

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université Abderrahmane MIRA- Bejaia

Faculté de Technologie

Département d'Architecture



جامعة عبد الرحمان ميرة – بجاية

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية



Thème :

**Rôle de la lumière naturelle dans l'optimisation énergétique
des bâtiments à énergie zéro**

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

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

Préparé par :

Mousli Zahra

Mr. Badis Abderrahmane	MAA	Département architecture de Bejaia	Président de jury
Mr. AMIR Amar	MCA	Département architecture de Bejaia	Promoteur
Mme. Talantikit Soundouss Ismahane	MCB	Département architecture de Bejaia	Examinatrice

Année Universitaire 2024 - 2025

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



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

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

Je soussigné,

Nom : Mousli
Prénom : Zahra
Matricule : 33008310
Spécialité et/ou Option : Architecture
Département: d'Architecture
Faculté: Technologie
Année universitaire : 2024/2025

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

Intitulé: Rôle de la lumière naturelle dans l'optimisation énergétique des bâtiments à énergie
zéro

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

Fait à Béjaïa le
09/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

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

Résumé

Ce mémoire, intitulé « L'impact de la lumière naturelle sur l'efficacité énergétique des bâtiments à énergie zéro : enjeux et stratégies architecturales », s'intéresse à l'apport de la lumière naturelle sur l'efficacité énergétique des bâtiments à énergie zéro en s'appuyant sur des stratégies architecturales permettant d'optimiser cet apport. L'objectif principal de cette étude est de concevoir un centre commercial qui répond aux exigences de performance énergétique, de confort, et d'optimisation de la lumière naturelle. L'étude examine particulièrement comment une bonne orientation, des ouvertures optimisées et l'utilisation de matériaux de contrôle solaire peuvent réduire les besoins en éclairage artificiel, contribuant ainsi à une meilleure performance énergétique.

La démarche appliquée pour atteindre cet objectif est basé, non seulement, sur une étude théorique, mais aussi sur étude empirique qui a permis de confronter ces éléments théoriques à la réalité concrète, notamment à travers l'analyse du cas du centre commercial de Ritaj mall.

Les résultats obtenus confirment qu'une conception architecturale réfléchie, qui intègre à la fois une bonne orientation, des ouvertures optimisées et l'utilisation de matériaux de contrôle solaire permet de réduire de façon significative la consommation énergétique en diminuant les besoins en éclairage artificiel, mais aussi d'améliorer considérablement le confort thermique, la qualité visuelle des espaces et le bien-être général des occupants.

Mots-clés : lumière naturelle, bâtiments à énergie zéro, consommation énergétique, le bien-être des occupants, orientation, ouverture, matériaux.

ملخص:

تتناول هذه المذكرة، التي تحمل عنوان "تأثير الضوء الطبيعي على كفاءة الطاقة في المباني ذات الطاقة الصفرية: التحديات والاستراتيجيات المعمارية"، مساهمة الضوء الطبيعي في كفاءة الطاقة في المباني ذات الطاقة الصفرية بالاعتماد على استراتيجيات معمارية تسمح بتحسين هذه المساهمة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تصميم مركز تجاري يلبي متطلبات الأداء الطاقوي والراحة وتحسين الضوء الطبيعي. تبحث الدراسة بشكل خاص في كيفية تقليل الحاجة إلى الإضاءة الاصطناعية من خلال التوجيه الجيد والفتحات المحسنة واستخدام مواد التحكم في أشعة الشمس، مما يساهم في تحسين الأداء الطاقوي.

وتستند الطريقة المتبعة لتحقيق هذا الهدف ليس فقط إلى دراسة نظرية، بل أيضاً إلى دراسة تجريبية سمحت بمقارنة هذه العناصر النظرية بالواقع الملموس، لا سيما من خلال تحليل حالة مركز ريتاج مول التجاري.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها أن التصميم المعماري المدروس، الذي يدمج في الوقت نفسه التوجه الجيد والفتحات المحسنة واستخدام مواد التحكم في أشعة الشمس، يتيح تقليل استهلاك الطاقة بشكل كبير عن طريق تقليل الحاجة إلى الإضاءة الاصطناعية، ولكنه يتيح أيضاً تحسين الراحة الحرارية والجودة البصرية للمساحات والرفاهية العامة للمقيمين بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية: الضوء الطبيعي، المباني ذات الطاقة الصفرية، استهلاك الطاقة، رفاهية السكان، التوجه، الانفتاح، المواد.

Abstract

This thesis, entitled “The Impact of Natural Light on the Energy Efficiency of Zero-Energy Buildings: Architectural Challenges and Strategies,” examines the contribution of natural light to the energy efficiency of zero-energy buildings, drawing on architectural strategies to optimize this contribution. The main objective of this study is to design a shopping center that meets energy performance, comfort, and natural light optimization requirements. The study specifically examines how proper orientation, optimized openings, and the use of solar control materials can reduce the need for artificial lighting, thereby contributing to better energy performance.

The approach used to achieve this objective is based not only on a theoretical study, but also on an empirical study that allowed these theoretical elements to be compared with concrete reality, in particular through the analysis of the Ritaj mall shopping center case study.

The results obtained confirm that a well-thought-out architectural design, which integrates good orientation, optimized openings, and the use of solar control materials, can significantly reduce energy consumption by decreasing the need for artificial lighting, but also considerably improve thermal comfort, the visual quality of spaces, and the general well-being of occupants.

Keywords: natural light, net-zero energy buildings, energy consumption, occupant well-being, orientation, openings, materials.

Liste des tableaux :

Tableau 1 : les sources de la lumière naturelle.....	22
Tableau 2 : Recommandations relatives à l'apport en lumière naturelle par des prises de jour situées sur une surface verticale ou inclinée	32
Tableau 3 : Recommandations relatives à l'apport en lumière naturelle par des prises de jour situées sur une surface horizontale.....	32
Tableau 4:synthèse	63
Tableau 5:les types d'ouvertures.....	72
Tableau 6: Interprétation des résultats de simulation pour le 21mars	82
Tableau 7: Interprétation des résultats de simulation pour le 21 juin.....	84
Tableau 8: Interprétation des résultats de simulation pour le 21 décembre	85
Tableau 9:les scenarios proposés	95
Tableau 10:résultats de simulation d'un espace avec brise solaire.	106

Liste des figures

Figure 1:la méthodologie de recherche	5
Figure 2:Type des bâtiments net énergie.....	8
Figure 3: Gestion de l'énergie des bâtiments à énergie zéro	9
Figure 4: Solution des bâtiments à énergie zéro.....	10
Figure 5 : La solution d'isolation thermique	11
Figure 6 :l'étanchéité à l'air dans une maison	12
Figure 7 : L'orientation de la maison	12
Figure 8 : compacité des différentes formes des bâtiments.....	13
Figure 9 : Les types de vitrage	14
Figure 10 : protection solaire bâtiment.....	14
Figure 11 : capture solaire thermique.....	15
Figure 12 : panneau photovoltaïque couplé avec le réseau	16
Figure 13 : le puits canadien.....	16
Figure 14 : principe de pompe à chaleur	17
Figure 15 : Les classes énergétiques	18
Figure 16 : la propagation de la lumière naturelle.....	23
Figure 17 : la réflexion de la lumière naturelle	23
Figure 18 : La réfraction des rayons lumineux.....	24
Figure 19 : Les quatre modes de transmission de la lumière naturelle	25
Figure 20 : La diffusion du rayonnement	25
Figure 21 : Capturer la lumière naturelle a travers la fenêtre	26
Figure 22 : Influence de type d'ouverture sur la quantité de lumière.....	28
Figure 23 : La distribution de la lumière naturelle dans un local	29
Figure 24 : les quatre orientations d'un bâtiment	39
Figure 25 : Critères d'orientation d'un bâtiment selon les conditions du site	42
Figure 26: Différent types des ouvertures.....	44
Figure 27 : Exemple d'un éclairage unilatéral	45
Figure 28: Illustration d'un éclairage bilatéral	45
Figure 29 : Capturer la lumière a partir des baies.....	46
Figure 30: Capturer la lumière a partir des baies.....	47
Figure 31: Le système light shelf	48
Figure 32: Les types des puits de lumière	48
Figure 33: Exemple d'éclairage zénithal de type tabatière.	49
Figure 34: Exemple d'éclairage zénithal de type dôme.	50
Figure 35: Exemple d'éclairage zénithal de type verrière.	51
Figure 36: Exemple d'éclairage zénithal de type lanterneaux.	51
Figure 37: Exemple d'éclairage zénithal de type shed.....	52
Figure 38: les différents types des puits de lumière.....	52
Figure 39: Principe d'éclairage d'un patio central.	53
Figure 40: les types d'atrium	53
Figure 41: position des ouvertures	54
Figure 42: la quantité de lumière captée par les différentes positions des ouvertures.....	55
Figure 43: Les dimensions de l'ouverture.....	55
Figure 44: Les dimensions de l'ouverture.....	56

Figure 45: l'influence de la forme d'ouverture.....	57
Figure 46: l'influence de la forme d'ouverture.....	57
Figure 47: Principe de concentrateur fluorescent.....	60
Figure 48: Fonctionnement d'un Matériau Prismatique.....	60
Figure 49: Films holographiques: principe de déviation des rayons lumineux quelque soit leur angle d'incidence.....	61
Figure 50: La redirection des rayons de lumière par le film de redirection de lumière naturelle 3M™	62
Figure 51: la situation de Bejaia.....	65
Figure 52: la topographie de la ville de Bejaia.....	66
Figure 53: façade principale de ritadj mall.....	67
Figure 54: la situation de Ritadj mall	68
Figure 55: plan de masse.....	69
Figure 56: plan RDC	70
Figure 57: plan R+1.....	70
Figure 58 : Façade principale de Ritadj mall.....	71
Figure 59 :Luxmètre.....	74
Figure 60: Les résultats de prise de mesure in situ à 10h.....	78
Figure 61: Les résultats de simulation par le logiciel DialuxEvo a 10h.....	79
Figure 62: situation de sidi Ali Labhar.....	89
Figure 63: l'accessibilité de terrain.....	90
Figure 64: l'environnement immédiat de terrain	90
Figure 65: cartes d'ensoleillement	91
Figure 66: cartes des températures	92
Figure 67: cartes des vents dominant	92
Figure 68: schéma de principe existant	93
Figure 69: schéma de principe propose.....	94
Figure 70: première étape de la genèse	96
Figure 71: deuxième étape de la genèse.....	96
Figure 72: troisième étape de la genèse.....	96
Figure 73: organigramme de centre commercial.....	97
Figure 74: plan de masse de centre commercial.....	98
Figure 75: façade du centre commercial	99
Figure 76: façade du centre commercial	100
Figure 77: les dispositifs de la double peau.....	100
Figure 78: plan de RDC.....	102

Sommaire

Résumé	I
:ملخص.....	II
Abstract	III
Liste des tableaux :	IV
Liste des figures	V
Sommaire	VII
Dédicace	XI
Remerciement.....	XII
Chapitre Introductif	
I. Introduction générale.....	1
II. Problématique :	2
III. Hypothèse :	3
IV. Objectifs de la recherche :	4
V. Méthodologie de recherche :	4
VI. Structure de mémoire	6
Chapitre 01 : Optimisation de la lumière naturelle dans les Bâtiments à basse consommation énergétique	1
Introduction	7
1 Définition et principes des habitats à énergie zéro	8
1.1 Définition	8
1.2 Le mode de fonctionnement des bâtiments zéro-énergie	8
1.3 Les caractéristiques d'un bâtiment à zéro énergie	9
1.4 Les principes de conception d'un bâtiment à énergie zéro.....	10
1.4.1 Isolation et Conception du bâtiment.....	11
1.4.2 Utilisation des matériaux spécifiques.....	13
1.4.3 Solutions énergétiques et renouvelables.....	14
1.5 Avantages des bâtiments à énergie zéro et impacts environnementaux	17
2 La consommation énergétique, un regard général.....	18
2.1 Définition de la consommation énergétique.....	18
2.2 La consommation énergétique mondiale et en Algérie	18
3 Lumière naturelle et technique d'optimisation.....	19
3.1 La lumière naturelle.....	19
3.2 Les sources de la lumière	20
3.3 Les phénomènes physiques de la lumière	22
3.3.1 Réflexion	23
3.3.2 La réfraction	24

3.3.3	La transmission.....	24
3.3.4	La diffusion	25
3.4	Stratégies de l'éclairage naturel	25
3.4.1	Capter la lumière	26
3.4.2	Transmettre la lumière.....	28
3.4.3	Distribuer/Répartir la lumière.....	28
3.4.4	Se protéger de la lumière.....	29
3.4.5	Contrôler la quantité de la lumière	30
3.5	Les enjeux et les avantages de l'optimisation de la lumière naturelle.....	30
4	Rôle de la lumière naturelle dans la performance énergétique des bâtiments	31
5	La réglementation et les normes relatives à l'éclairage naturel dans le bâtiment (EN 17037).....	31
	Conclusion.....	32
	Chapitre 02 : Facteurs influençant l'apport de lumière naturelle	6
	Introduction	34
1	Les facteurs influant sur l'apport de la lumière naturelle	35
1.1	Les caractéristiques du site.....	35
1.1.1	Le relief d'un terrain.....	35
1.1.2	La latitude.....	35
1.1.3	La saison.....	35
1.1.4	L'heure	36
1.1.5	Les types de ciels.....	36
1.2	L'environnement immédiat	36
1.2.1	Les bâtiments voisins	36
1.2.2	La végétation	36
1.2.3	Le facteur de réflexion des surfaces extérieures.....	37
1.3	Les caractéristiques du bâtiment	37
2	Les facteurs applicables dans notre cas d'étude :	37
2.1	L'orientation des bâtiments	37
2.1.1	Définition du l'orientation.....	38
2.1.2	La forme et l'orientation.....	38
2.1.3	L'effet d'orientation sur la conception et sur l'éclairage dans le bâtiment	38
1)	Orientation Sud.....	39
2)	Orientation Nord.....	40
3)	Orientation Est.....	40
4)	Orientation Ouest	41
2.1.4	Les facteurs déterminants de l'orientation	41
2.2	Les ouvertures ; vers une meilleure optimisation de lumière naturelle.....	43
2.2.1	Définition des ouvertures	43
2.2.2	Les types des ouvertures :.....	44

1) Éclairage latéral.....	44
2) Éclairage zénithal	49
3) Éclairage composé :.....	54
2.2.3 Influence de position des ouvertures sur la lumière naturelle	54
2.2.4 Influence de dimensions des ouvertures sur la lumière naturelle :.....	55
2.2.5 Influence de la forme des ouvertures sur la lumière naturelle :.....	56
2.3 Les matériaux de contrôle solaire.....	58
2.3.1 Influence du facteur de transmission du vitrage.....	58
2.3.2 Influence de la présence d'un vitrage diffusant	58
2.3.3 Les matériaux influençant l'apport de la lumière naturelle.....	59
Conclusion.....	63
Chapitre 03 : La simulation de cas d'étude.....	32
Introduction	64
1 Présentation de la ville de Bejaïa.....	64
1.1 Situation de La ville de Bejaia	65
1.2 Topographie et morphologie	65
1.3 Le climat.....	66
2 Présentation de cas d'étude	66
2.1 Fiche technique.....	67
2.2 Justification de choix.....	67
2.3 Situation géographique.....	68
2.4 Analyse architecturale	68
2.5 Étude des façades	71
2.6 Les ouvertures forme, type et matériaux	71
3 Evaluation de l'éclairement naturel dans un centre commercial mesures in situ et modélisation numérique.....	73
3.1 Les mesures In-situ (étude empirique)	73
3.1.1 Outils de mesure.....	73
3.1.2 Procédure d'utilisation	74
3.1.3 Le protocole.....	74
3.2 La simulation numérique.....	75
3.2.1 Présentation du logiciel Dialux Evo.....	75
3.2.2 Les étapes de la simulation par le logiciel DialuxEvo.....	76
3.3 Validation de model de mesure	77
3.3.1 Analyse et interprétation des résultats de prises des mesures in situ.....	77
3.3.2 Analyse et interprétation des résultats de simulation par le logiciel DialuxEvo	79
3.4 Analyse et interprétation des résultats des simulations	80
3.4.1 Analyse et interprétation des résultats de 21 mars	81
3.4.2 Analyse et interprétation des résultats de 21 juin.....	82
3.4.3 Analyse et interprétation des résultats de 21 décembre.....	84

4	Recommandations pour l'amélioration de l'éclairage naturel.....	86
	Conclusion.....	87
	Chapitre 04 : Application des résultats de recherche dans le cadre du projet de fin d'études	64
	Introduction	88
5	Le choix de projet de fin d'étude.....	88
6	Analyse de site d'intervention.....	89
6.1	Choix de site.....	89
6.2	Situation et présentation	89
6.3	Accessibilité	89
6.4	L'environnement immédiat	90
6.5	Climatologie	91
6.5.1	Ensoleillement.....	91
6.5.2	Température.....	91
6.5.3	Les vents dominant:.....	92
6.6	Schéma de principe existant	92
6.7	Schémas de principe proposé	93
6.8	Les scénarios	94
6.9	Genèse du projet.....	96
6.10	L'organigramme du projet.....	97
6.11	Plan de masse :	98
7	L'intégration des trois stratégies analysées dans le cadre du projet de fin d'études	98
7.1	L'orientation.....	98
7.2	Les ouvertures	99
7.3	Les matériaux de contrôle solaire.....	101
8	Vérification de la pertinence de la conception de notre projet architectural	101
8.1	Résultats obtenus pour le 21 Mars/septembre :	102
8.2	Résultats obtenus pour le 21 Juin	103
8.3	Résultats obtenus pour le 21 Décembre	104
	Conclusion :	108
	Conclusion générale	89
	Bibliographie	107
	Annexes.....	121

Dédicace

*Je dédie ce mémoire à mes parents, en particulier à **mon père**, dont la mémoire et l'amour continuent de m'accompagner chaque jour. À **ma mère**, pour son soutien sans faille, sa force et son amour éternel.*

*À **mes quatre frères**, pour leur présence constante et leur encouragement tout au long de ce parcours.*

*Je tiens également à dédier ce travail à **ma tante**, pour sa générosité et son soutien sincère.*

Un grand merci à mon enseignant encadrant, pour ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de cette aventure académique.

