier artistique est fortement influencé par les caractéristiques physiques des ouvertures vitrées. Pour analyser l'impact de certaines décisions de conception sur l'éclairage intérieur, plusieurs paramètres clés ont été retenus.

L'étude paramétrique s'intéresse notamment à la proportion de surface vitrée par rapport à la façade, l'orientation de l'atelier selon les points cardinaux, le type de vitrage utilisé et à la forme de la pièce.

Ces variables ont été choisies afin d'évaluer leur effet sur la distribution spatiale et l'intensité de la lumière naturelle, en vue d'optimiser le confort visuel des usagers et de répondre aux besoins spécifiques des pratiques artistiques.

VI.2.1.1 Ratio d'ouvertures des fenêtres de la façade

Le ratio d'ouverture des fenêtres constitue un paramètre clé influençant la performance lumineuse du bâtiment. Afin d'évaluer son impact, les dimensions des ouvertures vitrées ont été modifiées de manière paramétrique en fonction du rapport surface vitrée/surface de façade. Ce ratio a été fait varier entre 0,2 et 0,8, par paliers de 0,2, (figure VI-7).

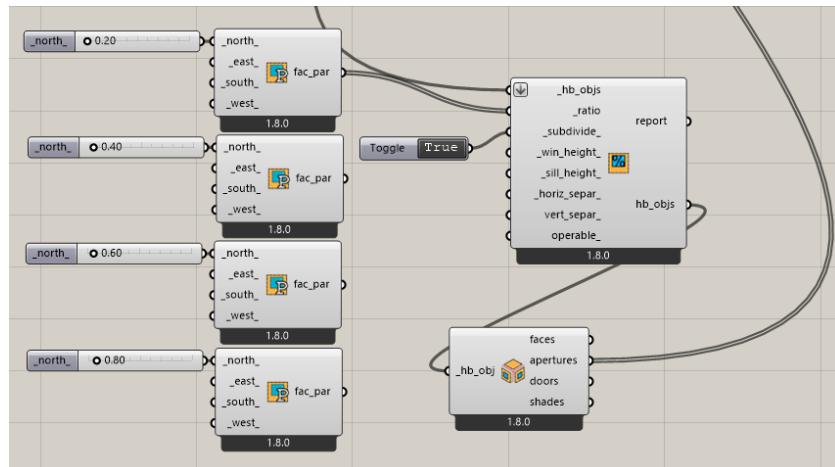


Figure IV-7 : Paramétrage de différents scénarios (Source : Auteur, 2025)

Les autres paramètres, tels que l'orientation de l'atelier, le type de vitrage utilisé et la géométrie de l'espace, ont été maintenus constants, conformément aux conditions définies dans le modèle de référence.

VI.2.1.2 Orientation

L'analyse a également examiné l'effet de l'orientation des ouvertures vitrées sur la performance lumineuse des ateliers. Pour cela, l'orientation des fenêtres a été modifiée selon les quatre directions cardinales principales : nord, sud, est et ouest. En précisant que les autres caractéristiques resteront fixes.

VI.2.1.3 Types de vitrage :

Le type de vitrage influence directement la quantité et la diffusion de la lumière naturelle dans un espace intérieur. Pour cette étude, trois types de verre ont été sélectionnés (voir Tableau VI-1). Ils ont été testés dans un scénario de référence en maintenant constants l'orientation est (où l'ensoleillement matinal est direct et intense) et un ratio d'ouverture de 0.5.

Tableau IV-1 : Types de vitrage considérés (Source : Auteur, 2025)

Type	Clair	Teinté	Flouté (opalin)
Transmittance visible	0.9	0.68	0.72

L'objectif était de déterminer quel vitrage permet d'optimiser simultanément la quantité de lumière naturelle, sa répartition spatiale, et la réduction de l'éblouissement, paramètres essentiels dans un atelier de dessin.

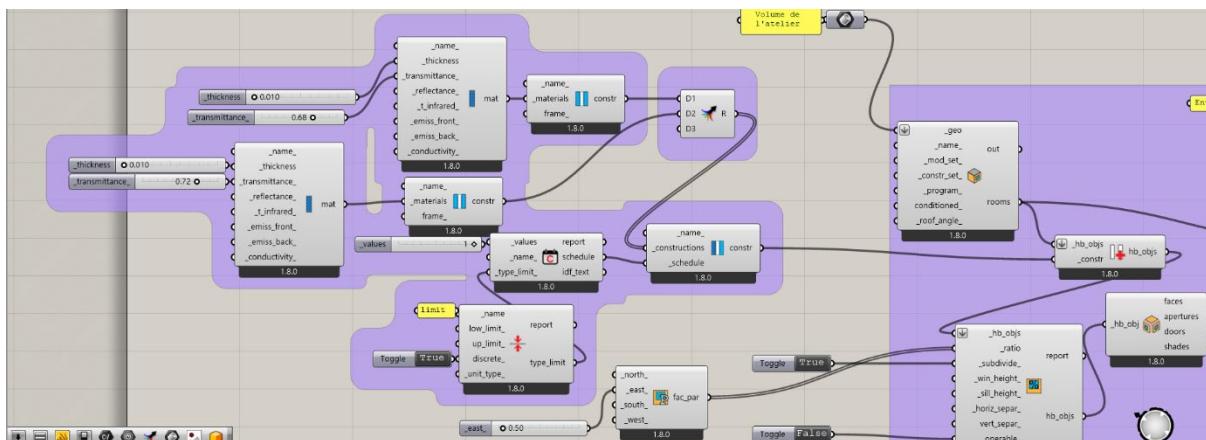


Figure IV-8 : Paramétrage des types de vitrage (Source : Auteur, 2025)

La figure si dessus (figure IV-8) montre la méthode du paramétrage des types de vitrages selon leurs facteurs de transmittance.

VI.2.1.4 Forme de l'espace :

La forme de l'atelier a également été étudiée comme variable influençant les conditions de lumière naturelle. À l'origine, l'espace présentait une configuration presque carrée, mais afin d'analyser l'effet de la géométrie sur la répartition lumineuse, sa forme a été modifiée en réduisant la profondeur tout en conservant la même surface totale. La nouvelle configuration adoptée est un rectangle de 15 m par 7,21 m, permettant ainsi d'examiner comment un allongement du plan influence la pénétration et l'uniformité de la lumière naturelle dans l'espace, en lien avec les exigences des activités artistiques.

VI.2.2 Indicateur de la simulation

L'évaluation de la performance lumineuse de l'atelier s'appuie sur l'éclairage utile de la lumière du jour (UDI). L'analyse a été menée à trois moments de la journée : 9h, 12h et 15h, afin de comparer les effets des différentes configurations testées sur la qualité de l'éclairage naturel à différents instants.

Cet indicateur a été choisi pour sa pertinence dans l'appréciation du confort visuel dans un espace destiné à la pratique artistique.

VI.3 Résultats de l'étude paramétrique

Les résultats qui suivent mettent en évidence l'impact des différents paramètres testés sur la qualité de l'éclairage naturel dans l'atelier. L'objectif est d'identifier les configurations offrant les meilleures conditions de confort visuel.

VI.3.1 Modèle de la variante ratio de fenêtre/mur (Mr) :

Les simulations montrent clairement que l'augmentation du ratio d'ouverture ($0.2 \rightarrow 0.8$) entraîne une élévation significative des niveaux d'éclairage dans tous les cas (figure IV-9).

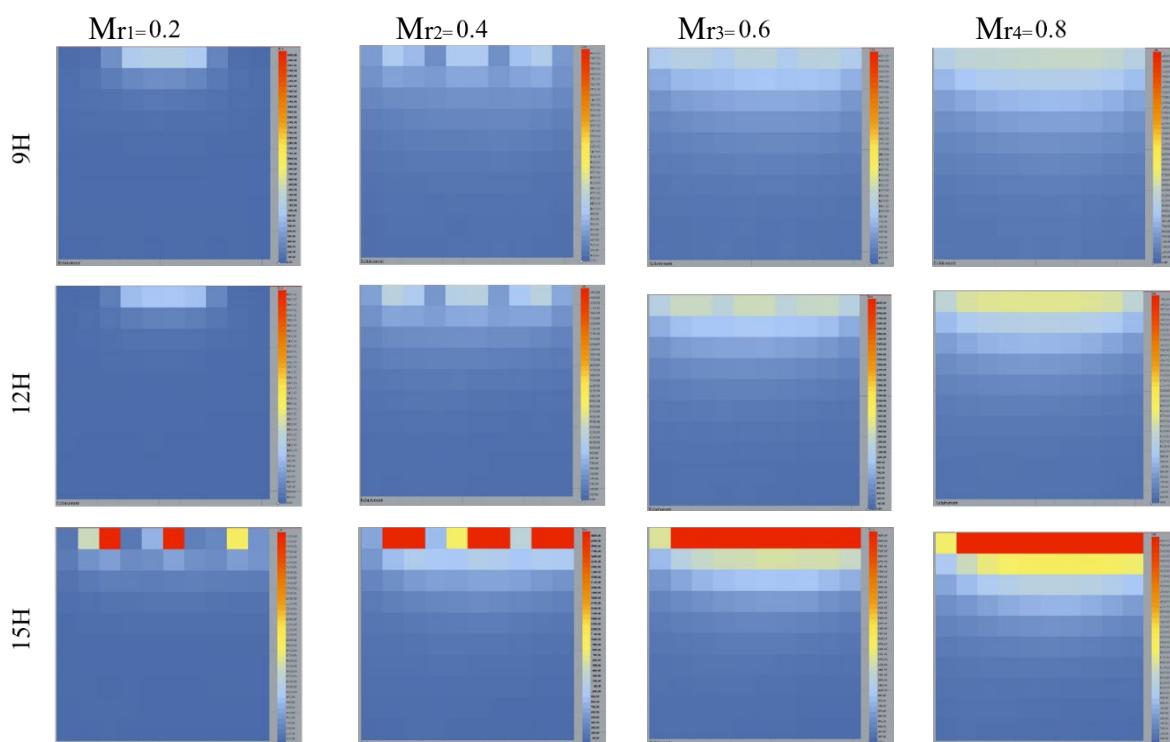


Figure IV-9 : Résultats des simulations du Mr (Source : Auteur, 2025)

- À 0.2, la majorité des zones sont en dessous de 500 lux, même à midi, ce qui est insuffisant pour un atelier de dessin.
- À 0.8, les valeurs dépassent fréquemment les 3000 lux, notamment à 15h en orientation sud et ouest, créant un risque d'éblouissement.

- Les ratios intermédiaires (0.4 à 0.6) produisent des éclairements compris entre 800 et 2500 lux, plus stables, sans surexposition excessive.

Conclusion : Le ratio 0.6 semble le plus équilibré, permettant un éclairage conforme aux normes (500–2500 lux), sans générer de contrastes trop violents ni de zones trop sombres.

VI.3.2 Modèle de la variante orientation (Mo) :

Les quatre orientations ont donné des résultats contrastés (figure IV-10) :

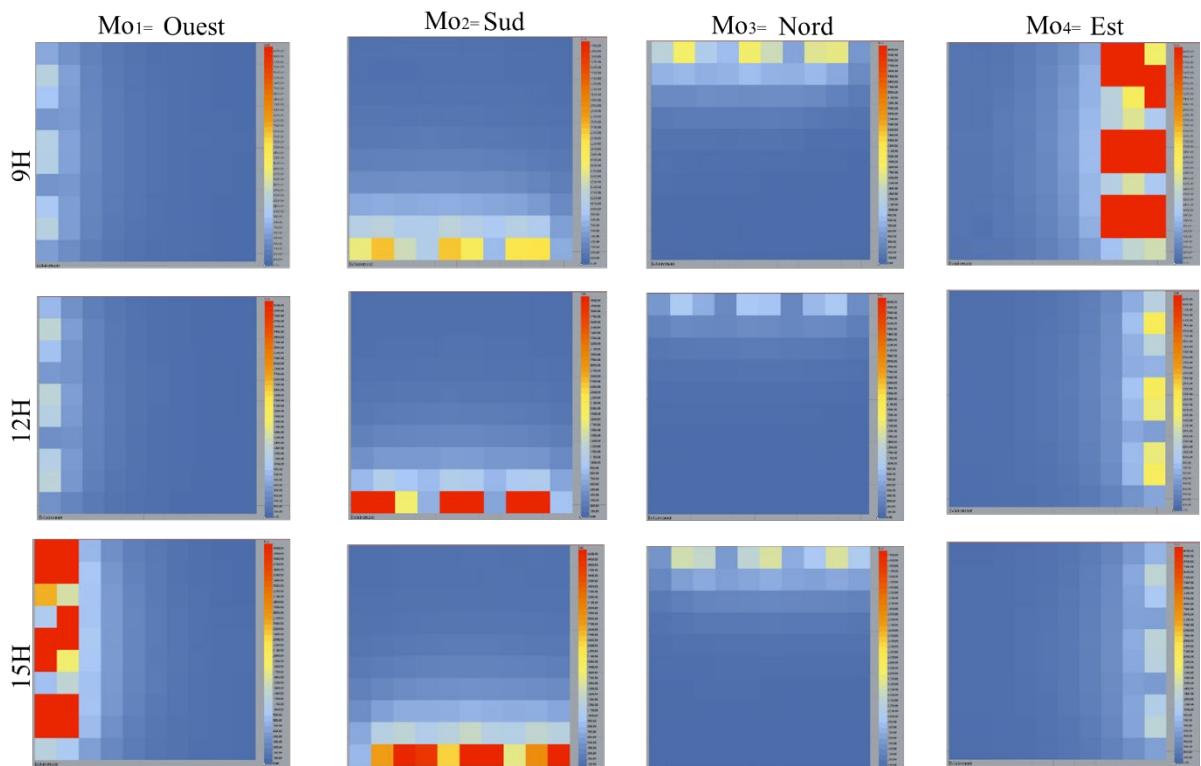


Figure IV-10 : Résultats des simulations du Mo (Source : Auteur, 2025)

- Orientation sud : éclairage élevé, voire excessif à 12h et 15h (pics > 4000 lux) → bon niveau de lumière mais risque de suréclairage et d'éblouissement.
- Orientation ouest : peu performant à 9h, mais très lumineux à 15h → risque de lumière tardive trop directe.
- Orientation est : bon éclairage à 9h, baisse vers 15h → bon choix pour lumière du matin, adapté aux horaires scolaires.
- Orientation nord : lumière douce, homogène, mais trop faible en profondeur, surtout à 9h et 15h.

Les orientations est et sud permettent un bon apport lumineux, mais seule l'est limite naturellement l'éblouissement, ce qui la rend préférable si combinée à un ratio maîtrisé.

VI.3.3 Modèle de la variante type de vitrage (Mtv) :

Le vitrage clair, comme attendu, génère les niveaux d'éclairement les plus élevés, atteignant des valeurs supérieures à 4000 lux dès 9h, notamment à l'avant de l'espace. Toutefois, cette lumière abondante s'accompagne de pics de surexposition et de forts contrastes avec le fond de la salle, entraînant un éblouissement marqué et une non-uniformité lumineuse importante, peu propices à un confort visuel durable (figure IV-11).