À mes amis, pour leur soutien, leur amitié et leur motivation, qui ont été une source d'inspiration pendant toute la durée de ce travail.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, je vous exprime ma plus sincère gratitude.

Remerciement

Avant toute chose, je remercie Dieu, Le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la volonté de mener ce travail jusqu'à son terme. C'est grâce à Sa guidance et à Sa bénédiction que j'ai pu surmonter les moments de doute et de difficulté.

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Monsieur Amír Amar**, mon encadrant, pour sa disponibilité, sa bienveillance, ses conseils éclairés et sa confiance. Son accompagnement a été précieux tout au long de ce mémoire, et je lui en suis sincèrement reconnaissant.*

*Mes remerciements vont aussi aux **membres du jury**, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, le temps qu'ils y ont consacré, ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives qui contribueront à mon amélioration personnelle et professionnelle.*

*Je remercie également tous les enseignants du **département d'architecture de l'Université de Bejaïa**, qui m'ont transmis non seulement des connaissances, mais aussi une passion pour le métier d'architecte. Merci pour votre engagement et votre rigueur.*

*Du fond du cœur, je remercie ma **mère**, pour son amour, ses prières et son soutien inconditionnel. Elle a été ma force silencieuse dans les moments difficiles. Mes remerciements vont aussi à mes **quatre frères**, pour leur présence rassurante, leurs encouragements et leur complicité qui m'ont porté tout au long de ce parcours. À ma **tante**, merci pour ton affection, tes mots de réconfort et ton aide précieuse.*

*Je rends un hommage particulier à la mémoire de mon **père**, dont l'absence m'accompagne chaque jour, mais dont l'exemple et les valeurs restent vivants en moi. Ce travail est aussi le fruit de ce qu'il m'a transmis.*

*Enfin, je remercie mes **amis**, pour leur présence, leur écoute, leur soutien moral et les moments partagés qui ont rendu cette période plus légère et plus humaine.*

Chapitre Introductif

Louis Kahn *"Une pièce n'est pas une pièce sans lumière naturelle."*

Peter Zumthor *"la lumière et l'ombre dessinent l'espace. L'architecture, c'est jouer avec Cette matière."*

Alvar Aalto *"L'architecture doit faire face à la lumière et à l'obscurité, pas seulement par l'ouverture de fenêtres, mais en créant des espaces où la lumière est vivante."*

I. Introduction générale

Au cours du dernier siècle, l'énergie s'impose aujourd'hui comme un facteur clé sur les plans économique et stratégique, représentant le succès et le développement. Au fil du temps le nombre de la population et le niveau de vie augmentent, la demande mondiale en énergie augmente également. A cet effet, il serait judicieux de mesurer le progrès économique en observant une augmentation continue et de l'exploitation et de la consommation des ressources fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz.

Dans ce contexte, les bâtiments à énergie zéro représentent un pas décisif vers des solutions durables face aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels. En visant Un équilibre énergétique entre ce qui est produit et ce qui est consommé, ces bâtiments reposent sur des systèmes performants et des alternatives renouvelables, comme l'énergie solaire ou la géothermie. En réduisant leur impact environnemental et en limitant l'utilisation des ressources fossiles, ils offrent un cadre de vie sain et contribuent activement à l'évolution vers un mode de vie plus respectueux de l'environnement. Ces bâtiments incarnent une vision moderne de l'architecture durable et de l'efficacité énergétique.

Par ailleurs, bénéficier de la lumière naturelle est non seulement essentiel, mais vital pour le bon fonctionnement de notre organisme. En effet, cette lumière influence directement notre bien-être, notre confort, ainsi que notre santé physique et mentale. Cependant, nos modes de vie actuels nous amènent à passer davantage de temps à l'intérieur qu'à l'extérieur. Il est donc crucial de garantir une bonne luminosité dans les bâtiments afin de tirer pleinement parti de ses bienfaits.

Il est clair que l'intégration de la lumière naturelle est essentielle dans la conception architecturale des bâtiments. Son impact sur le bien-être de l'homme et les performances énergétiques d'un bâtiment ne doivent pas être pris à la légère. En effet, l'éclairage naturel ne se résume pas qu'à éclairer l'intérieur mais procure de la chaleur, crée du confort visuel et rythme le biologique. En maîtrisant bien le rapport à la lumière du jour, il est possible de créer des environnements intérieurs plus agréables et stimulants. Cela réduit la nécessité d'éclairer à la lumière artificielle, ce qui se traduit par une utilisation réduite de l'énergie.

Dans les bâtiments à énergie zéro, où l'objectif est de produire une quantité d'énergie équivalente à leur consommation, la lumière naturelle devient un atout incontournable. En maximisant son apport, on réduit encore davantage la demande en éclairage artificiel, contribuant à l'efficacité énergétique globale de la construction. Pour exploiter pleinement la lumière naturelle dans ces bâtiments, il est essentiel de mettre en place une conception architecturale intégrée, s'appuyant sur des techniques et des facteurs clés.

Aujourd'hui, la complexité extrême de la compréhension du comportement de la lumière naturelle incite de nombreux architectes à privilégier un éclairage artificiel, plus facilement contrôlable, au détriment des qualités uniques de la lumière naturelle. Pourtant, cette dernière offre l'éclairage le plus agréable, efficace et économique, à condition de pouvoir s'en protéger quand cela est nécessaire. Sa variation apporte un confort précieux aux occupants, et son usage réfléchi représente une opportunité essentielle pour valoriser les performances architecturales, énergétiques et écologiques d'un bâtiment. L'éclairage naturel s'impose ainsi comme l'éclairage d'ambiance par excellence.

II. Problématique :

En Algérie, les activités liées à la production et à la consommation énergétique, notamment dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %. Selon le centre de développement des énergies renouvelables (CDER, 2021), la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie est de 12,3 % en 2019. Cependant, l'État algérien commence à envisager des solutions alternatives en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie visait une puissance installée d'origine

renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Mais sept ans après ce plan, les réalisations sont modestes : le solaire n'a produit que 0,8 % de l'électricité du pays en 2021, et l'éolien 0,01 %.

Aujourd'hui, face à l'urgence climatique et à la diminution progressive des combustibles fossiles, le secteur du bâtiment doit repenser ses modes de construction. Dans ce contexte, bâtiment à énergie zéro, qui couvre intégralement ses besoins énergétiques grâce à sa propre production, se présente comme une solution innovante et nécessaire. Ces bâtiments visent à réduire la dépendance aux hydrocarbures tout en offrant un cadre de vie confortable et sain pour leurs occupants.

L'optimisation de l'efficacité énergétique d'un bâtiment peut être réalisée grâce à diverses solutions. En effet, l'optimisation de la lumière naturelle représente une importante stratégie dans les bâtiments à énergie zéro. Participant à la diminution de la consommation d'énergie. En exploitant au maximum cette ressource gratuite et renouvelable, il est envisageable de réduire considérablement notre dépendance énergétique aux ressources fossiles, tout en favorisant le confort et la qualité de vie des occupants et de valoriser l'immobilier.

Ce type de bâtiment est peu développé à Béjaïa, et ce malgré un fort potentiel grâce au climat méditerranéen favorable pour l'énergie solaire. La configuration des aides, des formations et de la sensibilisation peut aider à développer ce type de construction, tout en économisant de l'énergie et en préservant l'environnement.

De ce fait, l'objectif de cette recherche est de répondre à la question suivante :

- Quelles stratégies de conception architecturale peuvent être mises en œuvre pour optimiser l'apport de lumière naturelle dans les bâtiments à énergie zéro, et comment ces stratégies contribuent-elles à la diminution de la consommation d'énergie?

III. Hypothèse :

L'efficacité énergétique est considérée comme un enjeu majeur en notre temps. En effet, une bonne orientation, des ouvertures optimisées et des matériaux de contrôle solaire permettent de réduire de manière marquée la consommation énergétique des bâtiments en maximisant la lumière naturelle.

IV. Objectifs de la recherche :

- Identifier les meilleures pratiques architecturales pour optimiser l'équilibre entre apport de lumière naturelle et efficacité énergétique dans les bâtiments à énergie zéro.
- Analyser les configurations d'ouvertures et de matériaux qui maximisent l'apport de lumière naturelle tout en minimisant la consommation énergétique pour l'éclairage.

V. Méthodologie de recherche :

Pour répondre à la problématique et atteindre les objectifs fixés, notre travail repose sur une méthodologie structurée en trois étapes : la problématisation, la conceptualisation et l'expérimentation. Nous avons d'abord mené une recherche bibliographique et documentaire (livres, rapports officiels, thèses, articles) afin de définir les notions et concepts liés à l'amélioration de la gestion de la lumière naturelle dans les espaces bâtis à énergie zéro. La phase de conceptualisation a permis d'analyser les différentes stratégies architecturales et techniques d'éclairage naturel en s'appuyant sur un cadre théorique solide. Enfin, l'expérimentation, à travers une approche empirique via logiciel dialux evo et analytique, s'est fondée sur une étude de cas portant sur Ritaj Mall, combinant simulations numériques et analyses des résultats. Cette démarche vise à valider les stratégies lumineuses et à proposer des solutions optimisées pour une meilleure intégration de l'apport en lumière naturelle dans les bâtiments durables.

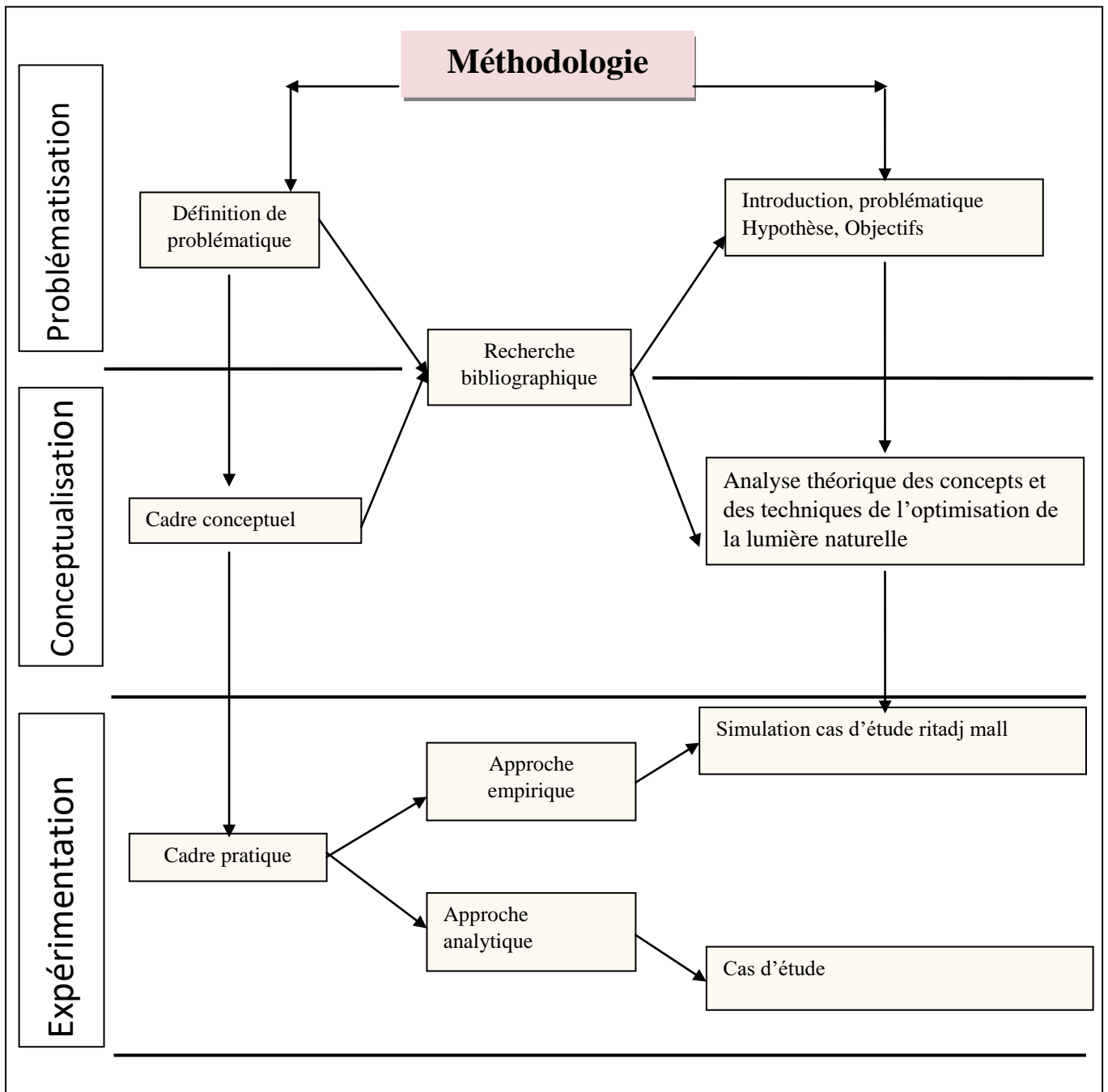


Figure 1:la méthodologie de recherche

Source :(auteur 2024)

VI. Structure de mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, encadrés par une introduction générale et une conclusion.

- **Chapitre introductif**

Ce premier chapitre présente l'introduction générale du sujet. Il expose la problématique, les hypothèses et les objectifs de la recherche. Il décrit également la méthodologie adoptée ainsi que l'organisation générale du mémoire.

- **Partie théorique**

Elle se compose de deux chapitres dédiés à l'analyse conceptuelle du sujet :

- **Chapitre 1** : Ce chapitre met en évidence l'importance des bâtiments à zéro énergie, en soulignant leurs impacts économiques et environnementaux. Il insiste également sur le rôle fondamental de la lumière naturelle dans la conception architecturale, notamment en tant que levier de réduction de la consommation énergétique.

- **Chapitre 2** : Ce chapitre est centré sur les facteurs influençant l'apport de lumière naturelle dans un bâtiment. Trois axes principaux y sont développés : l'orientation, les ouvertures et les matériaux de contrôle solaire. Ceux-ci sont considérés comme des éléments clés pour une captation optimale de la lumière et une meilleure efficacité énergétique.

- **Partie empirique**

Cette partie comprend deux chapitres consacrés à l'analyse pratique et à l'application de la recherche :

- **Chapitre 3** : Ce chapitre évalue le confort visuel et l'apport en lumière naturelle dans un centre commercial à travers une analyse qualitative. Il présente la méthodologie, le cas d'étude et propose des recommandations pour améliorer l'éclairage naturel et réduire la consommation énergétique, en vue du projet de fin d'étude.

- **Chapitre 4** : Ce dernier chapitre est dédié à la présentation du projet de fin d'étude. Il retrace les différentes étapes de son élaboration et met en application les principes et résultats issus des recherches précédentes.

- **Conclusion générale** : Elle permet de confirmer ou d'infirmer les hypothèses de départ, tout en synthétisant les principaux résultats de l'étude et en ouvrant sur des perspectives futures.

***Chapitre 01 : Optimisation de la lumière
naturelle dans les Bâtiments à basse
consommation énergétique***

Introduction

Dans un contexte mondial marqué par la crise énergétique et les enjeux environnementaux, l'architecture durable prend une place centrale dans les politiques de transition énergétique. Parmi les concepts émergents, les bâtiments à énergie zéro représentent une solution innovante, visant à équilibrer la consommation énergétique avec une production locale issue de sources renouvelables. Ce type de bâtiment repose sur des stratégies de conception rigoureuses, intégrant des systèmes performants, des matériaux efficaces, et une gestion optimisée des ressources naturelles.

Parmi ces ressources, la lumière naturelle occupe une place essentielle. Elle ne se limite pas à un apport visuel ; elle influence également le confort thermique et la qualité de vie des occupants et contribue significativement à la réduction de l'énergie consommée par l'éclairage artificiel. Exploiter efficacement l'éclairage naturel au sein des bâtiments à énergie zéro nécessite une approche intégrée dès les premières étapes de la conception architecturale.

Ce chapitre propose donc de définir le concept des bâtiments à énergie zéro, d'en comprendre le fonctionnement, les principes de conception, ainsi que les solutions techniques mises en œuvre pour optimiser la lumière naturelle. L'objectif vise à mettre en lumière l'interdépendance entre la qualité de la lumière naturelle, efficacité énergétique et performance environnementale des bâtiments contemporains.

1 Définition et principes des bâtiments à énergie zéro

1.1 Définition

Le concept du bâtiment à énergie zéro admet plusieurs définitions selon les contextes et les objectifs.

Selon François Vuille : l'expression de « zéro énergie » « *s'applique aux bâtiments confortables, qui produisent sur place, à partir de sources d'énergie renouvelables, et en moyenne sur l'année, plus d'énergie primaire qu'ils n'en consomment (bilan annuel exprimé en termes d'énergie primaire)* ». (François Vuille, 2015).

LAUSTENS J, estime que *Ce bâtiment est caractérisé par un bilan énergétique nul, sa production d'énergie équilibre sa consommation par le biais de faibles besoins d'énergie et des moyens de production d'énergie locaux.*». (Mokhnache, 2023)

A la lumière de ces définitions, on peut dire que les bâtiments à zéro énergie sont des structures qui produisent sur une période donnée, une quantité d'énergie équivalente à celle qu'elles consomment. Ces structures peuvent utiliser leur propre production ou puiser de l'énergie sur le réseau, favorisant ou non l'autoconsommation. Le bilan énergétique est généralement établi sur une année, exprimé en énergie primaire, et repose sur une production énergétique d'origine renouvelable.