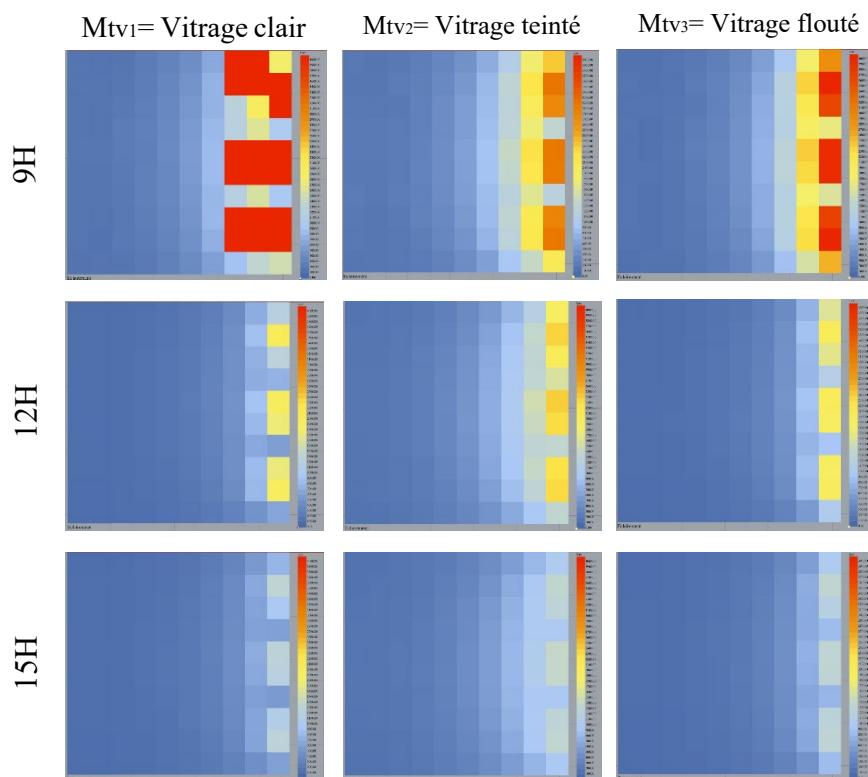


Figure IV-11 : Résultats des simulations du Mtv (Source : Auteur, 2025)

Le vitrage flouté, en revanche, offre une lumière plus diffuse et douce, avec une réduction nette de l'éblouissement dans les zones proches des ouvertures. Cependant, des zones rouges persistent à 9h, traduisant un éblouissement ponctuel, tandis qu'à 15h, on observe un manque considérable de lumière en profondeur, notamment dans les bandes arrière de l'atelier. La performance globale de ce vitrage reste donc limitée, en particulier pour les tâches visuelles exigeantes.

Le vitrage teinté apparaît comme le meilleur compromis. Il permet de maintenir des niveaux lumineux confortables (avoisinant les 2500–3000 lux à l'avant), tout en évitant les pics d'éblouissement. De plus, la répartition lumineuse est plus régulière, avec une pénétration

suffisante de la lumière jusqu'à l'arrière de l'espace. Ce vitrage assure ainsi une bonne uniformité, une quantité de lumière adéquate, et une réduction effective de l'inconfort visuel, répondant aux exigences d'un atelier artistique.

En conclusion, dans cette configuration (orientation est, ratio 0.5), le vitrage teinté est le plus performant pour assurer un éclairage naturel équilibré, éviter l'éblouissement, et favoriser le confort visuel des usagers.

VI.3.4 Modèle de la variante forme de l'espace (Mf) :

La configuration géométrique de l'atelier influence significativement la répartition de la lumière naturelle. Deux formes ont été comparées dans cette étude : une forme carrée, celle simulée dès le début du travail, et une forme rectangulaire de même surface. Les simulations ont montré que la forme carrée permet une distribution plus homogène de l'éclairement, avec moins de contraste entre les zones proches des ouvertures et celles situées en profondeur. À l'inverse de ce qui est connu, la forme rectangulaire tend à créer un gradient lumineux plus marqué, notamment lorsque les ouvertures sont disposées sur les petits côtés, ce qui entraîne un éclairage insuffisant dans les zones les plus éloignées, dans cette simulation il a été observé que l'efficacité lumineuse de la forme rectangulaire peut être améliorée lorsque les fenêtres sont placées sur les longs côtés du local.

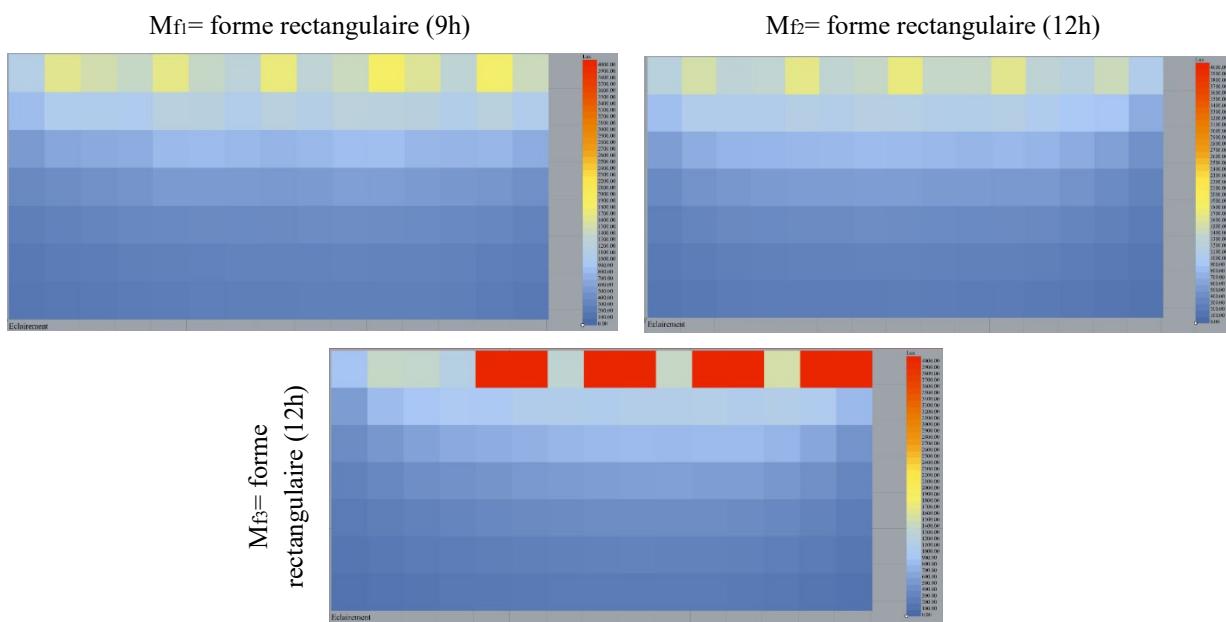


Figure IV-12 : Résultats des simulations du Mf (Source : Auteur, 2025)

Cette configuration permet de mieux couvrir la profondeur de l'espace et d'assurer une répartition plus équilibrée de la lumière naturelle, contribuant ainsi à un meilleur confort visuel.

IV.4 Optimisation du modèle :

Dans le cadre du processus d'optimisation paramétrique, deux configurations architecturales ressortent comme les plus performantes en termes de confort visuel dans un atelier de dessin. Ces deux modèles associent un ratio d'ouverture de 0.6, une orientation est (bénéfique pour les horaires scolaires matinaux), et un vitrage teinté présentant une transmittance lumineuse de 0.68, ce qui offre un bon compromis entre apport lumineux et maîtrise de l'éblouissement.

VI.4.1 Modèle optimisé 1 (Mo1) :

Ce modèle se distingue par une répartition très homogène de la lumière naturelle. La forme carrée permet une distribution équitable de l'éclairage, réduisant les écarts entre l'avant et l'arrière de la pièce. Combinée au vitrage teinté, cette configuration évite les pics de surexposition tout en assurant des niveaux lumineux compris entre 800 et 2500 lux (figure IV-13), dans la plage idéale pour les activités de précision telles que le dessin.

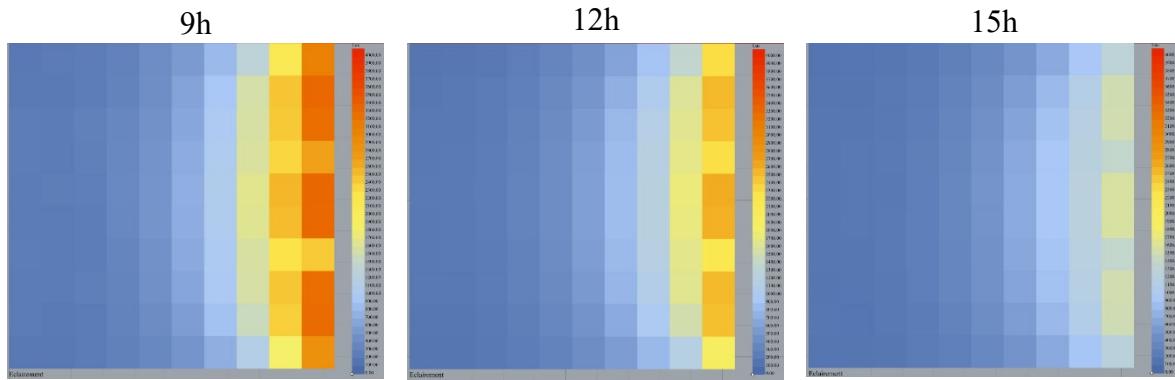


Figure IV-13 : Modèle optimisé 1 de forme carrée (Source : Auteur, 2025)

L'ensemble des plans simulés à différents moments de la journée montre une bonne pénétration de la lumière, sans zones sous-éclairées, et une ambiance visuelle confortable, stable tout au long de la journée, assurant ainsi : uniformité lumineuse excellente, éblouissement réduit, quantité de lumière conforme aux besoins.

VI.4.1 Modèle optimisé 2 (Mo2) :

Ce second modèle adopte une forme rectangulaire avec des ouvertures positionnées sur le côté le plus long, ce qui favorise une meilleure pénétration longitudinale de la lumière. Grâce à cette disposition, la lumière naturelle parvient à éclairer l'ensemble de la pièce avec une progression douce des intensités, sans créer de zones d'ombre marquées.

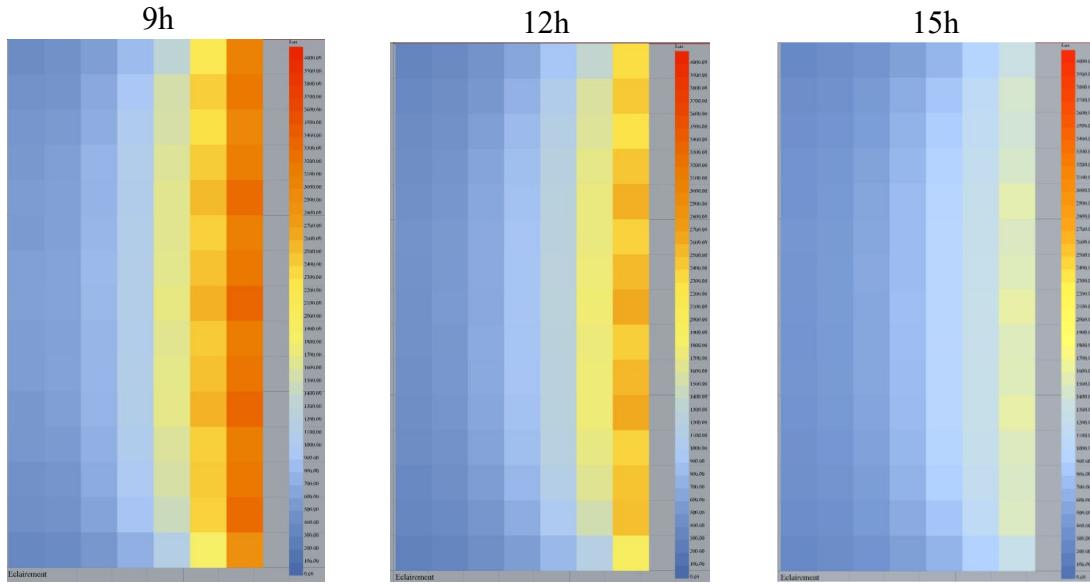


Figure IV-14 : Modèle optimisé 2 de forme rectangulaire (Source : Auteur, 2025)

Les niveaux lumineux sont équivalents à ceux du modèle carré, mais la sensation d'espace lumineux étiré peut offrir davantage de flexibilité dans l'organisation spatiale d'un atelier. L'éblouissement reste modéré, en grande partie contrôlé par le vitrage teinté. Cette configuration assure donc une bonne profondeur d'éclairement, répartition homogène douce, éclairage stable avec peu de contrastes visuels.

Les deux modèles présentent des performances très satisfaisantes, tant en quantité de lumière, qu'en uniformité et en réduction de l'éblouissement. Le modèle carré offre un équilibre centralisé idéal pour des postes de travail répartis uniformément, tandis que le modèle rectangulaire convient à des usages nécessitant un développement longitudinal de l'espace, tout en conservant des conditions visuelles optimales.

Ainsi, ces deux variantes peuvent être considérées comme les plus adaptées à un atelier de dessin, car elles répondent aux critères essentiels de confort visuel tout en étant architecturalement cohérentes avec les contraintes d'usage et d'orientation.

Conclusion :

Ce chapitre a mis en œuvre une démarche de simulation numérique paramétrique afin d'évaluer l'impact des caractéristiques architecturales des fenêtres sur le confort visuel dans un atelier de dessin. À travers l'exploitation des plugins Ladybug et Honeybee dans le logiciel de modélisation Rhino/Grasshopper, plusieurs scénarios ont été modélisés, en faisant varier des paramètres clés : le ratio d'ouverture, l'orientation, la forme de l'espace, et le type de vitrage.

L'analyse comparative des résultats a permis d'identifier les combinaisons les plus favorables au confort visuel, notamment celles associant une orientation est, un ratio d'ouverture de 0.6, une forme carrée ou rectangulaire ouverte sur le côté allongé, et un vitrage teinté. Ces configurations se sont distinguées par leur capacité à fournir un éclairement suffisant, une bonne répartition lumineuse, et une réduction notable des phénomènes d'éblouissement.

En complément des constats établis lors de l'étude in situ, les simulations ont renforcé la compréhension des interactions entre les choix de conception et les performances lumineuses. Elles confirment ainsi la pertinence de l'approche paramétrique dans l'aide à la décision architecturale, en offrant des outils d'exploration flexibles, visuels et comparables.

De manière générale, ces résultats renforcent les observations issues de l'étude in situ et confirment la capacité de la simulation à orienter des choix de conception plus éclairés, en réponse aux besoins réels des usagers dans les espaces éducatifs.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Cette recherche s'est attachée à étudier l'impact des fenêtres et de leurs caractéristiques sur le confort visuel dans les espaces éducatifs, à partir d'un cas d'étude concret : un atelier de dessin situé à Béjaïa. Il visait à répondre aux deux questions principales posées en introduction:

- *Quel est l'impact des fenêtres sur le confort visuel dans les espaces éducatifs ?*
- *Quelles sont les caractéristiques optimales des fenêtres garantissant ce confort ?*

Pour y répondre, une démarche méthodologique en deux volets a été mobilisée : une approche théorique, une approche pratique devisée en une empirique *in situ*, et une simulation numérique paramétrique.

Dans un premier temps, la revue théorique a permis de poser les fondements nécessaires à la compréhension de la lumière naturelle, du rôle des fenêtres dans sa gestion, et des critères de confort visuel dans les environnements éducatifs. Elle a également mis en évidence que les fenêtres ne se réduisent pas à de simples ouvertures, mais qu'elles sont des éléments complexes, influençant la quantité, la direction, la qualité, et la répartition de la lumière dans l'espace.

L'étude *in situ*, conduite à travers des mesures d'éclairement et de luminance, a révélé une configuration peu satisfaisante : zones sous-éclairées en profondeur, surexposition en façade, non-uniformité lumineuse marquée, et dépendance importante à l'éclairage artificiel. Ces résultats ont été confirmés par les retours des usagers via le questionnaire, exprimant une insatisfaction générale liée à la lumière naturelle, en particulier lors de tâches artistiques exigeantes.

La simulation paramétrique a ensuite permis de tester différentes variantes architecturales en faisant varier le ratio d'ouverture, l'orientation, la forme spatiale, et le type de vitrage. Les résultats ont identifié une configuration optimale combinant : un ratio de 0.6, une orientation est, un vitrage teinté à transmittance modérée ($T_{vis} \approx 0.68$), et une forme carrée ou rectangulaire allongée.

Cette combinaison assure un éclairement compris entre 500 et 3000 lux, avec une meilleure uniformité lumineuse et un éblouissement réduit.

Ces observations permettent de valider les hypothèses formulées en début de recherche :

- ✓ Les fenêtres ont bien un impact déterminant sur le confort visuel, tant sur le plan fonctionnel que perceptif.