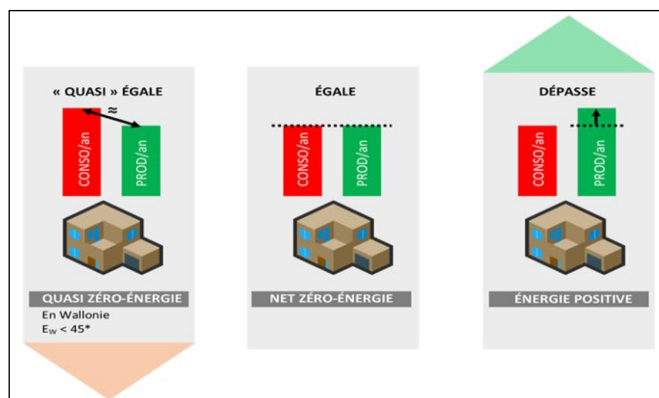


Figure 2: Type des bâtiments net énergie

Source : https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/04/def_batiments_energie.png

1.2 Le mode de fonctionnement des bâtiments zéro-énergie

Les bâtiments à énergie zéro visent à réduire l'impact carbone en équilibrant leur consommation d'énergie avec une production locale exclusivement à partir des solutions énergétiques renouvelables, comme le solaire photovoltaïque et les pompes à chaleur. Ces

technologies contribuent à garantir un chauffage, une ventilation et une climatisation efficaces, tout en limitant la dépendance aux énergies fossiles.

Pour maximiser leur performance énergétique, les bâtiments à énergie zéro intègrent des techniques passives, telles que l'isolation thermique de haute qualité, des fenêtres à haut rendement et une étanchéité soignée pour éviter les déperditions de chaleur. De plus, des appareils électroménagers économes et des éclairages à faible consommation viennent compléter ces mesures.

En cas de faible production d'énergie renouvelable, le bâtiment peut se connecter temporairement au réseau électrique, mais il compense cette consommation en injectant ses excédents d'énergie renouvelable lorsqu'il en produit davantage, car les bâtiments Net-ZEB produisent de l'énergie renouvelable sur place (par exemple, avec des panneaux solaires). Seulement, cette production peut varier selon les saisons ou les conditions météorologiques. Quand la production d'énergie renouvelable est faible (par exemple, la nuit ou pendant une période nuageuse), le bâtiment peut être amené à utiliser de l'énergie du réseau électrique pour combler ses besoins. Cependant, lorsqu'il produit plus d'énergie que nécessaire (par exemple, lors d'une journée ensoleillée), (Sabry, 2022) le surplus est réinjecté dans le réseau. Cette gestion permet au Net-ZEB d'atteindre un bilan énergétique annuel neutre, contribuant ainsi à une approche durable et respectueuse de l'environnement.

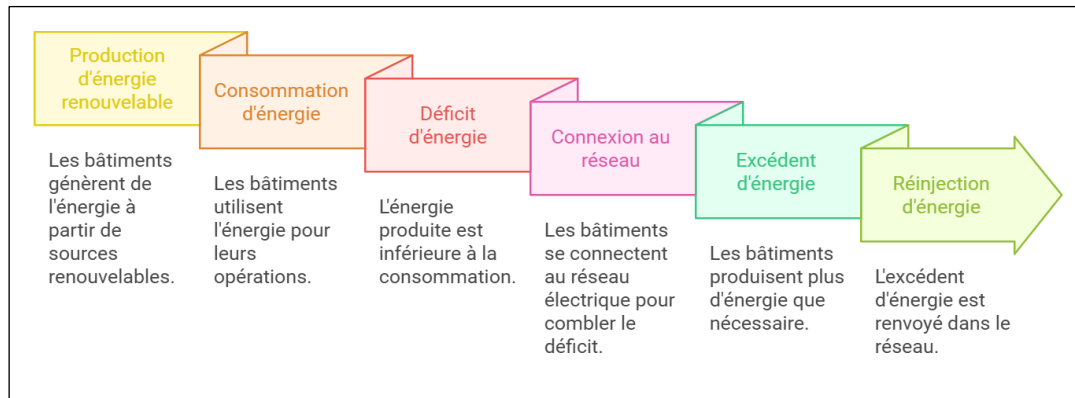


Figure 3: Gestion de l'énergie des bâtiments à énergie zéro
Source : (Auteur, 2024)

1.3 Les caractéristiques d'un bâtiment à zéro énergie

La conception des bâtiments à zéro énergie repose sur des principes fondamentaux visant à réduire la consommation énergétique et à améliorer l'efficacité de son utilisation. L'objectif est d'atteindre une harmonie entre la production d'énergie renouvelable et les

besoins en consommation en intégrant des stratégies de conception et de construction avancées.



Figure 4: Solution des bâtiments à énergie zéro
Source : (Auteur, 2024)

Ces principes combinent la génération d'énergies renouvelables et la diminution des besoins énergétiques. Ceci permet aux bâtiments à zéro énergie de réduire considérablement leur empreinte carbone tout en offrant un modèle d'efficacité et de durabilité pour un avenir énergétique responsable.

1.4 Les principes de conception d'un bâtiment à énergie zéro

Face aux enjeux environnementaux et énergétiques, la conception de bâtiments à énergie zéro s'impose comme une solution incontournable pour réduire l'empreinte carbone et favoriser une transition énergétique durable. Ces bâtiments sont conçus pour minimiser leur consommation énergétique tout en intégrant des systèmes capables de produire une quantité équivalente d'énergie renouvelable. Ce modèle novateur allie efficacité énergétique, utilisation rationnelle des ressources, et adoption de technologies innovantes pour satisfaire les besoins des usagers tout en respectant l'environnement.

On explore les principaux principes qui guident la conception de bâtiments à énergie zéro, en mettant l'accent sur deux aspects fondamentaux : La réduction de la demande énergétique et la production d'énergies renouvelables sur place. (Boursas, 2012) Cette conception repose sur plusieurs facteurs essentiels, comme l'optimisation de l'enveloppe bâtie, notamment la sélection des matériaux et l'intégration de solutions énergétiques renouvelables.

Ces éléments visent à améliorer l'efficacité énergétique et à réduire l'impact environnemental tout en garantissant un confort optimal, et Ceci peut être réalisé par :

1.4.1 Isolation et Conception du bâtiment

Une isolation efficace et une conception bien pensée sont cruciales pour limiter la consommation d'énergie. Cela comprend des solutions telles que l'isolation améliorée, la gestion de l'étanchéité à l'air et l'orientation optimale du bâtiment.

1. **Isolation renforcée de l'enveloppe du bâtiment** : pour la diminution des déperditions
2. **Élimination des ponts thermiques** : Les ponts thermiques, qui facilitent le transfert de chaleur au sein de l'infrastructure d'un bâtiment, doivent être supprimés.(Mokhnache, 2023) Ces pertes énergétiques peuvent être causées par des matériaux thermo conducteurs ou par l'effet de l'humidité.

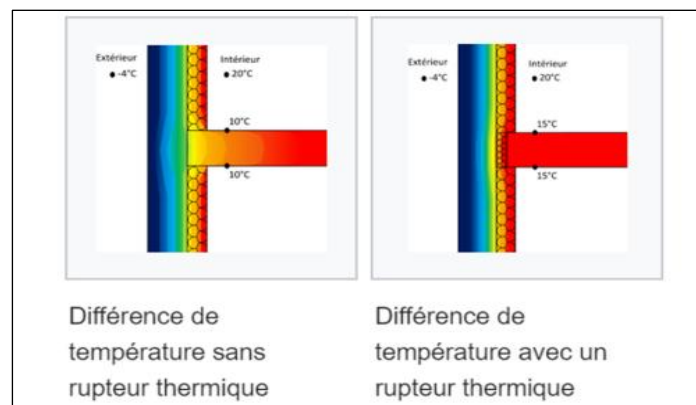


Figure 5 : La solution d'isolation thermique

Source : <https://www.actis-isolation.com/wp-media/uploads/2021/06/rupteur-thermique2.png>

3. **Étanchéité à l'air** : Cela fait référence à la capacité d'un bâtiment à éviter les infiltrations d'air et d'humidité, ou les fuites d'air indésirables à travers son enveloppe. Une bonne étanchéité améliore l'efficacité énergétique en réduisant les pertes de chaleur et en maintenant un climat intérieur confortable.(James, 2004)



Figure 6 : l'étanchéité à l'air dans une maison

Source : <https://energieplus-lesite.be/ameliorer/etancheite-a-l-air/ameliorer-l-etancheite-a-l-air/>

4. Implantation et orientation de bâtiment :

Placer le bâtiment de manière à exploiter au maximum l'ensoleillement, en orientant les façades principales vers le sud (dans l'hémisphère nord) pour maximiser les gains solaires en hiver tout en minimisant les surchauffes en été. (Atik-Mehaoued, 2019)



Figure 7 : L'orientation de la maison

Source: <https://www.maisons-orca.fr/maison-bbc/implantation-maison-bbc.asp>

5. Forme et compacité de bâtiment :

Concevoir un bâtiment avec une forme compacte permet de limiter la surface extérieure exposée au froid, réduisant ainsi les pertes thermiques. Un faible rapport entre le volume et la surface permet une meilleure conservation de la chaleur et réduit les besoins en chauffage. (Belkhir, 2022)

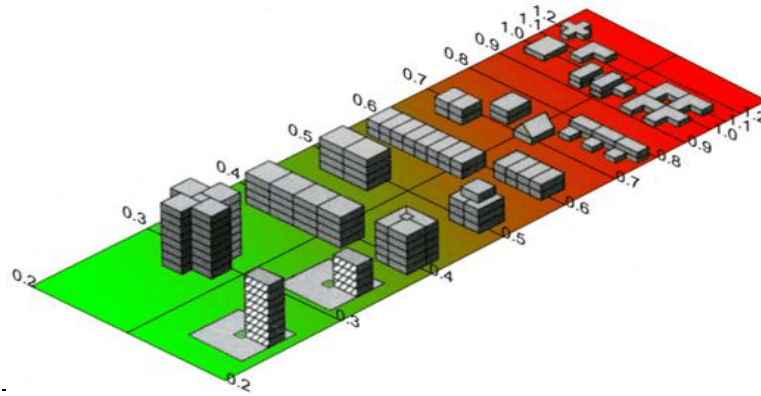


Figure 8 : compacité des différentes formes des bâtiments
Source : *Compacité de Différentes Formes Géométriques Cherqui...*, s. d.)

1.4.2 Utilisation des matériaux spécifiques

La sélection des matériaux de construction ainsi que les vitrages influe directement sur la performance énergétique du bâtiment. Des matériaux efficaces et un vitrage adapté permettent de mieux gérer la chaleur et la lumière.

1. Le choix des matériaux de construction :

Les matériaux sélectionnés influencent significativement la consommation énergétique, car leurs propriétés déterminent leur performance selon le climat et le type de bâtiment, impactant ainsi le confort intérieur et l'efficacité énergétique. (James, 2004)

2. Taille, position et type de vitrage :

Choisir judicieusement la taille des fenêtres et leur type de vitrage en fonction de l'orientation permet de maximiser l'entrée de lumière naturelle tout en minimisant les pertes de chaleur. Les fenêtres à triple vitrage ou les vitrages à faible émissivité permettent de réduire les déperditions thermiques. (Semahi, 2013) Une gestion correcte de l'ensoleillement naturel améliore également la qualité de l'éclairage intérieur et réduit la nécessité d'éclairage artificiel.

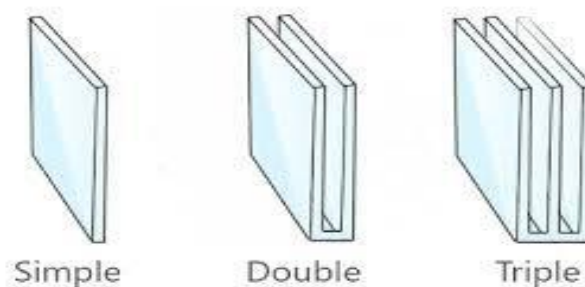


Figure 9 : Les types de vitrage

Source : <https://www.wonderglass.fr/blog/les-differents-types-de-vitrages/>

3. Protection solaire :

Installer des protections solaires comme des auvents, des pergolas, ou des stores extérieurs peut aider à filtrer les rayons directs du soleil pendant les mois d'été, prévenant ainsi la surchauffe et réduisant les besoins en climatisation. (Rahmouni, 2020) Ces systèmes sont ajustables pour s'adapter aux variations saisonnières, maximisant l'ensoleillement hivernal pour réchauffer naturellement le bâtiment et protégeant contre les surchauffes estivales.

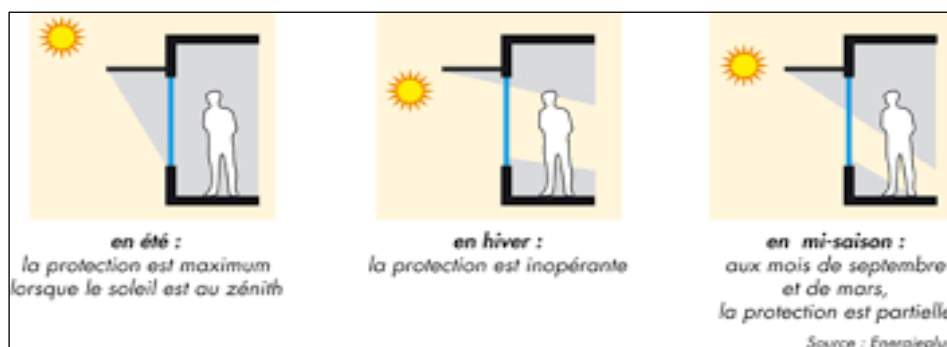


Figure 10 : protection solaire bâtiment

Source : <https://publications.eti-construction.fr/fiches/performance-energetique-des-batiments-a-renover-dt23/installer-une-protection-solaire-pour-un-batiment-0173>

1.4.3 Solutions énergétiques et renouvelables

Les solutions énergétiques et les technologies renouvelables, telles que le solaire thermique, les panneaux photovoltaïques, le puits canadien ou les petites éoliennes, permettent de réduire la dépendance aux énergies fossiles. L'efficacité énergétique et la sobriété énergétique, couplées à ces systèmes, garantissent un bâtiment autonome et respectueux de l'environnement.

1. Efficacité énergétique :

Elle consiste à optimiser l'usage de l'énergie tout en garantissant les performances. Cela repose sur l'utilisation d'appareils et équipements à haute performance, comme : (Cárcel Carrasco et al., 2021)

- Appareils électroménagers économes (réfrigérateurs, lave-linge, etc.).
- Éclairage LED, qui consomme peu d'énergie.
- Systèmes CVC performants (pompes à chaleur, climatiseurs efficaces).

2. Solaire thermique :

Le solaire thermique utilise les rayonnements du soleil pour les convertir directement en chaleur. (Aboina, 2020) Ce système permet de produire de l'énergie calorifique destinée à des besoins comme le chauffage de l'eau ou la régulation de températures agréables à l'intérieur des bâtiments.

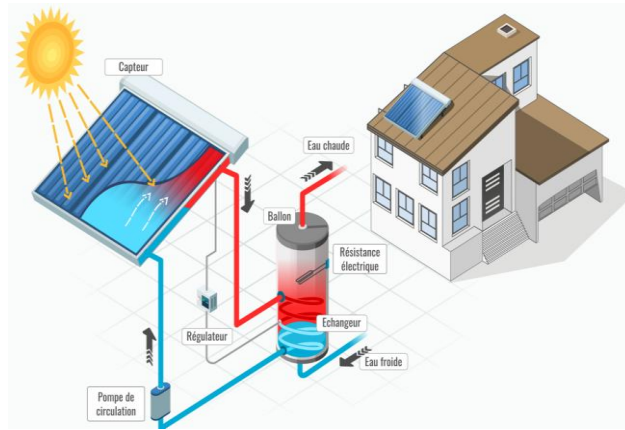


Figure 11 : capture solaire thermique

Source : <https://www.les-energies-renouvelables.eu/wp-content/uploads/2024/09/panneau-thermique-eau-chaude-e1726050279178-768x477.png>

3. Solaire photovoltaïque couplé au réseau :

Le système solaire photovoltaïque utilise des cellules photovoltaïques pour convertir les rayonnements solaires en électricité. Cette énergie peut alimenter directement le bâtiment et, lorsqu'elle dépasse les besoins locaux, être injectée dans le réseau électrique public. (Cárcel Carrasco et al., 2021)

Inversement, en cas d'insuffisance de production solaire, le bâtiment peut puiser l'électricité nécessaire depuis le réseau, assurant ainsi un fonctionnement équilibré. Cette solution optimise l'exploitation de sources d'énergie renouvelable tout en garantissant une alimentation continue.

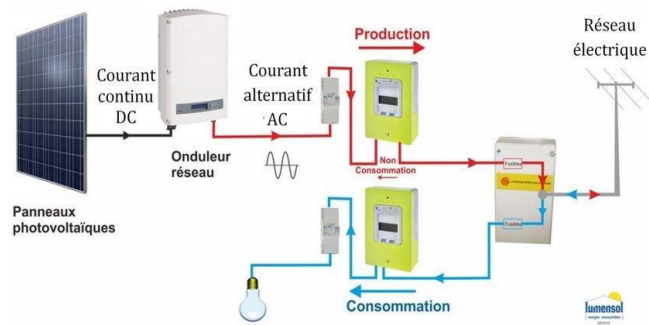


Figure 12 : panneau photovoltaïque couplé avec le réseau

Source : https://www.researchgate.net/profile/Amededjihunde-Hounnou-2/publication/344704563/figure/fig20/AS:983835613351939@1611576097112/Systeme-photovoltaïque-connecte-au-reseau-electrique-89_W640.jpg

4. Puits canadien :

Le puits canadien fonctionne en faisant circuler une partie de l'air frais à travers des conduits enterrés à une profondeur de 1 à 2 mètres. (Ferradji, 2017) Ce passage dans le sol permet de préchauffer l'air en hiver ou de le rafraîchir en été avant qu'il ne soit introduit dans le bâtiment, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale.