- ✓ Une conception soignée des ouvertures peut améliorer l'ambiance lumineuse, tout en réduisant la dépendance à l'éclairage artificiel.
- ✓ Les caractéristiques optimales identifiées dans ce mémoire (orientation est, ratio de 0.6, vitrage adapté) confirment qu'un bon équilibre est atteignable entre apport lumineux, protection contre l'éblouissement, et répartition homogène.

Enfin, ce travail souligne l'intérêt d'une approche croisée alliant étude qualitative (perceptions d'usagers), étude quantitative, et simulation numérique, afin d'éclairer les choix architecturaux. Il rappelle que le confort visuel d'un espace éducatif ne peut être dissocié d'une réflexion sur les ouvertures, conçues en cohérence avec les usages pédagogiques, les besoins visuels, et le contexte climatique local.

Recommandations :

Les résultats de cette recherche permettent de formuler des recommandations concrètes pour la conception ou la rénovation d'ateliers artistiques et d'espaces éducatifs sensibles à la lumière naturelle :

- Adopter un ratio d'ouverture compris entre 0.6, garantissant un apport lumineux suffisant tout en évitant les surexpositions.
- Privilégier l'orientation est, qui offre une lumière matinale stable et adaptée aux horaires scolaires, tout en réduisant les risques d'éblouissement en fin de journée.
- Favoriser une forme d'espace carrée, qui permet une meilleure homogénéité lumineuse que les configurations rectangulaires profondes ou rectangulaire avec des fenêtres sur le côté le plus long.
- Prévoir des ouvertures réparties sur deux façades complémentaires (ex. est + nord, est + ouest), afin d'équilibrer l'éclairage naturel et d'éviter les zones d'ombre.
- Utiliser des vitrages semi-transparents, qui améliorent la diffusion de la lumière tout en adoucissant les contrastes, ou même innovants changeant de caractéristiques selon les rayons solaires.
- Intégrer des dispositifs passifs de régulation lumineuse (brise-soleil, stores, protections orientables) dès la conception.

- Associer la conception des ouvertures à la nature des activités pédagogiques pratiquées, en particulier les tâches nécessitant concentration visuelle et perception fine des couleurs.

Limites de recherche :

Comme tout travail de recherche appliquée, cette étude présente certaines limites qu'il convient de reconnaître :

- Le temps relativement restreint n'a pas permis d'explorer toutes les dimensions possibles.
- La maîtrise des outils de simulation paramétrique, tels que Rhino et ses plugins (Grasshopper, Ladybug & Honeybee et Octopus), a nécessité un temps d'apprentissage conséquent, et que les ressources pédagogiques disponibles, restent limitées. Cela combiné au temps serré a empêché d'exploiter pleinement Octopus pour une optimisation multi-objective, pourtant pertinente dans ce contexte.
- Le manque de matériel professionnel a limité la précision des mesures de luminance et n'a pas permis un enregistrement simultané sur plusieurs points de l'espace à chaque moment de la journée.
- Le nombre restreint de questionnaires (15 répondants parmi 30 questionnaires distribués) représente un échantillon limité, ce qui restreint la généralisation des conclusions issues de l'enquête utilisateur.
- Certaines variables influentes, telles que les matériaux de surface, le traitement intérieur des façades, la réflectance des murs, n'ont pas été intégrées dans l'optimisation.
- Le travail s'est focalisé sur un seul atelier, ce qui limite la portée des résultats à d'autres typologies d'espaces éducatifs.

Perspectives de recherche :

Cette étude ouvre plusieurs pistes pour approfondir la réflexion sur la conception lumineuse dans les établissements éducatifs :

- Étendre la simulation à l'échelle annuelle, à l'aide d'indicateurs dynamiques comme la Daylight Autonomy (DA), l'UDI (Useful Daylight Illuminance), et des indices

d'éblouissement comme DGP ou DGI, afin d'évaluer la performance sur l'ensemble de l'année scolaire.

- Tester des types de vitrages variés (verres opalins, microprismatiques, à faible émissivité) et leurs effets sur la répartition de la lumière et l'éblouissement.
- Appliquer la méthodologie à d'autres types d'espaces éducatifs, tels que les salles de classe générales, les laboratoires ou les ateliers techniques, afin d'établir des grilles de recommandations plus larges.
- Associer les simulations lumineuses à des paramètres thermiques et énergétiques, pour proposer des solutions cohérentes avec les enjeux de confort global et d'efficacité énergétique.
- Utiliser davantage les outils de simulation et d'optimisation paramétrique, tels que Ladybug, Honeybee ou Octopus, pour automatiser la recherche des configurations les plus performantes, en intégrant des critères multiples.
- Explorer des solutions architecturales innovantes, comme l'usage de surfaces réfléchissantes, de puits de lumière, ou de dispositifs de redirection passive, qui peuvent compléter efficacement les ouvertures traditionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques :

- Abbassi, A. (2019). *L'impact de la taille de baie sur le confort visuel dans les salles de classes (Cas d'étude : Écoles primaires)* [Thèse de doctorat, Université non précisée].
- Babaeeaznaveh, H. (2023). *L'impact de l'éclairage naturel sur le confort visuel dans les espaces éducatifs* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/16278/1/M17903.pdf>
- Berkouk, D. (2014). *Les fonctions de la fenêtre et leurs impacts sur le confort lumineux dans les régions à climat sec et aride* [Mémoire de master, Université Mohamed Khider – Biskra]. Faculté des Sciences et de la Technologie, Département d'Architecture.
- BENDEKKICHE, S. (2017). *Optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe par simulation inverse* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- Bénichou, A. (2020). *Dedans dehors – Concevoir la fenêtre innombrable*. OpenEdition Books. <https://books.openedition.org/pufc/39170?lang=fr>
- Biron, K. (2008). *Dynamique forme/lumière : Exploration du processus de création de l'espace architectural par modèles, maquettes, images* [Mémoire de maîtrise, Université Laval].
- Boulzazene, F. (2021). *Les caractéristiques architecturales et leur impact sur le confort visuel dans les espaces éducatifs* [Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira – Bejaïa]. Faculté de Technologie, Département d'Architecture.
- Brouillaud, M. (2007). L'éclairage naturel des bâtiments. In Dachelet, M. (Éd.), *Les Cahiers de l'Urbanisme*, (66), 48–51. Université catholique de Louvain.
- Chennit, K. (n.d.). *Étude et optimisation de l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition* [Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira – Bejaïa]. Faculté de Technologie, Département d'Architecture.
- Cuttle, C. (2008). *Lighting by design* (2nd ed.). Elsevier / Architectural Press.
- CIE. (n.d.). *CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky*. Commission Internationale de l'Éclairage. <https://cie.co.at/publications/cie-standard-overcast-sky-and-clear-sky>
- Daich, S. (2011). Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques, Cas de la ville de Biskra. Université Mohamed Khider Biskra.
- Daich, S. (2019). Modélisation du système anidolique pour un environnement lumineux intérieur intégré. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- De Herde, A., & Reiter, S. (2004). *L'éclairage naturel des bâtiments*.
- Gallas, M. (2013). *Proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine].
- Guémené, S. (2016). *Stratégies passives #1 : Lumière naturelle*. Archi positive. <http://archipositive.blogspot.com/>

- Guide Bâtiment Durable. (2019). *Assurer le confort visuel au moyen de la lumière naturelle.* <https://www.guidebatimentdurable.brussels/>
- Hee, W. J., Alghoul, M. A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M. A., Alrubaih, M. S., & Sopian, K. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 323-343.
- Khadraoui, M. A. (2019). *Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique (Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride)* [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra]. Faculté des Sciences et de la Technologie, Département d'Architecture.
- Labreche, S. (2014). Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides. Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra.
- Lakhdari, K. (2021). *Impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment : Cas des régions chaudes et arides* [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra]. Faculté des Sciences et de la Technologie, Département d'Architecture.
- Lee, J.-W., Jung, H.-J., Park, J.-Y., Lee, J., & Yoon, Y. (2013). Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable energy*, 50, 522-531.
- Liebard, A., & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Le Moniteur.
- Lumière naturelle. (n.d.). Le Lab Promodul. <https://lab.cercle-promodul.inef4.org/knowledge/sampost/lumiere-naturelle-definition>
- Madeleine, P. (2020). *L'importance de la lumière naturelle en architecture*. Megastructures. <https://www.megastructures.fr/importance-lumiere-naturelle-en-architecture/>
- Maesano, C., & Annesi-Maesano, I. (2016). *Impact of lighting on school performance in European classrooms*. In CLIMA 2016, 12th REHVA World Congress (Aalborg).
- Marc. (2023). *Lumière naturelle en architecture d'intérieur : Guide ultime*. <https://designmoiuncanape.com/lumiere-naturelle-en-architecture-d-interieur/>
- Merad, Y. (2017). *Pour une meilleure qualité spatiale.Cas des espaces extérieurs dans l'habitat collectif à Biskra* [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra]. Faculté des Sciences et de la Technologie, Département d'Architecture.
- Müezzinoğlu, M., Hidayetoğlu, M., & Yıldırım, K. (2020). *The effects of the wall colors used in educational spaces on the perceptual evaluations of students*. Megaron, 15(1).
- Musa, A. R., Abdullah, N. A. G., Che-Ani, A. I., Tawil, N. M., & Tahir, M. M. (2012). *Indoor environmental quality for UKM architecture studio: An analysis on lighting performance*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 60, 318-324.

- Panofsky, E. (1951). *La fenêtre de verre de grande surface devient un filtre entre dieu et les hommes.* In Transparency en architecture (p. 9). Université de Biskra. <http://thesis.univ-biskra.dz/1609/4/CHAPITRE%201.pdf>
- Pineault, N. (2009). *Effets des types de vitrage sur la qualité de l'éclairage naturel.*
- Schatti, N. (2007). Jean Prindale et l'activité des ateliers de sculpture franco-flamands à Genève et en Savoie au tournant des XIVe et XVe siècles. *Kunst+ Architektur in der Schweiz.*
- Reinhart, C. (2014). *Daylighting Handbook I.* Building Technology Press.
- Saffidine, D., & Benharkat, S. Impact de l'éclairage naturel zenithal sur le confort visuel dans les salles de classe. Cas d'étude. Sfaxsi, I. (2023). *Lumière et vue sur l'extérieur : Impact de la fenêtre sur la qualité visuelle pour les usagers des espaces des bureaux. Cas des bâtiments de bureaux dans la ville de Biskra* [Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et de la Technologie].
- Soltani, K., & Ahriz, A. (2021). *L'optimisation de l'éclairage naturel à travers le dimensionnement des ouvertures dans un équipement culturel : Cas d'étude : Médiathèque régionale à Tébessa* [Thèse de doctorat].
- Technical Drawing: Measurements and HDR Images Use. (2017). *Procedia Engineering*, 196, 964–971.
- Turpain, A. (1914). *La lumière.* FeniXX réédition numérique.
- Veka. (n.d.). *L'esthétique grâce au design des fenêtres.* <https://www.veka.be/groupes-cibles/architecte/centre-dinformation/lesthetique-grace-au-design-des-fenetres.html>
- Vicaningrum, I., & Marcillia, S. R. (2024). *Contribution of natural lighting in workspaces to visual comfort improving user productivity.* E3S Web of Conferences, 589, 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458905006>
- Wikipedia contributors. (2024). Fenêtre. In Wikipedia, The Free Encyclopaedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%AAtre>
- Winterbottom, M., & Wilkins, A. (2009). *Lighting and discomfort in the classroom.* Journal of Environmental Psychology, 29, 63–75.
- Yüceer, S., & Lök, S. (2020). *The effect of color in design studios on students' space perception.* Megaron, 15(1), 1–12.

ANNEXES

Annexe A : Etapes du travail sur le logiciel Aftab Alfa.

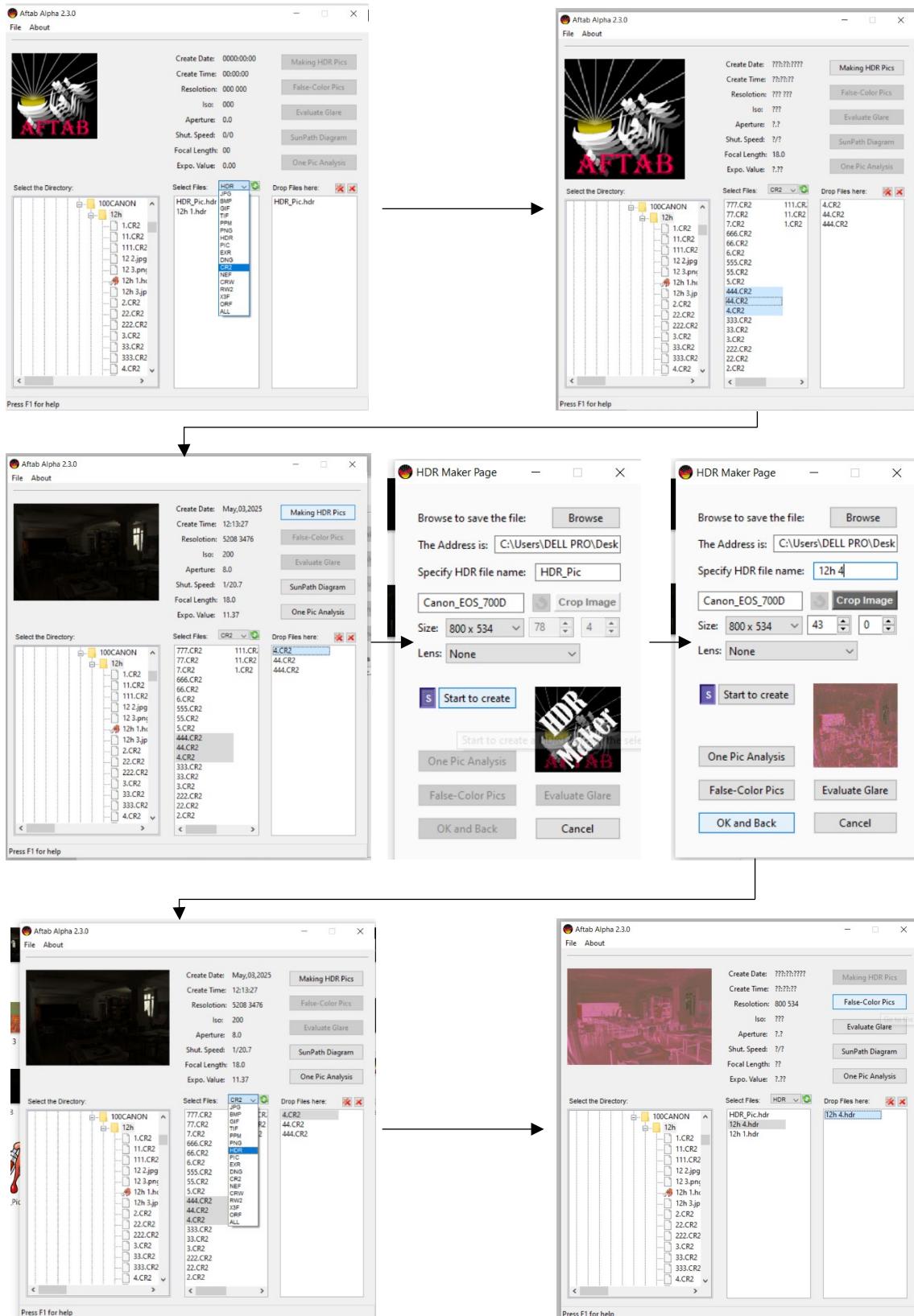


Figure A-1 : Fusion et insertion de l'image HDR (Source : Auteur, 2025)