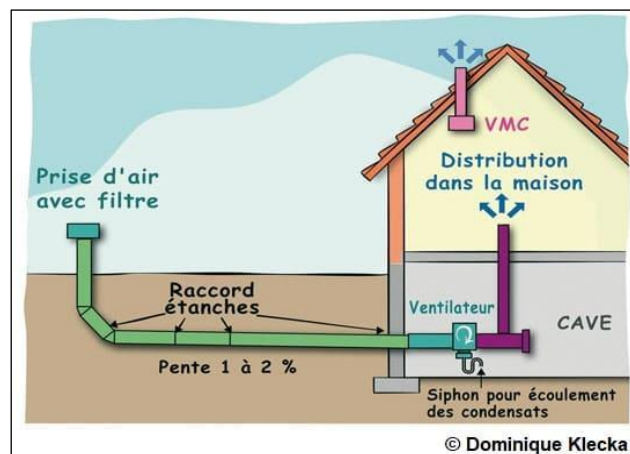


Figure 13 : le puits canadien

Source : <https://www.terrevivante.org/contenu/le-puits-canadien-fonctionne-ete-comme-hiver/>

5. Petite éolienne :

L'énergie éolienne exploite la force cinétique des vents pour produire de l'électricité de manière renouvelable. Le terme « éolien » provient de la mythologie grecque, où « Éole = dieu des vents », symbolisait la maîtrise des courants d'air. (Aboina, 2020) Les petites éoliennes, adaptées aux zones résidentielles ou rurales, transforment cette énergie en électricité utilisable, contribuant à réduire la dépendance aux types d'énergies traditionnelles.

6. Pompe à chaleur (PAC) :

Il s'agit d'un système thermodynamique qui capte et transfère la chaleur d'un environnement froid vers un espace à chauffer. Fonctionnant comme l'inverse d'un réfrigérateur. Elle capte les calories de l'air ambiant, de l'eau ou du sol afin de les transformer en chaleur destinée au chauffage ou à la production d'eau chaude. (Makhloufi, 2023) Ce dispositif, à la fois efficace et économe en énergie, Représente une option durable visant à réduire la demande énergétique.

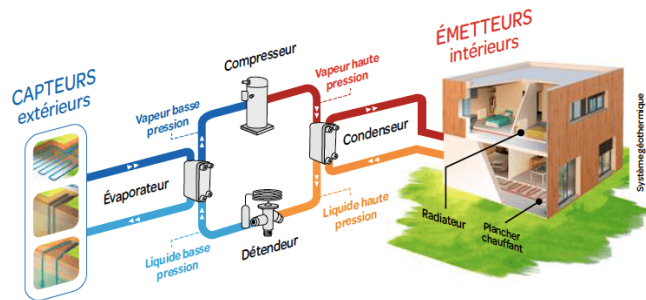


Figure 14 : principe de pompe à chaleur

Source : <https://adenr.com/nos-produits/guide-pompe-a-chaleur/pompe-a-chaleur-fonctionnement/principe-pompe-a-chaleur>.

1.5 Avantages des bâtiments à énergie zéro et impacts environnementaux

Les bâtiments à énergie zéro jouent un atout pour la protection de l'environnement, tout en assurant des avantages significatifs sur les plans écologique, économique et financier. En produisant localement l'intégralité de l'énergie qu'ils consomment grâce à des sources renouvelables, ces bâtiments contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à l'optimisation de la consommation d'énergie, et à une gestion durable des ressources naturelles. (Ghedamsi, 2018)

Sur le plan économique, ils réduisent la dépendance au réseau électrique, entraînent une baisse des factures énergétiques, améliorent la sécurité énergétique et créent des opportunités économiques, notamment grâce à la possibilité de revendre le surplus d'énergie produit.

Du point de vue écologique, leur conception favorise l'exploitation massive des énergies renouvelables, réduisant considérablement l'empreinte carbone et limitant presque a

éliminer totalement les émissions de gaz à effet de serre. (Sabry, 2022) Enfin, ces bâtiments se distinguent par des avantages financiers, incluant une réduction des coûts opérationnels à long terme et une valorisation accrue grâce à leur performance énergétique exceptionnelle.

2 La consommation énergétique, un regard général

2.1 Définition de la consommation énergétique

la consommation énergétique indique la quantité d'énergie dépensée dans un logement pour alimenter ses différents équipements, tels que le chauffage, la génération d'eau chaude ou les appareils électroménagers...etc. elle est exprimée en kilowattheures (kWh) sur les factures de gaz naturel ou d'électricité. (Mokhnache, 2023)



Figure 15 : Les classes énergétiques

Source : https://static8.depositphotos.com/1241729/873/v/450/depositphotos_8737683-stock-illustration-energy-class-energieberatung-bar-chart.jpg

2.2 La consommation énergétique mondiale et en Algérie

Depuis toujours, l'humanité a consommé de l'énergie, principalement issue de sources renouvelables, telles que la biomasse, l'énergie hydraulique ou l'énergie animale. Cette consommation est restée relativement stable jusqu'à la révolution industrielle, une période marquée par une forte croissance industrielle et économique, ainsi que par une augmentation rapide de la population mondiale. À partir des années 1950, l'utilisation des énergies fossiles (gaz, pétrole et charbon) a connu un essor considérable, entraînant une hausse exponentielle de leur consommation.

Depuis la révolution industrielle, la consommation énergétique mondiale a considérablement augmenté, dominée par les énergies fossiles (80 % en 2021). Cette croissance a des impacts environnementaux graves, tels que l'aggravation de l'effet de serre, la fonte des glaciers et l'augmentation du niveau des océans, menaçant les écosystèmes et la

biodiversité. Bien que la production d'énergies renouvelables ait progressé, elle ne représente que 15,8 % de la production électrique mondiale en 2024, restant insuffisante pour compenser les effets négatifs des énergies fossiles. (MEM, 2021)

Selon le CEREFE, « la consommation finale d'énergie est passée de 31,6 millions tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2010 à 50,4 millions TEP en 2019, soit une augmentation de 18,7 millions TEP par rapport à 2010 ». (CEREFE: la consommation énergétique nationale a augmenté de 59% en dix ans, s. d.)

En Algérie, la demande énergétique a doublé entre 2010 et 2019, atteignant 50,4 millions de TEP, en raison de l'amélioration du cadre de vie et du progrès industriel. (MEM, 2021) Bien qu'une légère augmentation de la production d'énergie primaire ait été observée en 2022, la réduction de la production de gaz naturel souligne l'urgence d'adopter des solutions énergétiques durables.

3 Lumière naturelle et technique d'optimisation

La lumière naturelle joue un rôle clé dans l'architecture et le confort des espaces intérieurs. Bien au-delà de sa fonction d'éclairage, elle modifie la perception des formes et des matériaux et des couleurs, tout en améliorant le confort des occupants et la performance énergétique des bâtiments. Comprendre ses sources, ses interactions avec l'environnement et les stratégies permettant de l'optimiser est essentiel pour concevoir des espaces lumineux, agréables et performants. Cette partie explore les principes fondamentaux de la lumière naturelle, ses phénomènes physiques et les différentes stratégies permettant de la capter, la transmettre, la distribuer et la contrôler efficacement dans l'architecture contemporaine.

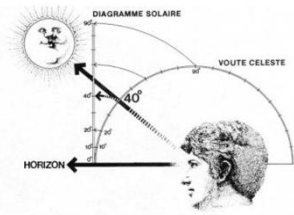
3.1 La lumière naturelle





Selon Reiter & Herde, « 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 ». (Reiter & Herde, 2004)

3.2 Les sources de la lumière

Une source lumineuse peut être perçue comme un corps émettant de l'énergie rayonnante à partir d'une surface ou d'un volume ».

Il serait réducteur de se concentrer uniquement sur le soleil. Bien qu'il soit la source principale de lumière naturelle sur Terre, il est important de considérer aussi les sources secondaires générées par des phénomènes optiques comme la réflexion, la diffusion et l'absorption du rayonnement solaire. Les sources lumineuses se divisent en deux catégories : (Daich, 2011)

Source		Description	Illustration
Source principale	Le soleil	Le soleil, source primaire de lumière, convertit une partie de son énergie nucléaire en lumière, capable d'éclairer l'univers. Il émet non seulement une lumière blanche, mais aussi des rayonnements dans le spectre électromagnétique, tels que les infrarouges et les ultraviolets.(Mokhnache, 2023)	
Les sources secondaires	1. La voûte céleste	Les rayonnements solaires traversant l'atmosphère subissent des modifications spectrales et directionnelles dues aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Spatialement, la lumière est redistribuée, créant ainsi une source secondaire qui provient de l'hémisphère céleste situé au-dessus de l'horizon. Cette redistribution génère deux types de lumière distincts : la lumière directe, liée au rayonnement solaire non modifié, et la lumière diffuse, provenant du reste du ciel, qui ensemble forment la lumière totale du ciel.(Daich, 2011)	
	2. Le ciel	On distingue quatre types de ciels, chacun présentant une répartition particulière de la luminance sur la voûte céleste. Cette dernière varie selon la latitude, l'altitude, la saison et l'heure.(Maamari, 2004)	

	<p>2.1. Le ciel uniforme</p>	<p>Un type de ciel couvert par des nuages laiteux ou une atmosphère chargée de poussières où le soleil est invisible.</p> <p>Sa luminance est uniforme et ne dépend d'aucun paramètre géométrique, étant constante en tout point du ciel à un instant donné.</p>	
	<p>2.2. Ciel couvert</p>	<p>ce modèle de ciel, défini par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) décrit une distribution de luminance qui varie en fonction de la position sur la voûte céleste, avec une intensité maximale au zénith, décroissant progressivement vers l'horizon.</p> <p>ce modèle de ciel représente à une couverture nuageuse légère, où le soleil est caché par des nuages clairs.</p>	
	<p>2.3. Ciel clair sans soleil</p>	<p>Ce type de ciel se distingue par une luminance variable selon la position du soleil et des paramètres géométriques. Il génère un rayonnement diffus, dont l'intensité varie selon la position du soleil, sans inclure le rayonnement solaire direct.</p>	
	<p>2.4. Ciel clair avec soleil</p>	<p>Ce type de ciel se distingue par des valeurs de luminance qui changent en fonction de la position du soleil et des paramètres géométriques. Il génère un rayonnement diffus, dont l'intensité varie selon la position du soleil, tout en excluant le rayonnement solaire direct.</p>	
	<p>3. Les nuages</p>	<p>Les nuages, composés de fines gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace, réfléchissent une partie du rayonnement solaire vers l'espace, limitant ainsi la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre, et leur effet sur le rayonnement dépend de leur type et de leur quantité.(Cyril, 2004)</p>	

	4. L'albédo	L'albédo mesure la proportion de lumière réfléchie par un objet par rapport à celle qu'il reçoit, allant de 0 (aucune lumière réfléchie) à 1 (toute la lumière réfléchie). Les surfaces claires ont un albédo élevé, tandis que les surfaces foncées en ont un faible. La lumière solaire, composée de diverses radiations, est partiellement absorbée et réfléchie par les objets, ce qui détermine leur couleur. Le réchauffement climatique réduit l'albédo, augmentant ainsi la température de la planète. En l'absence de sources lumineuses comme le soleil, la lune et les étoiles, l'obscurité totale s'installe. (Daich, 2011)	
--	--------------------	---	--

Tableau 1 : les sources de la lumière naturelle
Source :(auteur, 2024)

3.3 Les phénomènes physiques de la lumière

Dans un environnement homogène et transparent, la lumière se propage sans déviation, en ligne droite, où les propriétés sont uniformes, et peut être considérée comme se déplaçant instantanément à l'échelle des bâtiments en raison de sa vitesse élevée. Lorsqu'elle rencontre un corps, son rayonnement peut subir plusieurs interactions : une partie est absorbée et convertie en chaleur (absorption), une partie est réfléchie (réflexion), et si le matériau est transparent, une partie de la lumière est transmise (transmission). (Reiter & Herde, 2004) Ces interactions sont quantifiées par les coefficients d'absorptivité, de réflectivité et de transmissibilité, représentant respectivement les pourcentages de lumière absorbée, réfléchie, et transmise. la trajectoire de la lumière peut aussi être altérée par des phénomènes tels que la réfraction, la diffraction ou la diffusion.

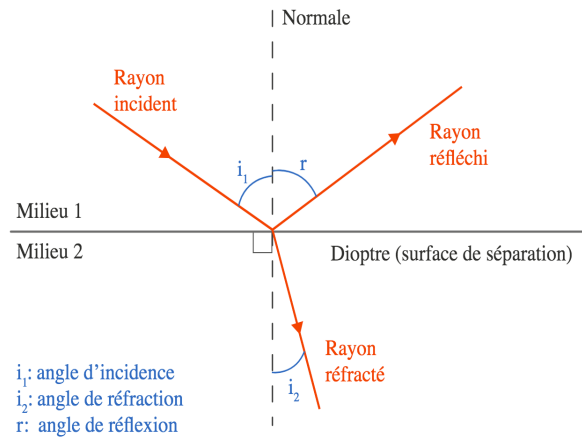


Figure 16 : la propagation de la lumière naturelle

Source : <https://www.afterclasse.fr/fiche/853/propagation-des-ondes-lumineuses>

3.3.1 Réflexion

La réflexion de la lumière se produit lorsqu'un rayon rebondit sur une surface, avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, on distingue trois types de réflexion : spéculaire, où la lumière est renvoyée dans une seule direction sur une surface polie ; diffuse, qui intervient sur des surfaces irrégulières, réfléchissant la lumière dans plusieurs directions, et pouvant être parfaite (répartition uniforme) ou quelconque (répartition aléatoire) ; et mixte, où la lumière est majoritairement diffusée, mais privilégiant une direction précise. La qualité de la réflexion dépend de la nature et de l'état de la surface rencontrée, les surfaces lisses et sans défauts tendant à produire une réflexion plus parfaite. (Zemmouri, 2010)

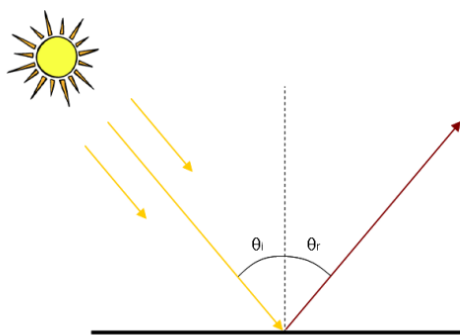


Figure 17 : la réflexion de la lumière naturelle

Source : <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/ressources/images/refSpeculaire.png>

3.3.2 La réfraction

La réfraction est le phénomène où un rayon lumineux change de direction en traversant la frontière entre deux milieux ayant des vitesses de propagation différentes. (Reiter & Herde, 2004). Ce phénomène résulte du changement de vitesse de la lumière, cela suit les lois de la géométrie optique de Snell-Descartes, et se produit généralement à l'interface de deux milieux ou lors d'un changement d'impédance.

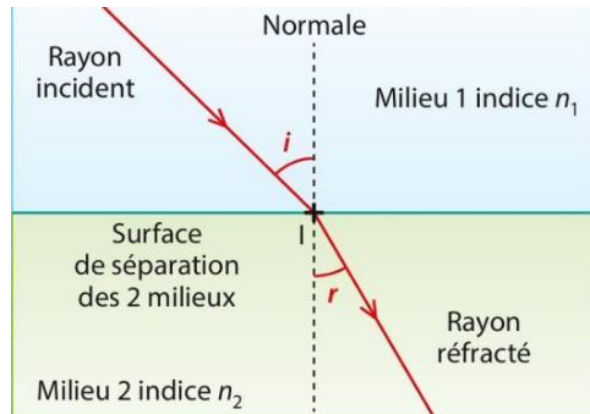


Figure 18 : La réfraction des rayons lumineux

Source :

https://fasoeducation.bf/cours_esu/secondaire/premiere/sp/physique/refraction_lumiere/res/27-d1.jpg

3.3.3 La transmission

La transmission de la lumière dépend de la nature des matériaux qu'elle traverse, qui peuvent être transparents, translucides ou opaques. Il existe quatre modes de transmission : (Zemmouri, 2010)

- **Transmission directionnelle** : la lumière suit un angle égal à l'angle d'incidence.
- **Transmission diffuse parfaite** : la lumière se répartit dans toutes les directions.
- **Transmission diffuse quelconque** : la lumière se diffuse de manière aléatoire.
- **Transmission mixte** : la lumière diffuse principalement dans une direction, tout en étant dispersée.