Annexes

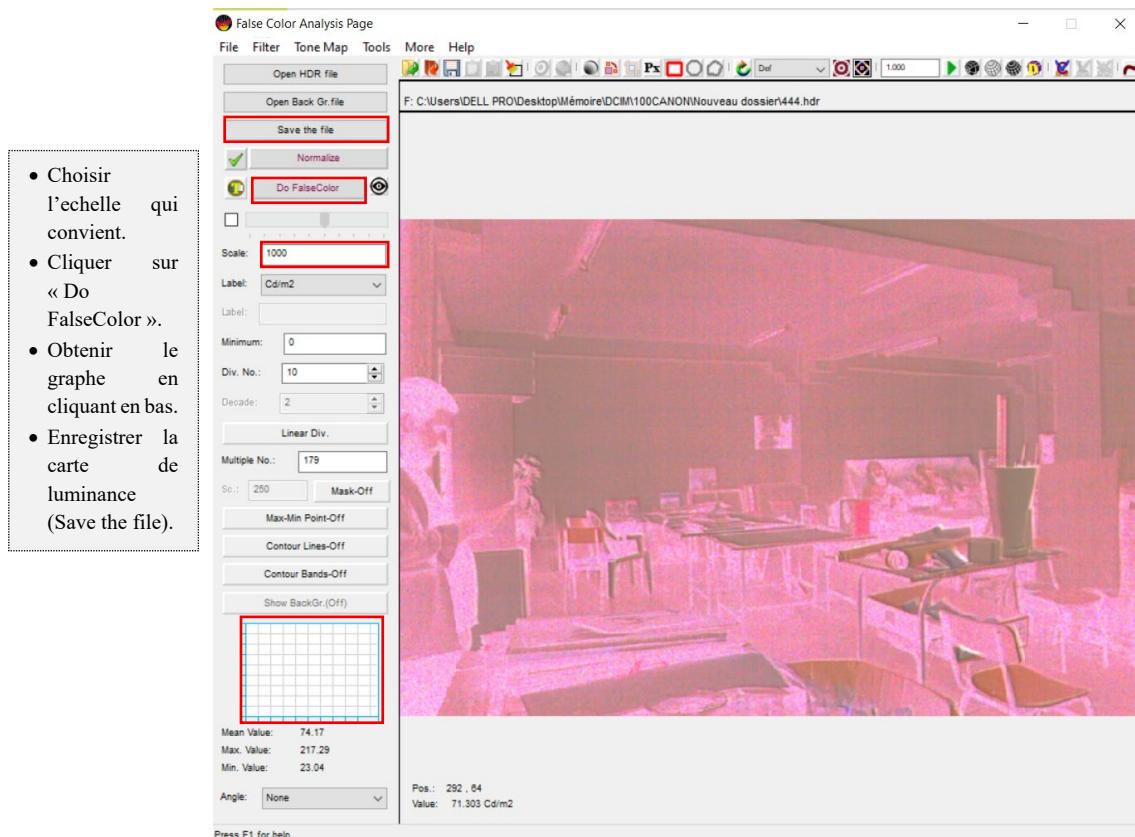


Figure A-2 : création et enregistrement de la carte de luminance (Source : Auteur, 2025)

Annexe B : Questionnaire

QUESTIONNAIRE

Dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master 2 en Architecture, ce questionnaire a pour but de recueillir vos perceptions sur la qualité de l'éclairage naturel dans les ateliers de dessin et de sculpture de la Maison de la Culture d'Aamriw à Béjaïa. Vos réponses nous aideront à mieux comprendre son impact sur le confort visuel et à identifier d'éventuelles améliorations.

Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses ; nous vous invitons à répondre en fonction de votre ressenti. Le questionnaire est anonyme et ne prendra que quelques minutes à compléter.

Merci pour votre participation !

في إطار إعداد مذكرة ماستر، يهدف هذا الاستبيان إلى جمع آرائكم حول جودة الإضاءة الطبيعية في ورشات الرسم والنحت داخل دار الثقافة اعمريو ببجاية. ستساعدنا إجاباتكم على فهم تأثيرها على الراحة البصرية وتحديد أي تحسينات محتملة.

لا توجد إجابات صحيحة أو خاطئة، نرجو منكم الإجابة وفقاً لانطباعاتكم الشخصية. الاستبيان مجهول الهوية ولن يستغرق سوى بضع دقائق لإكماله.

شكراً لمشاركتكم!

Informations générales :

Où vous asseyez-vous généralement dans l'atelier pendant vos activités ?					أين تجلس عادةً في الورشة أثناء القيام بأنشطتك؟						
		<input type="checkbox"/> P1 <input type="checkbox"/> P4 <input type="checkbox"/> P7 <input type="checkbox"/> P10 <input type="checkbox"/> P13 <input type="checkbox"/> P16 <input type="checkbox"/> P2 <input type="checkbox"/> P5 <input type="checkbox"/> P8 <input type="checkbox"/> P11 <input type="checkbox"/> P14 <input type="checkbox"/> P17 <input type="checkbox"/> P3 <input type="checkbox"/> P6 <input type="checkbox"/> P9 <input type="checkbox"/> P12 <input type="checkbox"/> P15									
Quel est votre âge ?									كم عمرك؟		
<input type="checkbox"/> ≤ 18 ans سنة 18 ≥		<input type="checkbox"/> entre 18 et 25 بين 18 و 25 سنة		<input type="checkbox"/> entre 25 et 35 بين 25 و 35 سنة		<input type="checkbox"/> entre 45 et 45 بين 45 و 45 سنة		<input type="checkbox"/> ≥ 45 ans سنة 45 ≥			
Quel est votre sexe ?						ما هو جنسك؟					
<input type="checkbox"/> Femme انش			<input type="checkbox"/> Homme ذكر								
Quelle est votre relation avec ces ateliers artistiques?						A quelle heure remplissez vous ce questionnaire?					
ما علاقتك بهذه الورشات الفنية؟						في أي ساعة أنت تقوم بتعبئة هذا الاستبيان؟					
<input type="checkbox"/> Etudiant طالب			<input type="checkbox"/> Enseignant مدرس			<input type="checkbox"/> 9H-11H			<input type="checkbox"/> 11H-13H		
									<input type="checkbox"/> 13H-15H		

I. Confort visuel

1- Dans l'ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits du niveau de confort visuel dans cet atelier (présence de lumière naturelle seulement) ?

1- بشكل عام، إلى أي مدى تشعرون بالرضا عن مستوى الراحة البصرية في هذه الورشة؟

<input type="checkbox"/> Très insatisfaits غير راضٍ جدًا	<input type="checkbox"/> Insatisfaits غير راضٍ	<input type="checkbox"/> Acceptable مقبول	<input type="checkbox"/> Satisfaits راضٍ	<input type="checkbox"/> Très satisfaits راضٍ جدًا
-------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------	----------------------------------------------	---------------------------------------------	-------------------------------------------------------

2- Que pensez-vous de l'uniformité de la lumière naturelle dans cet espace ? (Si la lumière est bien répartie dans toute la pièce ou s'il y a des zones trop éclairées et d'autres trop sombres.)

2- ما رأيك في تجانس توزيع الضوء الطبيعي في هذه المساحة؟ (أي هل يتم توزيع الضوء بشكل متساوٍ في كل المكان، أم أن هناك مناطق شديدة الإضاءة وأخرى مظلمة جدًا؟)

<input type="checkbox"/> Très mauvaise سيئة جدًا	<input type="checkbox"/> Mauvaise سيئة	<input type="checkbox"/> Acceptable مقبولة	<input type="checkbox"/> Bonne جيدة جدًا	<input type="checkbox"/> Très bonne جيدة
-----------------------------------------------------	-------------------------------------------	-----------------------------------------------	---------------------------------------------	---------------------------------------------

3- Comment trouvez-vous la lumière naturelle présente dans l'ateliers artistique ?

3- كيف تقييم جودة الإضاءة الطبيعية الموجودة في الورشة الفنية؟

<input type="checkbox"/> Insuffisante غير كافية	<input type="checkbox"/> Peu suffisante كافية قليلاً	<input type="checkbox"/> Suffisante كافية	<input type="checkbox"/> Très suffisante كافية جدًا	<input type="checkbox"/> Excessive مفرطة
----------------------------------------------------	---------------------------------------------------------	----------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------------------------

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

4- هل تشعر بالانزعاج أثناء وجودك بسبب الأشعة الشمسية المباشرة؟

<input type="checkbox"/> Très gêné(e) منزعج جدًا	<input type="checkbox"/> Assez gêné(e) منزعج إلى حد ما	<input type="checkbox"/> Modérément gêné(e) منزعج بشكل معقول	<input type="checkbox"/> Peu gêné(e) قليل الإنزعاج	<input type="checkbox"/> Pas du tout gêné(e) لست منزعجاً على الإطلاق
-----------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------

5- Quelles sont les sources d'éblouissement qui vous gênent ? (L'éblouissement est une sensation d'inconfort causée par une lumière trop intense ou des reflets, rendant la vision difficile.)