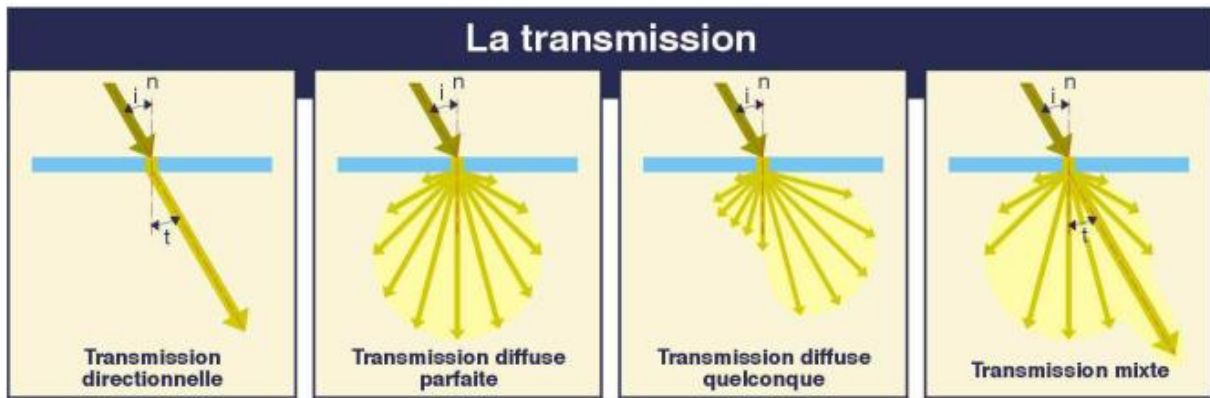


Figure 19 : Les quatre modes de transmission de la lumière naturelle
Source : <http://www.guide-clea.fr/wp-content/uploads/2015/07/ecla2.png>

3.3.4 La diffusion

La diffusion de la lumière se produit lorsque le rayonnement est dévié dans différentes directions en interagissant avec des particules. Elle peut être isotrope, répartie uniformément, ou anisotrope, suivant un motif spécifique. Ce phénomène se produit à la frontière entre deux milieux, ou à l'intérieur d'un milieu. Par exemple, dans l'air, les particules de poussière ou de fumée diffusent la lumière, et un observateur perçoit cette lumière diffusée, créant l'illusion d'un faisceau lumineux. (Daich, 2011)

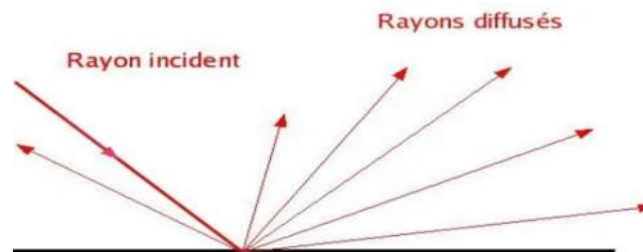


Figure 20 : La diffusion du rayonnement
Source : https://fasoeducation.bf/cours_esu/seconde/premiere/sp/physique/reflexion_lumiere/res/p-2-3.PNG

3.4 Stratégies de l'éclairage naturel

La lumière naturelle est un élément clé dans la conception des bâtiments, offrant des avantages esthétiques, fonctionnels et énergétiques. En intégrant judicieusement la lumière du jour, il est possible de créer des espaces plus confortables, améliorer le bien-être des occupants et réduire la consommation d'énergie. Cependant, pour optimiser cet éclairage, Il est nécessaire de considérer plusieurs facteurs, tels que l'orientation, la disposition des

ouvertures, l'environnement extérieur et les besoins spécifiques des espaces intérieurs. Pour atteindre cet objectif, on fait appel à différentes stratégies à savoir : capter, transmettre, distribuer et contrôler la lumière naturelle, tout en abordant les moyens de protection et d'adaptation pour un éclairage efficace et harmonieux.

3.4.1 Capter la lumière

Pour capter la lumière du jour dans un bâtiment, il est essentiel de considérer plusieurs facteurs, tels que le type de ciel, l'heure, la saison, l'orientation et l'inclinaison des fenêtres, ainsi que l'environnement extérieur (bâtiments voisins, sol, végétation). (Dachelet, 2007).

La lumière pénètre par les vitrages des fenêtres, et sa quantité dépend de leur type, état et propreté. L'aménagement extérieur peut également influencer la pénétration de la lumière, avec des surfaces réfléchissantes comme des dallages ou des plans d'eau contribuant à maximiser l'entrée de lumière.



Figure 21 : Capter la lumière naturelle à travers la fenêtre

Source : https://img.20mn.fr/tutgdNRMTB-HLLsgxvLipSk/1444x920_comment-optimiser-l-eclairage-naturel-dans-la-maison

1. L'influence du type de ciel :

La lumière naturelle, composée de lumière directe du soleil et de lumière diffuse du ciel, varie selon l'état du ciel. La lumière directe est énergétiquement intense et facilement captée pour la chaleur, mais peut causer de l'éblouissement et de la surchauffe, et sa disponibilité dépend de l'orientation des fenêtres. (Reiter & Herde, 2004) La lumière diffuse, quant à elle, est uniforme et sans éblouissement, mais elle peut être insuffisante et génère peu d'ombre et de contraste.

2. L'influence du moment de l'année :

Du l'été à l'hiver, le rayonnement solaire direct pénètre davantage dans l'espace, tandis que l'éclairement près des fenêtres diminue progressivement. (Reiter & Herde, 2004)

3. L'influence de l'heure :

Sous un ciel ensoleillé, la lumière varie selon l'heure et l'endroit dans la pièce. La quantité de lumière augmente progressivement jusqu'à midi, puis diminue. (Boudoukha, 2015) Le rayonnement solaire direct crée une zone lumineuse en mouvement, se déplaçant du mur ouest au mur est au cours de la journée.

4. L'influence de l'orientation et des ouvertures :

L'aménagement d'un bâtiment doit optimiser l'orientation des fenêtres pour maximiser l'ensoleillement : à l'est pour le matin, au sud pour la journée, et à l'ouest pour la soirée. En hiver, la façade sud capte plus de lumière, tandis qu'en été, le soleil plus bas permet de mieux se protéger. (Daich, 2011) L'orientation influence la consommation d'énergie : les fenêtres au sud captent la chaleur, celles au nord provoquent des pertes. Par ciel clair, l'orientation perpendiculaire aux rayons optimise la lumière.

5. L'influence de l'inclinaison de l'ouverture :

Pour optimiser la lumière naturelle, l'orientation et le type d'ouverture des fenêtres sont cruciaux. Les fenêtres perpendiculaires aux rayons solaires captent le plus de lumière directe, tandis que sous un ciel couvert, l'efficacité dépend de la portion de ciel visible. Les fenêtres horizontales ou obliques captent plus de lumière diffuse que les verticales. (Boudoukha, 2015) Les fenêtres orientées au sud sont idéales en hiver pour maximiser les gains solaires, tandis que les ouvertures zénithales fournissent une lumière diffuse mais peuvent entraîner des problèmes thermiques en été.

6. L'influence de l'environnement :

Le microclimat d'un site, influencé par la topographie, la végétation et l'urbanisme, affecte la lumière disponible pour un bâtiment. Il est crucial de prendre en compte l'environnement pour optimiser l'éclairage naturel. (Reiter & Herde, 2004).

3.4.2 Transmettre la lumière

La transmission de la lumière naturelle a pour objectif de favoriser son entrée dans un espace intérieur. Cette pénétration dépend de plusieurs facteurs, notamment Les dimensions, la forme, la position et le matériau de l'ouverture, ainsi que la taille et l'agencement intérieur du local. La lumière naturelle engendre des effets divers en fonction des conditions extérieures (type de ciel, saison, heure, environnement) et les caractéristiques des ouvertures (emplacement, orientation, inclinaison, taille, type de vitrage). Par exemple : (Daich, 2011)

- Éclairage latéral : fournit une lumière dirigée qui met en valeur les reliefs, mais sa portée est limitée en profondeur.
- Éclairage zénithal : offre une lumière plus uniforme, idéale pour un éclairage global.

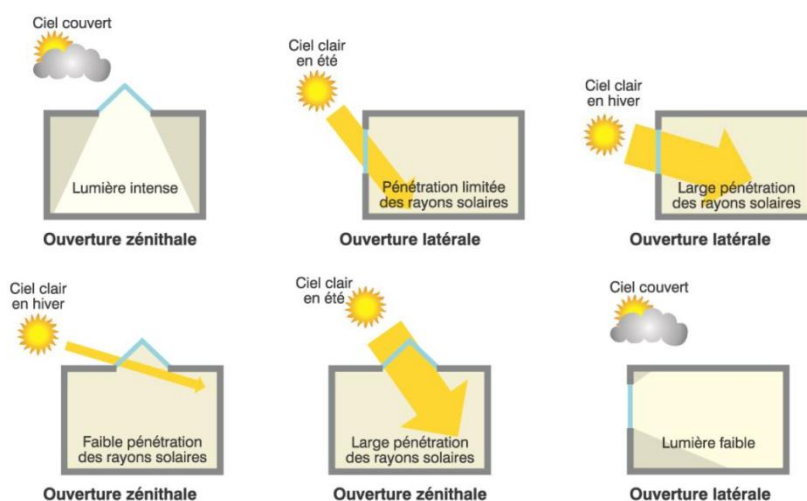


Figure 22 : Influence de type d'ouverture sur la quantité de lumière
Source : <https://hqe.guidenr.fr/images/confort-visuel-type-ouverture.jpg>

3.4.3 Distribuer/Répartir la lumière

L'exploitation de la lumière naturelle pose des défis liés à son homogénéité, mais une répartition bien pensée est essentielle pour garantir un éclairage confortable et efficace. Cette répartition peut être uniforme, grâce à des parois claires, des baies vitrées larges et une géométrie bien conçue, ou ciblée sur un point précis en jouant sur les ouvertures, l'agencement des murs et les matériaux. (Khaoula, 2021)

Pour optimiser la réflexion et la diffusion de la lumière, il est essentiel de réduire les obstacles liés à la géométrie ou au mobilier, tout en privilégiant des surfaces claires et mates..

Des vitrages translucides ou des systèmes de réflecteurs peuvent aussi être utilisés pour conduire la lumière jusqu'aux zones éloignées ou sombres du bâtiment.

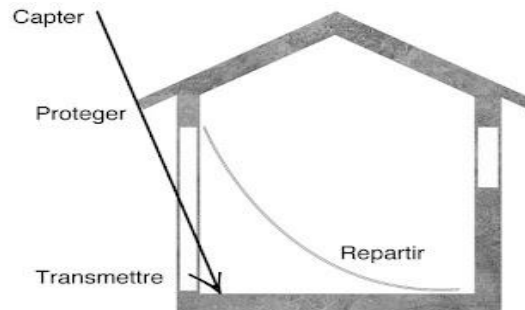


Figure 23 : La distribution de la lumière naturelle dans un local

Source : https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEhtCGPs9TZYVP-mexwY74wByKCC9OrYxAPWg4NI1jEEFmhelOTmh9_778u7gSqMlv6tf_DjZq4tCpOvbIXzu8uPrGS9qhVMltiSatB4tFe3ARTAAARmNR2Hm8HfWoGipd1_ZMNU-SSLtIVQ/s1600/lumos2.jpg

3.4.4 Se protéger de la lumière

Pour un confort visuel optimal, il est parfois nécessaire de se protéger de la lumière naturelle, surtout en cas d'éblouissement. (Dachelet, 2007) Cette protection réduit le rayonnement lumineux gênant pour un usage intérieur agréable. Les solutions incluent la végétation, les auvents, les écrans mobiles et les vitrages spéciaux.

Une protection solaire est un dispositif conçu pour bloquer le rayonnement solaire et ombrager une surface. Son efficacité dépend d'une analyse précise du choix et de l'emplacement. Le fonctionnement de ces protections repose sur divers phénomènes physiques: (Reiter & Herde, 2004)

- **Absorption** : par des éléments comme les surplombs ou murs de refend.
- **Réflexion** : grâce à des *light shelves*, des étagères lumineuses ou des conduits de lumière.
- **Réfraction** : avec des dispositifs comme des prismes ou des vitrages directionnels.
- **Diffraction** : au moyen d'éléments holographiques.

Les protections solaires sont classées selon deux critères principaux :

- **Position par rapport au vitrage** : elles peuvent être intérieures, en interface, ou extérieures.

- **Mobilité** : elles peuvent être permanentes (vitrages spéciaux, films autocollants), fixés (auvents, avancées architecturales) ou mobiles (stores extérieurs, volets).

3.4.5 Contrôler la quantité de la lumière

Pour éviter une lumière naturelle excessive, pouvant entraîner des éblouissements ou de la fatigue visuelle, il est crucial de la contrôler. Cela peut être réalisé par des éléments architecturaux fixes tels que des surplombs, des bandeaux lumineux ou des light shelves, complétés par des dispositifs mobiles comme des volets ou des stores. (Daich, 2011) Des systèmes automatiques d'éclairage peuvent également ajuster l'intensité en fonction des besoins du bâtiment.

3.5 Les enjeux et les avantages de l'optimisation de la lumière naturelle

La lumière naturelle représente un enjeu majeur en raison de ses effets bénéfiques sur la santé, le confort des occupants, et sa capacité à réduire le recours à l'éclairage artificiel, au chauffage et à la climatisation.

Dans les bâtiments tertiaires, l'éclairage artificiel utilise près de 40 % de l'électricité consommée. Les nouvelles démarches environnementales visent à limiter les impacts écologiques tout en contribuant au confort et à la santé des occupants. (l'arene Île-de-France, 2014). De plus, la conception des bâtiments intègre des indicateurs de performance liés à l'éclairage naturel, favorisant des niveaux optimaux d'éclairement, l'accès aux vues et le contrôle solaire. Ces objectifs doivent être équilibrés avec les critères de confort thermique et énergétique de plus en plus stricts.

De nombreuses études ont démontré que la lumière naturelle joue un rôle essentiel dans l'amélioration du bien-être et des performances humaines. Dans les bâtiments, elle se traduit par : (Gif lumière, 2018)

Une augmentation de la productivité des salariés.

Une amélioration des ventes.

Des meilleurs résultats scolaires.

Une diminution du taux d'absentéisme.

Une réduction du temps de récupération des patients.

Une baisse significative des coûts énergétiques.

4 Rôle de la lumière naturelle dans la performance énergétique des bâtiments

La lumière naturelle est importante dans la vie humaine, non seulement en permettant la vision, mais aussi en influençant notre perception de l'environnement, notre bien-être, et notre productivité. L'éclairage naturel est non seulement la solution la plus durable, mais aussi une ressource renouvelable gratuite qui offre divers avantages, bien au-delà d'une simple démarche écologique. Puisque l'éclairage artificiel représente une part importante des dépenses énergétiques des entreprises, il est utile, d'un point de vue économique, de chercher à mieux utiliser la lumière naturelle. (Kingspan Light + Air, 2023)

Dans l'architecture, l'éclairage naturel revêt une importance particulière, à la fois pour offrir un confort visuel optimal et Pour diminuer la consommation d'énergie des bâtiments, il est important d'exploiter au mieux la lumière naturelle, il est possible de diminuer l'utilisation d'éclairage artificiel et de climatisation, Cela permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

5 La réglementation et les normes relatives à l'éclairage naturel dans le bâtiment (EN 17037)

Cette norme s'adresse principalement aux concepteurs de bâtiments tels que les architectes, les maîtres d'œuvre et autres professionnels de la conception. Elle fournit des références précises de dimensionnement, accompagnées de recommandations portant sur plusieurs aspects essentiels du confort visuel et lumineux, notamment :

- L'apport en lumière naturelle
- Les vues vers l'extérieur
- L'exposition au rayonnement solaire
- La protection contre l'éblouissement

Concernant plus spécifiquement la lumière naturelle, la norme définit deux niveaux d'exigences, chacun correspondant à un objectif distinct :

- L'éclairement cible (ET)
- L'éclairement minimal cible (ETM)

Ces objectifs doivent être évalués sur un plan de référence situé à 0,85 mètre au-dessus du sol, sauf indication contraire. Ils tiennent compte de prescriptions minimales, qui varient selon plusieurs niveaux de recommandation et le type de surface par laquelle la lumière naturelle est introduite dans l'espace.

- Pour les ouvertures verticales ou inclinées, telles que les fenêtres, la norme recommande différents niveaux d'éclairement. Elle exige que l'éclairement cible (ET) soit atteint sur au moins 50 % de la surface de l'espace pendant 50 % du temps où la lumière naturelle est disponible. Par ailleurs, un éclairement minimal cible (ETM) doit être garanti sur 95 % de la surface, pendant cette même durée d'éclairage naturel.

Niveau de recommandation pour une prise de jour verticale ou inclinée	Éclairement cible E_T lx	Fraction de l'espace pour le niveau cible $F_{\text{plane},\%}$	Éclairement minimal cible E_{TM} lx	Fraction de l'espace pour le niveau minimal cible $F_{\text{plane},\%}$	Fraction d'heures de lumière naturelle $F_{\text{time},\%}$
Minimal	300	50 %	100	95 %	50 %
Moyen	500	50 %	300	95 %	50 %
Élevé	750	50 %	500	95 %	50 %

Tableau 2 : Recommandations relatives à l'apport en lumière naturelle par des prises de jour situées sur une surface verticale ou inclinée

Source : <https://www.carsat-bretagne.fr/files/live/sites/carsat-bretagne/files/pdf/entreprise/Documentation/Risques/NuisancesPhysiques/CritresEclairageNaturel.pdf>

- Pour les ouvertures horizontales, comme les lanterneaux, la norme recommande plusieurs niveaux d'éclairement cible (ET). Cet éclairement doit être atteint sur au moins 95 % de la surface de référence du local, pendant 50 % du temps d'éclairage naturel disponible.

Niveau de recommandation pour une prise de jour horizontale	Éclairement cible E_T lx	Fraction de l'espace pour le niveau cible $F_{\text{plane},\%}$	Fraction d'heures de lumière naturelle $F_{\text{time},\%}$
Minimal	300	95 %	50 %
Moyen	500	95 %	50 %
Élevé	750	95 %	50 %

Tableau 3 : Recommandations relatives à l'apport en lumière naturelle par des prises de jour situées sur une surface horizontale

Source : <https://www.carsat-bretagne.fr/files/live/sites/carsat-bretagne/files/pdf/entreprise/Documentation/Risques/NuisancesPhysiques/CritresEclairageNaturel.pdf>

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les fondations théoriques du concept d'habitat à énergie zéro, en mettant en lumière ses objectifs, son mode de fonctionnement et les principes qui en assurent la performance énergétique. À travers l'analyse des différentes stratégies architecturales allant de l'isolation thermique à la forme du bâtiment, en passant par l'orientation, le choix des matériaux et l'intégration des énergies renouvelables, il apparaît clairement que la conception d'un bâtiment à énergie zéro repose sur une approche globale, où chaque choix participe à l'équilibre entre consommation et production d'énergie.

Parmi les éléments clés de cette démarche, la lumière naturelle s'impose comme un levier essentiel. Sa bonne exploitation permet de réduire significativement les besoins en éclairage artificiel, tout en contribuant à améliorer le confort et le bien-être des occupants. Elle devient ainsi un facteur de performance énergétique autant qu'un vecteur de qualité spatiale.

Cette compréhension globale ouvre la voie au chapitre suivant, qui abordera plus en détail les facteurs influençant l'entrée de lumière naturelle dans un bâtiment, et les techniques permettant de l'optimiser en fonction du site, de l'environnement immédiat et des caractéristiques architecturales du projet.

***Chapitre 02 : Facteurs influençant
l'apport de lumière naturelle***

Introduction

La lumière naturelle est un élément clé de la conception architecturale, grâce à ses nombreux bénéfices, tant sur le plan énergétique que pour le confort des occupants. En plus de réduire la dépendance aux éclairages artificiels, elle contribue aussi à créer des espaces plus agréables et à favoriser une meilleure santé psychologique et physiologique. Cependant, l'intégration optimale de la lumière naturelle nécessite une compréhension approfondie des facteurs qui influencent son apport au sein des bâtiments. Ces facteurs, variés et interconnectés, incluent principalement l'orientation et l'implantation des bâtiments, la conception des ouvertures, les caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que l'environnement immédiat.

Dans ce chapitre nous allons traiter trois techniques principales pour optimiser l'entrée de lumière naturelle: l'orientation, les ouvertures et les matériaux. En examinant ces trois axes, nous chercherons à identifier les méthodes les plus efficaces pour exploiter la lumière naturelle en fonction des spécificités architecturales et des contraintes environnementales. Cette analyse permettra de proposer des solutions concrètes et adaptées pour maximiser les performances lumineuses des bâtiments tout en réduisant leur empreinte énergétique. Ainsi, notre étude vise à contribuer à la conception d'espaces harmonieux, durables et fonctionnels grâce à une utilisation optimisée de la lumière naturelle.

1 Les facteurs influant sur l'apport de la lumière naturelle

L'entrée de lumière naturelle dans un bâtiment dépend de plusieurs paramètres qui interagissent entre eux. Pour mieux comprendre son optimisation, ces paramètres peuvent être regroupés en trois grandes catégories : les caractéristiques du site, l'environnement immédiat et les caractéristiques relatives au bâtiment lui-même.

1.1 Les caractéristiques du site

L'implantation d'un bâtiment sur un site donné est un facteur déterminant pour l'apport en lumière naturelle. Avant même la phase de conception, une analyse approfondie du site permet d'anticiper et d'optimiser l'ensoleillement des espaces intérieurs. Plusieurs éléments doivent être pris en compte :

1.1.1 Le relief d'un terrain

La géométrie solaire, combinée à l'orientation et à l'inclinaison du terrain, joue un rôle clé dans l'ensoleillement d'un site. Réellement, les pentes orientées vers le sud bénéficient d'un ensoleillement plus important que les terrains plats, optimisant ainsi l'apport de lumière naturelle.(Chateau, 1880). Ce relief, s'il est accidenté, peut soit générer des zones d'ombre sur un bâtiment, soit, au contraire, renforcer son exposition au soleil.

1.1.2 La latitude

La latitude est le facteur géographique clé favorisant d'évaluer la quantité de lumière reçue et l'orientation des rayons du soleil. En effet, *« Les éclairements lumineux directs seront aussi d'intensité variable à cause de l'épaisseur de la masse d'air (ou de la couche atmosphérique) traversée par les rayons solaires car plus la latitude est élevée, plus l'épaisseur de la masse d'air à traverser est importante et plus l'éclairissement lumineux direct est faible »* (Benharkat, 2005).

1.1.3 La saison

De l'été à l'hiver, la pénétration du rayonnement solaire dans le bâtiment devient progressivement plus importante à l'intérieur du bâtiment, permettant ainsi une meilleure diffusion de la lumière dans les espaces, tandis que l'intensité lumineuse près des fenêtres diminue progressivement en raison de l'angle plus bas du soleil.

« En raison du mouvement annuel de la terre autour du soleil, l'angle d'incidence des rayons solaires parallèles varient d'une saison à l'autre » (Matallah, 2016) .

1.1.4 L'heure

« La quantité et l'angle de la lumière naturelle varient considérablement au cours de la journée » (Imene, 2023)

Sous un ciel dégagé et ensoleillé, la répartition de la lumière varie considérablement au fil de la journée et d'un endroit à l'autre dans le local. Le rayonnement solaire direct crée une tache lumineuse qui se déplace progressivement, allant de l'Ouest vers l'Est au cours de la journée.

1.1.5 Les types de ciels

Il existe différents modèles de luminance du ciel, chacun ayant une distribution spécifique de la lumière en fonction de l'épaisseur de la surface claire (Cyril, 2004). Le ciel couvert uniforme présente une luminance uniforme, tandis que le ciel couvert standard varie selon la position sur la voûte céleste, avec une luminance plus forte au zénith. Enfin, le ciel clair avec soleil se base uniquement sur le rayonnement solaire direct qui constitue la source principale de lumière naturelle.

1.2 L'environnement immédiat

Le site influence la quantité de lumière naturelle disponible, tandis que l'environnement immédiat détermine comment cette lumière pénètre dans le bâtiment.

1.2.1 Les bâtiments voisins

La quantité d'énergie solaire disponible peut être affectée par l'ombrage causé par les bâtiments voisins, qui créent des masques solaires. L'ajout d'un tel masque urbain diminue le niveau d'éclairement intérieur, car il bloque la lumière directe. L'impact de cet effet varie en fonction de la hauteur des bâtiments voisins et de l'espacement entre eux.

1.2.2 La végétation

« La végétation se distingue des autres écrans parce qu'elle peut être saisonnière, ce qui est le cas des arbres à feuilles caduques, et que par ailleurs elle ne possède qu'une opacité partielle » (Boudoukha, 2015).

La végétation, notamment les arbres à feuilles caduques, filtre la lumière de manière saisonnière : elle réduit l'intensité lumineuse en été sans la bloquer complètement, tandis qu'en hiver, l'absence de feuilles permet une meilleure pénétration de la lumière.

1.2.3 Le facteur de réflexion des surfaces extérieures

Le facteur réfléchissant des surfaces extérieures a une influence significative sur l'apport de lumière naturelle. Les surfaces claires et réfléchissantes, comme un sol brillant ou un plan d'eau, augmentent la quantité de lumière en la renvoyant vers l'intérieur.

1.3 Les caractéristiques du bâtiment

L'environnement détermine l'accès à la lumière naturelle, mais c'est la conception du bâtiment qui façonne la manière dont cette lumière est utilisée et répartie à l'intérieur.

L'apport de lumière naturelle dépend directement de plusieurs éléments liés à la conception du bâtiment. Trois facteurs principaux jouent un rôle déterminant :

- **L'orientation du bâtiment**, qui influence la captation de la lumière en fonction du climat et des saisons.
- **Les ouvertures**, qui régulent la quantité et la répartition de la lumière à l'intérieur.
- **Les matériaux**, qui affectent la manière dont la lumière est réfléchie et diffusée à l'intérieur.

Ces trois éléments constituent le cœur de notre analyse, car ils représentent les axes principaux de notre hypothèse sur l'optimisation de la lumière naturelle dans la conception architecturale.

2 Les facteurs applicables dans notre cas d'étude :

2.1 L'orientation des bâtiments

L'orientation des bâtiments constitue un élément clé dans l'optimisation de la lumière naturelle, influençant à la fois le confort visuel des occupants ainsi que la performance énergétique des constructions. La façon dont un bâtiment est positionné par rapport au soleil détermine la quantité et la qualité de la lumière qui s'introduit à l'intérieur.

Ainsi, une orientation soigneusement planifiée contribue non seulement à améliorer le bien-être des occupants en fournissant une lumière naturelle optimale, mais elle contribue également à minimiser les besoins en lumière artificielle, favorisant ainsi une approche durable dans la conception des bâtiments.

2.1.1 Définition du l'orientation

« Prise dans son sens général, l'orientation a pour objet la disposition, d'une certaine façon, des bâtiments entre eux suivant des règles reconnues bonnes pour telles ou telles autres constructions ». Ainsi, « suivant les climats sous lesquels on construit, et le but qu'on veut atteindre, l'orientation des bâtiments est fort variable ». (Chateau, 1880)

A cet effet, L'orientation d'un bâtiment correspond à la direction dans laquelle est tournée sa façade principale, influençant sa réaction aux conditions climatiques en fonction de l'heure et des saisons. Elle reflète aussi la position d'un bâtiment ou d'un aménagement urbain par rapport aux points cardinaux ou aux éléments du site.

2.1.2 La forme et l'orientation

L'apparence générale d'un bâtiment doit être conçue de manière à maximiser l'entrée du rayonnement solaire en hiver et à la minimiser en été. Ainsi, la forme idéale est celle qui réduit les pertes de chaleur pendant la saison froide tout en limitant les gains thermiques excessifs durant la saison chaude. Les recommandations formulées par Victor Olgyay dans son ouvrage *Design with Climate* (1967) résument ces principes de la manière suivante : (Olgyay, 2015)

- Une forme carrée n'est jamais optimale, quelle que soit la localisation de la conception.
- Les volumes allongés orientés Nord-Sud sont les moins performantes que les formes carrées, que ce soit en hiver ou en été.
- La forme optimale universelle, offrant les meilleurs résultats pour tous les climats, est une structure allongée orientée Est-Ouest.

2.1.3 L'effet d'orientation sur la conception et sur l'éclairage dans le bâtiment

Une conception architecturale efficace repose sur l'orientation du bâtiment et de ses ouvertures pour optimiser les apports énergétiques et la gestion de la lumière. Les fenêtres au Sud devraient maximiser les gains solaires, tandis que celles à l'Est et à l'Ouest doivent limiter la lumière pour éviter l'éblouissement. Des surplombs, ailettes ou vitrages adaptés peuvent réduire la surchauffe tout en offrant une bonne isolation. L'organisation des espaces intérieurs doit tenir compte de l'orientation : des pièces moins profondes côté nord et plus profondes côté sud permettent de mieux gérer la lumière naturelle. En hiver, le soleil rasant

entre profondément dans les bâtiments, alors qu'en été, son angle élevé limite cette pénétration.

L'orientation, la surface des fenêtres et le type de vitrage influencent l'intensité et la pureté de la lumière naturelle pénétrant un espace. (Alami, 2017)

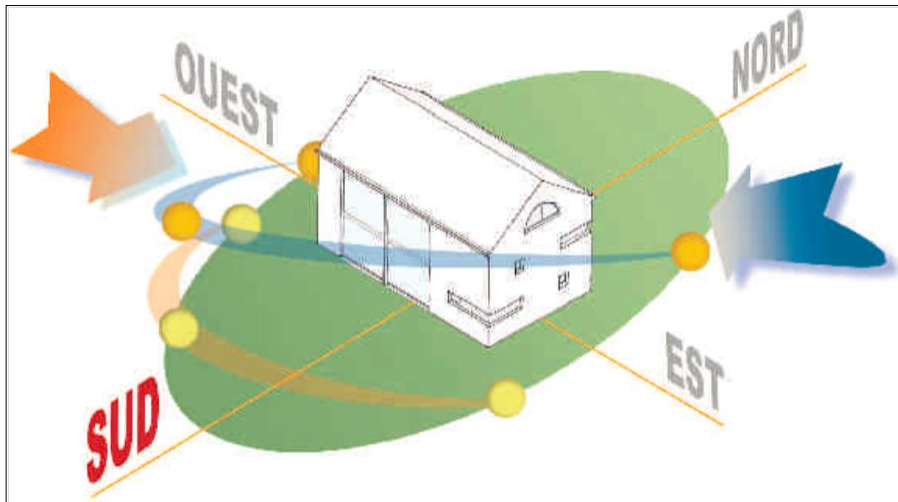


Figure 24 : les quatre orientations d'un bâtiment

Source : <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/image1358900725787916559.png?ID=32185>

1) Orientation Sud

L'orientation sud est souvent considérée comme la meilleure pour maximiser l'éclairage naturel. (Harzallah, 2023) Cette orientation reçoit une lumière directe et régulière durant toute la journée, ce qui en fait une solution idéale pour des espaces tels que les salons, cuisines ou bureaux. La lumière qui pénètre par les fenêtres sud est abondante, uniforme et stable, offrant ainsi une ambiance agréable sans fluctuations excessives. Cependant, bien que la lumière soit idéale en termes de quantité, la gestion de l'éblouissement est nécessaire, surtout pendant les heures de pointe en été. Des protections solaires comme des auvents ou des stores permettent de moduler l'intensité lumineuse et d'éviter que la chaleur ou l'éblouissement n'affecte le confort intérieur. Les façades sud peuvent également bénéficier d'éléments architecturaux comme des étagères lumineuses ou des fenêtres plus larges pour diffuser la lumière dans toute la pièce. C'est dans ce sens qu'il « *est préférable pour le logement quand cela est possible, une orientation Nord/Sud (c'est à-dire qui offre une plus grande façade au sud), car cette orientation est la plus passivement profitable et donne le meilleur compromis entre apports de chaleur et apports lumineux en toute saison* » (Boursas, 2012).

2) Orientation Nord

Selon L'HERAULT (2009), « *Le Nord, est la direction où il n'y a pas de rayonnement solaire direct, donc pas de variation lumineuse ni d'apport thermique* » (CDDP De L'herault, 2009). En effet, les façades orientées au nord offrent une lumière plus douce et plus diffuse, avec moins de variations pendant la journée.

Ce type de lumière est idéal pour les espaces nécessitant un éclairage stable, comme les bureaux, galeries d'art, ou bibliothèques. Quand la lumière directe du soleil est absente, l'éclairage est plus constant et plus agréable pour les tâches nécessitant une concentration visuelle, car il minimise les ombres et l'éblouissement. Cependant, ce type d'orientation peut ne pas offrir suffisamment de lumière dans les régions plus froides ou pendant les mois d'hiver, où le besoin d'éclairage est plus important.

Une conception soignée des fenêtres, notamment avec une taille adéquate, permet d'optimiser l'apport de lumière sans compromettre l'intimité ou la température intérieure. Bien que moins lumineux que le sud, le nord reste un choix privilégié pour les espaces où une lumière douce et uniforme est nécessaire.

3) Orientation Est

L'orientation « Est » représente « la direction du lever du soleil : des protections solaires totales sont indispensables en été, les rayons solaires étant horizontaux » (CDDP De L'herault, 2009). Cette orientation capte la lumière directe du matin, créant une ambiance dynamique et énergisante dès les premières heures du jour.

Cette opération peut être particulièrement bénéfique dans des espaces tels que des chambres ou des salles de bains, où une lumière douce mais vivifiante est souhaitée au réveil (Zekraoui, 2017). Cependant, cette lumière est plus difficile à contrôler car elle peut entraîner des pics de luminosité et un éblouissement désagréable pendant les heures de pointe. Les protections solaires et les stores sont essentiels pour éviter l'inconfort visuel, surtout quand le soleil se trouve bas dans le ciel. De plus, l'exposition est peut ne pas fournir suffisamment de lumière pendant les après-midis ou les périodes nuageuses, ce qui peut limiter l'éclairage naturel en fin de journée. La conception de fenêtres orientées à l'est il doit ainsi prendre en considération la gestion de la lumière et l'éblouissement, notamment à travers l'utilisation de films de contrôle solaire ou de volets extérieurs.

4) Orientation Ouest

« Une orientation -Ouest- assure une insolation directe en soirée, un éclairage doux et chaleureux. Toutefois, il y a un risque réel d'éblouissement et les gains solaires ont tendance à induire des surchauffes »(Boudoukha, 2015)

Les façades orientées à l'ouest captent la lumière directe en après-midi, souvent plus intense que celle de l'est, créant des variations importantes de lumière à l'intérieur du bâtiment. Cette orientation peut entraîner des problèmes d'éblouissement au coucher du soleil, rendant difficile la gestion de l'éclairage dans les espaces où la lumière directe peut être trop forte, comme dans les salons ou les bureaux. Bien que la lumière de l'après-midi puisse apporter une belle ambiance, elle peut devenir inconfortable sans protection adéquate, notamment des stores ou des rideaux épais. Les fenêtres orientées vers l'ouest doivent être conçues de manière à minimiser les risques d'éblouissement tout en maximisant la lumière naturelle pour les espaces nécessitant une bonne luminosité en fin de journée. Cette orientation est également moins favorable en hiver, où la lumière directe est moins disponible pendant les heures où elle est la plus nécessaire.

Les orientations sud et nord offrent les meilleurs résultats en termes de lumière naturelle, avec des avantages distincts : le sud apporte une lumière abondante et régulière, tandis que le nord offre une lumière plus douce et uniforme. Les orientations Est et Ouest, bien qu'elles aient leurs avantages pour certaines fonctions, nécessitent une gestion plus poussée de la lumière pour éviter l'éblouissement et les variations excessives.

2.1.4 Les facteurs déterminants de l'orientation

L'orientation géographique d'un bâtiment repose sur plusieurs facteurs déterminants : (Benharra, 2016)

1. **Le site** : La topographie, les déplacements d'air, la force et la direction des vents, ainsi que la disposition urbaine, comme la largeur des rues et le maillage des réseaux existants, influencent directement l'implantation et l'exposition d'une construction. Une analyse approfondie du site est essentielle pour maximiser les apports solaires et minimiser les pertes énergétiques.
2. **Le climat** : Les données climatiques, notamment les régimes de vent, l'ensoleillement, la température, et les variations saisonnières, jouent un rôle majeur lors de

l'implantation d'un bâtiment, l'orientation adéquate protège contre les vents froids en hiver et évite la surchauffe estivale, tout en optimisant l'éclairage naturel.