5- ما هي مصادر الإبهار البصري التي تزعجك؟ (الإبهار البصري هو الشعور بعدم الراحة بسبب الضوء الشديد أو الانعكاسات، مما قد يجعل الرؤية صعبة.)

<input type="checkbox"/> Rayons solaires directs الأشعة الشمسية المباشرة	<input type="checkbox"/> Réflexion sur surfaces vitrées الانعكاس على الأسطح الزجاجية	<input type="checkbox"/> Réflexion sur surfaces claires ou lisses الانعكاس على الأسطح الفاتحة أو الملمسة	<input type="checkbox"/> Le contraste entre zone très éclairée et une autre très sombre التباهي بين منطقة شديدة الإضاءة وأخرى مظلمة جدًا	<input type="checkbox"/> Aucune source ne me gêne particulièrement لا يوجد مصدر يزعجي بشكل خاص
-----------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------

6- Comment évaluez-vous les taches solaires dans l'ateliers de dessin ?

6- كيف تقييم البقع الشمسية في ورشة الرسم؟

<input type="checkbox"/> Très mauvaise سيئة جدًا	<input type="checkbox"/> Mauvaise سيئة	<input type="checkbox"/> Acceptable مقبولة	<input type="checkbox"/> Bonne جيدة	<input type="checkbox"/> Très bonne جيدة جدًا
-----------------------------------------------------	-------------------------------------------	-----------------------------------------------	----------------------------------------	--------------------------------------------------

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

7- هل تلاحظ وجود ظلال مزعجة في هذه المساحة؟

<input type="checkbox"/> Ombres portées par des éléments architecturaux ظلال ناتجة عن عناصر معمارية	<input type="checkbox"/> Ombres des occupants ou des meubles ظلال ناتجة عن الأشخاص أو الأثاث	<input type="checkbox"/> Ombres causées par des variations de lumière naturelle ظلال ناتجة عن تغيرات في الإضاءة الطبيعية	<input type="checkbox"/> Ombres causées par des masques solaires (végétation, store...) ظلال ناتجة عن الحاجز الشمسي (نباتات، ستائر...)	<input type="checkbox"/> Aucune ombre gênante remarquée لم ألاحظ أي ظل مزعج
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------

8- Quelles sont les causes éventuelles de votre fatigue visuelle dans cet espace ?

8- ما هي الأسباب المحتملة لإحساسك بالتعب البصري في هذه المكان؟

<input type="checkbox"/> L'excès de lumière naturelle الإفراط في الإضاءة الطبيعية	<input type="checkbox"/> L'éblouissement (éblouissement البصري)	<input type="checkbox"/> Contrastes trop marqués entre lumière et ombre التباينات القوية بين الضوء والظل	<input type="checkbox"/> Un manque de lumière naturelle نقش في الإضاءة الطبيعية	<input type="checkbox"/> Je ne ressens pas de fatigue visuelle لاأشعر بأي تعب بصري
--------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

II. Fenêtres et leurs caractéristiques

1- Que pensez-vous de l'orientation des fenêtres par rapport à l'apport de lumière naturelle ?

(C'est à dire la direction vers laquelle les fenêtres sont positionnées).

1- ما رأيك في توجيه النوافذ بالنسبة لدخول الضوء الطبيعي؟ (أي الاتجاه الذي تم وضع النوافذ فيه).

<input type="checkbox"/> Trop exposées, la lumière est trop intense à certains moments مكسوفة جدًا، الضوء يكون شديداً في بعض الأوقات.	<input type="checkbox"/> Mal orientées، elles ne permettent pas un bon apport lumineux غير موجهة بشكل صحيح، لا تسمح بدخول كمية كافية من الضوء.	<input type="checkbox"/> Cela dépend de la saison et de l'heure de la journée يعتمد ذلك على الموسم ووقت النهار.	<input type="checkbox"/> Très bien orientées، elles offrent un bon équilibre lumineux موجهة بشكل جيد، توفر توازنًا جيدًا في الإضاءة.	<input type="checkbox"/> Je n'ai pas d'avis particulier ليس لدي رأي معين.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------

2- Le ratio fenêtre/surface de la pièce (Le rapport entre la taille des fenêtres et la surface de la pièce.) vous semble-t-il adapté à l'apport de lumière naturelle ?

2- هل تعتقد أن نسبة حجم النوافذ مقارنة بمساحة الغرفة (نسبة حجم النوافذ إلى مساحة الغرفة، والتي تحدد كمية الضوء الطبيعي الداخل إليها). مناسبة لدخول الضوء الطبيعي؟

<input type="checkbox"/> Non, pas assez de fenêtres, l'espace manque de lumière لا، هناك عدد قليل جدًا من النوافذ، المكان يفتقر إلى الضوء.	<input type="checkbox"/> Non, trop de fenêtres, l'espace est trop lumineux voire éblouissant لا، هناك الكثير من النوافذ، المكان شديد الإضاءة وقد يكون مزعجاً.	<input type="checkbox"/> Les ouvertures sont bien placées، mais leur taille pourrait être optimisée الفتحات موضوعة بشكل جيد، ولكن يمكن تحسين حجمها.	<input type="checkbox"/> Oui, le ratio est bien équilibré pour un bon éclairage نعم، النسبة متوازنة بشكل جيد للحصول على إضاءة مناسبة.	<input type="checkbox"/> Je ne sais pas لا أعرف.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------

3- Le type de vitrage utilisé (si le verre est transparent ou teinté) permet-il de limiter l'éblouissement (l'éblouissement c'est quand la lumière est trop forte et gêne les yeux) et les reflets ?

3- هل يسمح نوع الزجاج المستخدم (إذا كان الزجاج شفافاً أو ملوناً) في النوافذ بالحد من الإبهار (الإيهار هو عندما يكون الضوء قوياً جداً ويؤدي العينين) والانعكاسات؟

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Non, l'éblouissement est trop fort malgré le vitrage لا، الإبهار قوي جداً رغم وجود الزجاج.	Non, les reflets sont trop présents sur certaines surfaces لا، الانعكاسات ظاهرة جداً على بعض الأسطح.	Cela dépend de la météo et de l'ensoleillement يعتمد ذلك على الطقس ومستوى التعرض لأشعة الشمس.	Oui, il filtre bien la lumière et évite les reflets gênants نعم، يعمل على ترشيح الضوء جيداً ويحدّ من الانعكاسات المزعجة.	Je n'ai pas remarqué de problème لملاحظي أي مشكلة.

4- Souhaiteriez-vous des dispositifs pour moduler la lumière naturelle (stores, volets, rideaux, filtres, etc.) ?

4- هل ترغب في وجود وسائل للتحكم في شدة الضوء الطبيعي (مثل الستائر، المصاريق، الفلاتر...)؟

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toujours nécessaire دائمًا ضروري	Souvent utile غالباً مفيد	Parfois utile أحياناً مفيد	Rarement nécessaire نادراً ضروري	Pas du tout nécessaire ليس ضرورياً على الإطلاق

III. Suggestions spécifiques aux besoins visuels :

1- En général, dans quelle mesure la lumière naturelle vous aide-t-elle à percevoir les couleurs et les détails lors de vos travaux ?

1- إلى أي مدى يساعدك الضوء الطبيعي في رؤية الألوان والتفاصيل أثناء أعمالك؟

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pas du tout ليس ضرورياً على الإطلاق	Un peu غالباً مفيد	Cela dépend des conditions أحياناً مفيد	Assez نادراً ضروري	Toujours nécessaire دائمًا ضروري

2- À quelle fréquence utilisez-vous l'éclairage artificiel dans cet espace, pendant la journée, pour mieux voir ?

2- إلى أي مدى تستخدم الإضاءة الاصطناعية خلال النهار لتحسين الرؤية؟

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toujours دائمًا	Fréquemment كثيراً	De temps en temps أحياناً	Rarement نادراً	Jamais أبداً

Figure A- 3 : Page 4 du questionnaire (Source : Auteur, 2025)