3. **Les obstacles environnementaux** : La végétation, les bâtiments voisins ou autres éléments peuvent limiter ou canaliser la lumière et les courants d'air, influençant ainsi la qualité de l'ambiance intérieure et extérieure. La gestion des obstacles, tels que l'effet Venturi entre deux bâtiments ou l'ombrage des arbres, est cruciale pour un confort thermique et lumineux optimal.
4. **Les besoins fonctionnels** : L'orientation est également dictée par l'usage prévu des espaces intérieurs, les besoins en lumière naturelle, la récolte solaire pendant l'hiver, et la protection contre l'éblouissement ou la surchauffe.

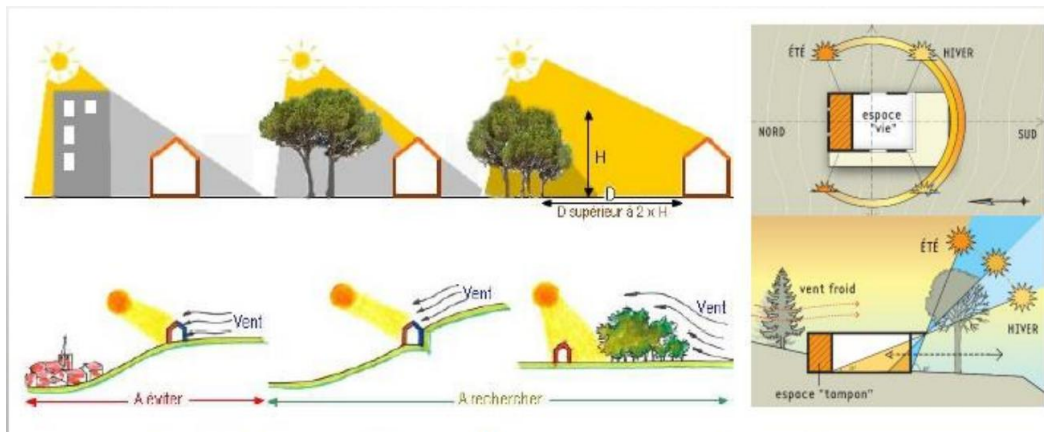


Figure 25 : Critères d'orientation d'un bâtiment selon les conditions du site

Source : [https://encrypted-](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSB1qwEAGI1vtPNRFSy3bf7dzTT8EtF0RqHaDVDCIueRjV-X90a)

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSB1qwEAGI1vtPNRFSy3bf7dzTT8EtF0RqHaDVDCIueRjV-X90a](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSB1qwEAGI1vtPNRFSy3bf7dzTT8EtF0RqHaDVDCIueRjV-X90a)

Ces différents facteurs interagissent pour garantir une orientation qui conjugue confort, fonctionnalité, et intégration au contexte environnant.

Synthèse :

L'orientation d'un bâtiment est un élément clé dans sa conception, car elle influence divers facteurs tels que l'accès au soleil, les couleurs, les matériaux, la température et les vents, affectant l'ambiance de l'intérieur. En termes de lumière naturelle, l'orientation détermine la quantité la qualité et de luminosité intérieure en fonction du mouvement quotidien du soleil.

2.2 Les ouvertures ; vers une meilleure optimisation de lumière naturelle

La lumière naturelle occupe une place essentielle en architecture, influençant à la fois le confort, l'esthétique et l'efficacité énergétique des espaces. Les baies vitrées permettent d'apporter de la lumière, mais leur efficacité repose sur divers facteurs comme l'orientation, la forme et les matériaux utilisés. Aussi, les ouvertures zénithales, installées en toiture, offrent une alternative intéressante en captant la lumière diffuse de manière homogène, même en cas de ciel couvert. Elles réduisent les ombres portées et permettent une meilleure gestion de l'éclairage naturel en fonction des saisons, sans risque d'éblouissement excessif.

L'alliance des baies vitrées et des ouvertures zénithales permet ainsi d'optimiser la diffusion de la lumière naturelle, contribuant au confort visuel et thermique. Une conception soignée de ces dispositifs contribue à des espaces lumineux, agréables à vivre et plus économes en énergie, répondant ainsi aux enjeux architecturaux contemporains.

2.2.1 Définition des ouvertures

Sur le plan technique, « *Les ouvertures au niveau de l'enveloppe sont d'environ 40 % de la consommation énergétique globale d'un bâtiment* » « *Par conséquent, la sélection d'une fenêtre à hautes performances lors de la phase de conception est essentielle* » (Khaoula, 2021)

Les ouvertures de bâtiment désignent les éléments architecturaux intégrés dans l'enveloppe d'un édifice, tels que les fenêtres, les portes vitrées, les baies, les verrières, et les ouvertures en toiture, qui permettent d'établir un échange entre l'intérieur et l'extérieur. Leur rôle est multiple :

- Assurer l'apport de lumière naturelle,
- Contribution à la qualité esthétique et fonctionnelle des espaces.

Elles sont conçues en tenant compte de plusieurs paramètres tels que leur orientation, leurs dimensions, leur forme, leurs matériaux de fabrication (vitres et cadres), ainsi que leur position dans la structure du bâtiment.

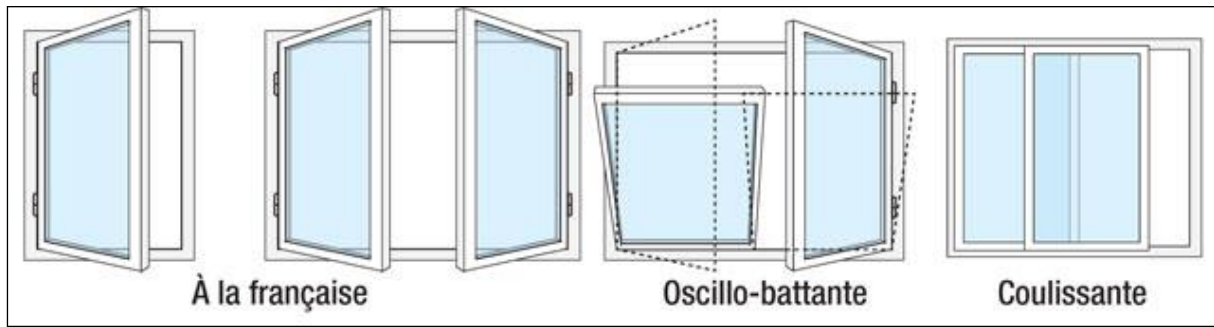


Figure 26: Différents types d'ouvertures

Source : <https://www.systemed.fr/decoration/fenestres-ouvertures-et-formes,2748.html>

2.2.2 Les types d'ouvertures :

Les ouvertures peuvent être classées selon les typologies d'éclairage qu'elles offrent ;

- **Un éclairage zénithal**, qui provient des ouvertures en toiture et favorise une lumière homogène et diffuse,
- **Un éclairage latéral**, issu des façades et varie selon l'orientation et l'exposition.

Ces typologies, combinées ou spécifiques, permettent d'optimiser l'éclairage naturel tout en répondant aux besoins fonctionnels et esthétiques des espaces intérieurs.

1) Éclairage latéral

L'éclairage naturel latéral est le type d'éclairage le plus ancien et le plus utilisé, répondant aux besoins fondamentaux de lumière, de vue, et de ventilation. Il intègre souvent des dispositifs de protection solaire pour réduire l'éblouissement en favorisant la pénétration indirecte de la lumière.

Ce type d'éclairage provient des ouvertures murales et offre une lumière limitée par ciel couvert et peut causer de l'éblouissement. Il se décline en trois types : (Boudoukha, 2015) unilatéral (un seul côté), bilatéral (deux côtés opposés) et multilatéral (plusieurs orientations).

➤ Éclairage unilatéral

Ce mode d'éclairage se distingue par la présence d'ouvertures verticales, situées sur une seule façade. Cette configuration génère des effets de relief et des contrastes, et lorsque la profondeur de la pièce dépasse la capacité de l'ouverture à la lumière, elle ne parvient souvent pas à répondre aux besoins d'éclairage. Pour remédier à cela, la profondeur ne doit pas

dépasser le double de la hauteur de l'ouverture.(matallah, 2016) De plus, l'augmentation de la réflectivité des surfaces intérieures contribue à optimiser la diffusion lumineuse naturelle vers les zones arrière, augmentant ainsi le niveau et l'uniformité de l'éclairage.

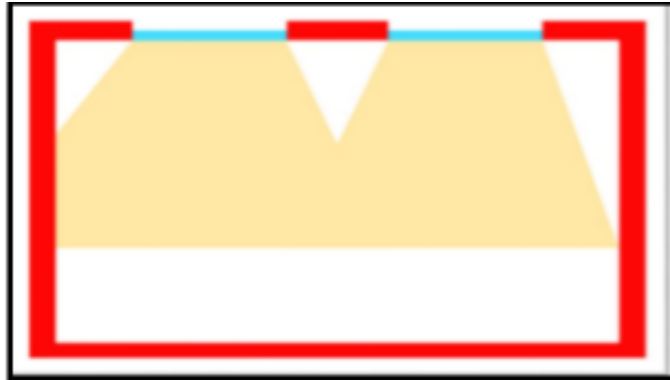


Figure 27 : Exemple d'un éclairage unilatéral
Source : (Boudoukha, 2015)

➤ **Eclairage bilatéral :**

L'éclairage bilatéral se caractérise par des ouvertures situées sur deux parois, qu'elles soient parallèles ou perpendiculaires, dans une même pièce. Ce type d'éclairage est particulièrement répandu dans les établissements scolaires, notamment dans les salles de classe (Boudoukha, 2015). Il permet de garantir un bon niveau de lumière sur le plan de travail tout en assurant une uniformité lumineuse, réduisant ainsi les contrastes et minimisant les risques d'éblouissement.

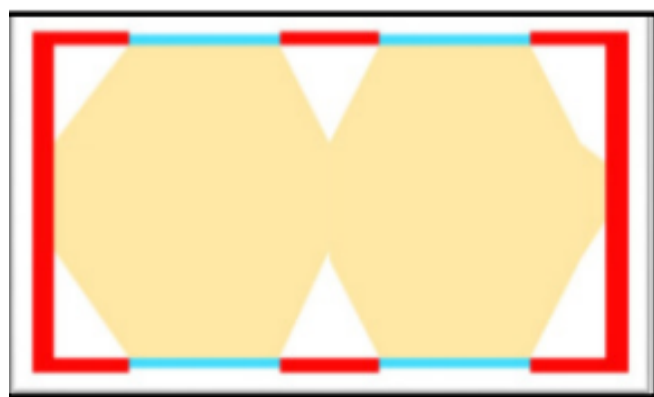


Figure 28: Illustration d'un éclairage bilatéral
Source : (Boudoukha, 2015)

➤ L'éclairage multilatéral

L'éclairage multilatéral désigne un type d'éclairage qui provient de plusieurs directions ou sources lumineuses (Matallah, 2016). Ce mot est fréquemment employé dans des contextes artistiques, photographiques ou en design pour désigner une approche où la lumière vient de plusieurs côtés, créant ainsi une illumination uniforme ou une atmosphère particulière.

a. Les baies :

Les baies vitrées (fenêtres) sont des éléments essentiels et complexes de l'architecture. Leur conception doit répondre à de multiples exigences souvent contradictoires: offrir un éclairage naturel optimal tout en permettant l'occultation pour préserver l'intimité, garantir une vue dégagée vers l'extérieur tout en assurant une protection visuelle, et laisser pénétrer la lumière solaire tout en limitant la surchauffe. (Compagnie des libraires associés, 1752)

Les baies vitrées jouent aussi un rôle central dans la relation entre l'intérieur et l'extérieur la lumière, l'aération et la connexion visuelle qu'elles assurent. Elle sont souvent « inhérentes à la réalisation d'un éclairage relatif à la lumière naturelle » (Lacheheb, 2013).



Figure 29 : Capter la lumière a partir des baies

Source : <https://www.batistyl-habitat.fr/les-differents-types-douverture-des-baies-vitrees/>

Dans la pratique, le niveau d'éclairage naturel recommandé et atteint varie en fonction de plusieurs éléments, notamment :

- L'épaisseur des menuiseries, qui limite le passage de la lumière naturelle.
- Le type de vitrage utilisé (clair, teinté, réfléchissant, simple, double ou triple).

- L'épaisseur des murs.
- Le type de mise en œuvre (en tableau ou en applique).
- La forme de l'embrasure.
- La hauteur du linteau.

b. Les façades légères :

Les façades légères « ferment l'enveloppe d'un bâtiment sans participer à sa stabilité et remplacent un mur. Il en existe différents types parmi lesquels la façade vitrée (mur-rideau largement constitué de vitrages) ou les systèmes de bardage emboîtables en polycarbonate »(Gif lumière, 2018).

Ces façades, et plus particulièrement les façades vitrées et les bardages en polycarbonate, jouent un rôle clé dans la gestion de la lumière naturelle. En remplaçant les murs opaques par des matériaux translucides ou transparents, elles permettent une pénétration abondante de lumière, créant des espaces intérieurs lumineux et accueillants.



Figure 30: Capter la lumière à partir des baies

Source : <https://in.saint-gobain-glass.com/blog/tag/exterior-glass-facades>

c. Les light shelves :

Un light shelf est un dispositif combinant un auvent à surface réfléchissante et un clerestory, conçu pour diriger l'éclairage naturel dans un espace, tout en diminuant l'ensoleillement direct. Il redirige la lumière vers le plafond, permettant ainsi d'augmenter l'éclairage intérieur tout en protégeant les occupants des rayons directs du soleil. Les light shelves peuvent être horizontaux ou inclinés, droits ou incurvés, et placés à l'intérieur ou à l'extérieur des fenêtres (Reiter & Herde, 2004).

Les principaux avantages des light shelves résident dans leur capacité qui vise à permettre une pénétration de la lumière en profondeur dans la pièce, à diminuer les besoins en refroidissement en contrôlant les gains solaires, et à optimiser le confort visuel en régulant l'éblouissement

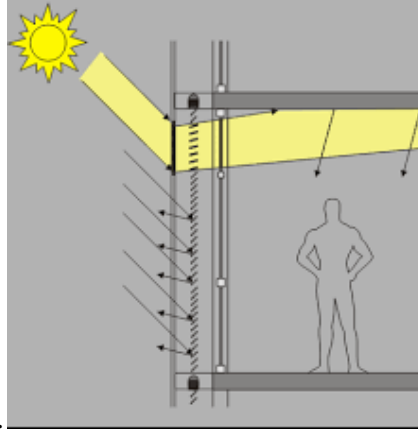


Figure 31: Le système light shelf

Source : <http://thesis.univ-biskra.dz/1126/5/CHAPITRE%20III.pdf>

d. Les « Light pipes » ou conduits de lumière :

Les conduits lumineux sont des systèmes utilisés pour acheminer et répartir la lumière naturelle dans des espaces sombres, éloignés des sources de lumière traditionnelles, tout en minimisant la perte de lumière et sans transférer de chaleur. Ils « *permettent aux pièces sombres ou sans fenêtre de bénéficier d'une source d'éclairage naturel* » (Gif lumière, 2018). Ce système est considéré comme l'un des plus sophistiqués en matière d'éclairage naturel, dû à sa capacité à couvrir de longues distances.

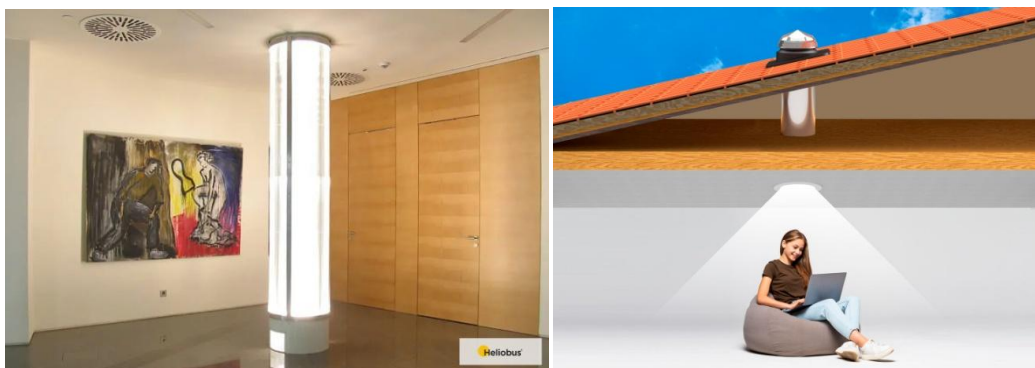


Figure 32: Les types des puits de lumière

Source : <https://heliobus.com/fr/autres-produits/light-pipe/>

2) Éclairage zénithal

L'éclairage zénithal désigne une lumière provenant directement du haut. Il fait référence à la lumière naturelle du soleil. Les ouvertures zénithales captent la lumière de la totalité de la voûte céleste, favorisant une pénétration significative de lumière diffuse. (Hirt & Crisinel, 2005). Dans une habitation ou un espace de travail, ce type d'éclairage offre non seulement un excellent confort lumineux, mais aussi tous les avantages liés à l'exposition à la lumière naturelle.

➤ Dispositifs d'éclairage zénithal direct

Les dispositifs d'éclairage zénithal direct permettent d'introduire la lumière naturelle par des ouvertures en hauteur, offrant un éclairage efficace et profond. Ils favorisent une meilleure répartition lumineuse et réduisent l'usage d'éclairage artificiel.

a. Les tabatières (skylights) :

La tabatière est le système d'éclairage naturel le plus efficace, car il garantit un éclairage à la fois suffisant et homogène. (Benharkat, 2005) Cette surface plane, davantage exposée au ciel depuis l'intérieur et sans obstacles, permet une luminance élevée au niveau des baies. Par conséquent, les taux du facteur de lumière du jour (FLJ) sont particulièrement fortes sous la baie, mais elles diminuent à mesure en s'éloignant de cette zone. Pour résoudre les problèmes d'éblouissement et de surchauffe, les concepteurs recommandent d'orienter les vitrages exposés au nord ou au sud et/ou d'utiliser des vitrages diffusants. Afin de garantir une uniformité de l'éclairage, l'espacement entre les tabatières doit correspondre à la hauteur sous plafond du local.



Figure 33: Exemple d'éclairage zénithal de type tabatière.
Source : <https://www.archiexpo.fr/prod/fakro/product-2396-397040.html>

b. Les dômes :

Les dômes sont une solution économique, car ils ne requièrent sans structure lourde, elles permettent d'atteindre l'objectif en termes de facteur de lumière du jour direct, avec une surface d'environ 10 % d'indice de vitrage. (Benharkat, 2005). Toutefois, ils ne préviennent pas la pénétration de la lumière solaire directe, ce qui peut entraîner un problème d'éblouissement. Pour minimiser cet effet, il est recommandé que les dômes ne soient pas situés dans un angle de 30° au-dessus de l'horizontale afin d'éviter l'éblouissement des occupants.



Figure 34: Exemple d'éclairage zénithal de type dôme.

Source : <https://www.usinenouvelle.com/expo/dome-d-eclairage-zenithal-nano-prisma-p178518420.html>

c. Les verrières :

L'architecture moderne utilise de manière très large les verrières. Cependant, cette solution présente plusieurs inconvénients, tels qu'une entrée de lumière solaire excessif dû a la grande superficie des verrières et les défis liés au nettoyage, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur (Terrier. et Vandevyver, 1999). Cette structure complexe fonctionne tel un véritable filtre à lumière, la section supérieure de la verrière est composée de plaques en verre émaillé inclinées, tandis que la section inférieure est formée de panneaux translucides assurant une répartition uniforme de la lumière.



Figure 35: Exemple d'éclairage zénithal de type verrière.

Source : <https://www.lamilux.fr/systemes-declairage-zenithal/produits/verriere-de-toit.html>

➤ **Dispositifs d'éclairage zénithal indirect :**

Les dispositifs d'éclairage zénithal indirect diffusent la lumière naturelle en la réfléchissant sur des surfaces avant qu'elle n'atteigne l'intérieur. Cette méthode offre une lumière plus douce et homogène, réduit l'éblouissement direct et limite les gains thermiques. Elle est idéale pour créer un confort visuel tout en maintenant une efficacité énergétique optimale.

a. Les lanterneaux :

Les lanterneaux sont un mode d'éclairage zénithal, où une partie du toit est surélevée et recouverte d'un matériau semi-transparent. Cette configuration élimine la direction des rayons solaires, souvent observé dans les sheds, en permettant à la lumière de pénétrer depuis deux directions opposées (CDDP De L'herault, 2009). Ceci entraîne des niveaux du facteur de lumière du jour (FLJ) Symétriques par rapport à l'axe central entre les deux baies, il est conseillé, autant que possible, de ne pas exposer les vitres ou surfaces translucides au soleil direct afin d'éviter l'éblouissement des occupants, en veillant à ne pas les orienter vers le Sud.



Figure 36: Exemple d'éclairage zénithal de type lanterneaux.

Source : <https://fenetre.pagesjaunes.fr/astuce/voir/110873/des-lanterneaux-pour-un-eclairage-zenithal>

b. Les sheds :

Les sheds se composent d'une surface translucide qui capte la lumière naturelle pour la diffuser à l'intérieur du local, et d'une surface opaque inclinée, appelée « rampant », qui répartit cette lumière du jour à l'intérieur de la pièce. Celle-ci représente « *la meilleure solution pour l'éclairage naturel. Les sheds permettent de concilier un éclairage suffisant, homogène et une limitation des apports solaires* » (Terrier. et Vandevyver, 1999). Cette disposition permet également de couvrir de grands espaces tout en conservant les avantages de l'éclairage latéral.



Figure 37: Exemple d'éclairage zénithal de type shed.
Source : <https://www.alcaud.fr/shed-polycarbonate/>

c. Les puits de lumière :

La cour, le patio et l'atrium sont des exemples d'espaces qui représentent une solution idéale pour l'éclairage et la ventilation des espaces intérieurs. Ces zones, souvent dépourvues de connexion directe avec l'extérieur ou situées profondément dans le bâtiment, nécessitent une élévation du niveau d'éclairement pour garantir une distribution homogène de la lumière naturelle (Benharkat, 2005). Toutefois, l'inconvénient majeur est la quantité de lumière naturelle fournie par ce système diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'ouverture.

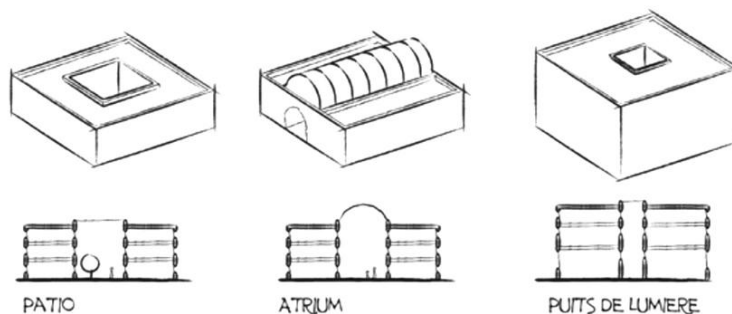


Figure 38: les différents types des puits de lumière.
Source : (Bernard PAULE & Marc FONTOYNONT, 1988)

- **Le patio :**

Un espace découvert clos, entouré de diverses pièces d'une habitation, est généralement désigné sous le terme de cour. Dans ce type d'aménagement, les pièces s'ouvrent souvent sur cet espace central, généralement par des portiques. (Larousse, s. d.)

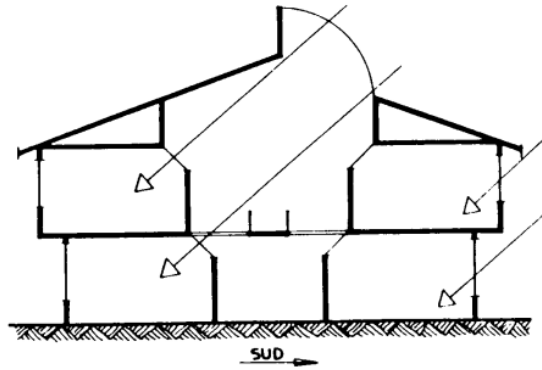


Figure 39: Principe d'éclairage d'un patio central.
Source : (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988)

- **L'atrium :**

L'atrium est un élément architectural fondamental pour renforcer l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments. Grâce à sa configuration ouverte ou couverte par une verrière, il permet une pénétration profonde de la lumière naturelle dans les espaces intérieurs, même ceux éloignés des façades extérieures (Reiter & Herde, 2004).

La lumière zénithale, captée par les ouvertures au sommet de l'atrium, offre un éclairage uniforme et agréable, réduisant ainsi le besoin d'éclairage artificiel. Les parois souvent claires ou réfléchissantes de l'atrium redistribuent la lumière vers les niveaux inférieurs, assurant une meilleure diffusion et une homogénéité lumineuse.

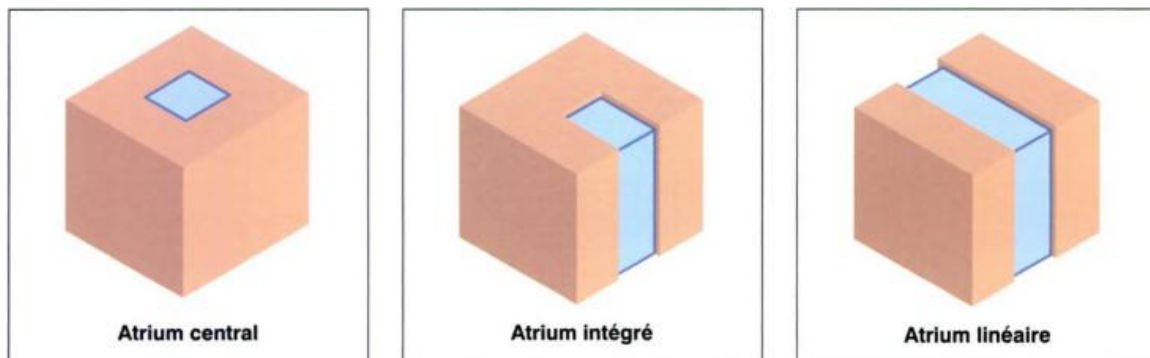


Figure 40: les types d'atrium
Source : (Reiter & Herde, 2004)

3) Éclairage composé :

L'éclairage composé combine des sources lumineuses latérales et zénithales dans un même espace, permettant de profiter des avantages de chaque type tout en minimisant leurs inconvénients. Cette configuration favorise une distribution homogène de la lumière, minimisant les effets de contre-jour et d'éblouissement (Boudoukha, 2015). Le principe classique consiste à installer une source zénithale située au fond de la pièce pour compenser l'éclairage insuffisant provenant des fenêtres verticales en façade, tout en maintenant la lumière naturelle et le contact visuel avec l'extérieur. Ainsi, l'éclairage composé offre un équilibre optimal entre efficacité lumineuse et confort visuel, bien que chaque projet puisse nécessiter un choix entre un éclairage latéral ou zénithal en fonction des spécificités de l'espace.

2.2.3 Influence de position des ouvertures sur la lumière naturelle

Pour analyser l'influence de la position d'une fenêtre sur la répartition de la lumière dans une pièce, trois configurations ont été comparées. Dans le cas de base, une fenêtre de 1,13 m de hauteur est placée avec une allège située à 0,75 m du sol. Dans les deux autres configurations, la même surface vitrée est installée plus haut sur la façade, avec des allèges respectives à 1,25 m et 1,76 m du sol (Reiter & Herde, 2004).

La hauteur de l'ouverture influence significativement l'entrée de la lumière dans le local. Plus la fenêtre est positionnée en hauteur, meilleure est l'éclairement du fond de la pièce, et plus la lumière naturelle pénètre en profondeur. La hauteur de l'allège influence la répartition de la lumière. Quand la fenêtre est au niveau du plan de travail, la lumière diminue progressivement en profondeur. Mais si la fenêtre est placée plus haut, la lumière se concentre davantage au centre de la pièce, créant une zone ombragée près de la fenêtre, qui devient plus grande à mesure que l'allège augmente

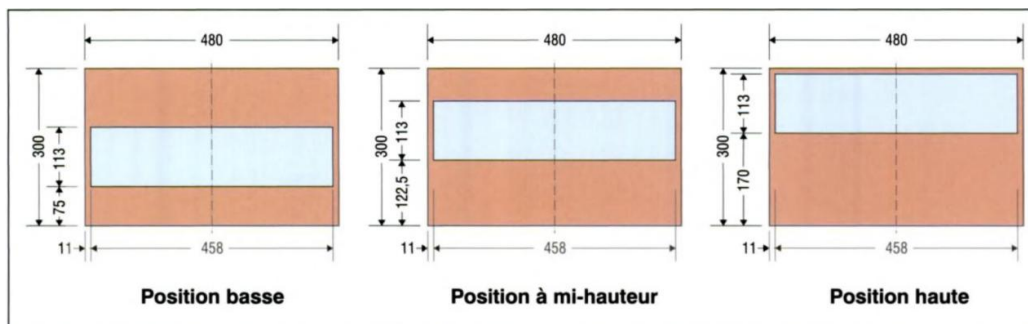


Figure 41: position des ouvertures
Source : (Reiter & Herde, 2004)

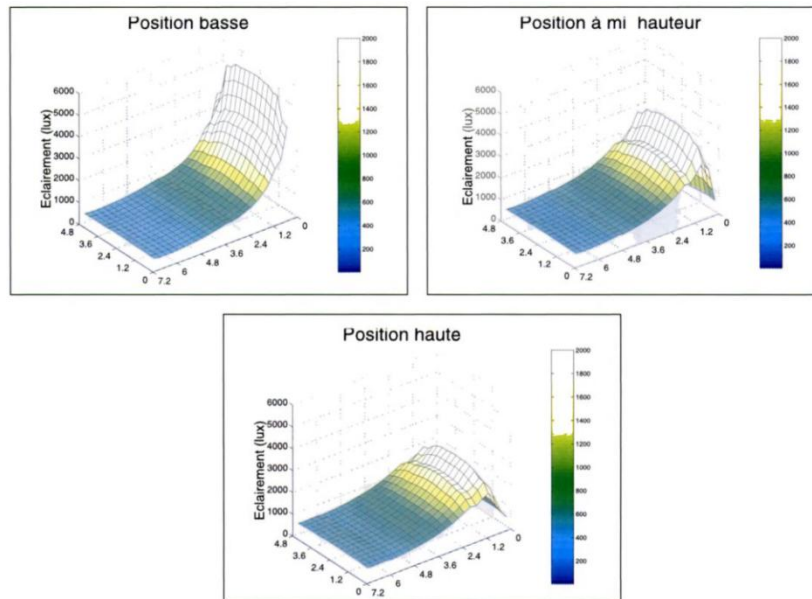


Figure 42: la quantité de lumière capter par les déférentes positions des ouvertures
Source : (Reiter & Herde, 2004)

2.2.4 Influence de dimensions des ouvertures sur la lumière naturelle :

« La "fenestration"¹ influe sur la quantité et la distribution de la lumière » (Lacheheb, 2013). « Les fenêtres sont chargées de permettre la pénétration de la lumière du jour dans le bâtiment. Cependant, comme elles peuvent être une source de gains ou de pertes de chaleur, elles ont également un impact sur la consommation d'énergie du bâtiment » (Khaoula, 2021). Les dimensions des ouvertures jouent un rôle clé dans le niveau de lumière extérieure qui pénètre au sein des locaux. Pour optimiser l'apport de lumière naturelle, il est possible d'élargir la connexion avec l'extérieur en intégrant des éléments comme des décrochements ou des subdivisions.

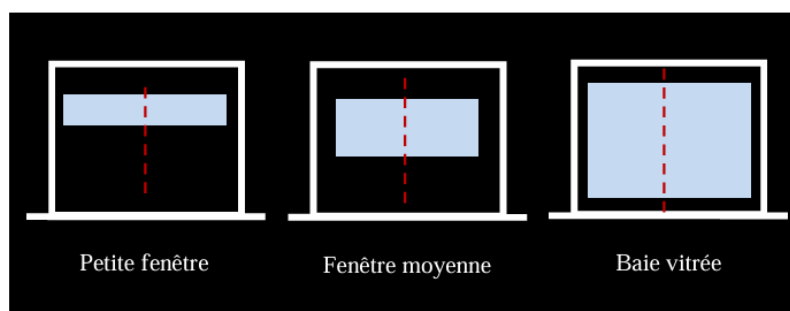


Figure 43: Les dimensions de l'ouverture.
Source : (Daich, 2011)

¹ - **Fenestration** : Le taux de fenestration représente le rapport entre la surface totale des fenêtres et la superficie de la pièce qu'elles éclairent, exprimé en pourcentage.

Les huit configurations illustrées ci-dessous sont classées selon leur efficacité à diriger la lumière naturelle dans un espace. La première configuration (S1) offre les meilleures performances en termes de transmission lumineuse. À l'inverse, plus une façade s'éloigne de cette position dans la sélection, moins la quantité de lumière atteignant le centre de la pièce est satisfaisante.(Daich, 2011)

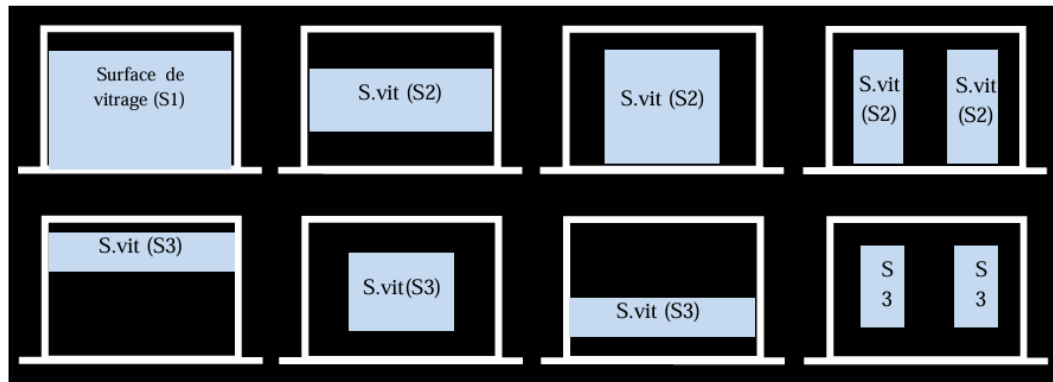


Figure 44: Les dimensions de l'ouverture.
Source : (Daich, 2011)

2.2.5 Influence de la forme des ouvertures sur la lumière naturelle :

« La forme de la fenêtre a un impact limité sur la quantité de la lumière et d'énergie solaire qui pénètre dans un espace intérieur. Par contre, la façon dont la lumière et l'énergie solaire est distribuée varie en fonction de la forme de l'ouverture » (Khaoula, 2021). Ainsi, « La forme de l'ouverture influence la manière dont l'énergie solaire est répartie » (Imene, 2023).

Si la fenêtre est plus petite en largeur, la lumière n'est pas répartie de manière égale dans la pièce, même si la quantité de lumière globale ne change pas beaucoup. Seulement, si la fenêtre est plus haute, la lumière peut atteindre les zones les plus éloignées de la pièce. A cet effet, pour avoir une bonne répartition de la lumière dans toute la pièce, il est important d'avoir une fenêtre à la fois haute et large. Cela permet de faire entrer plus de lumière et de mieux éclairer les zones éloignées de la fenêtre.

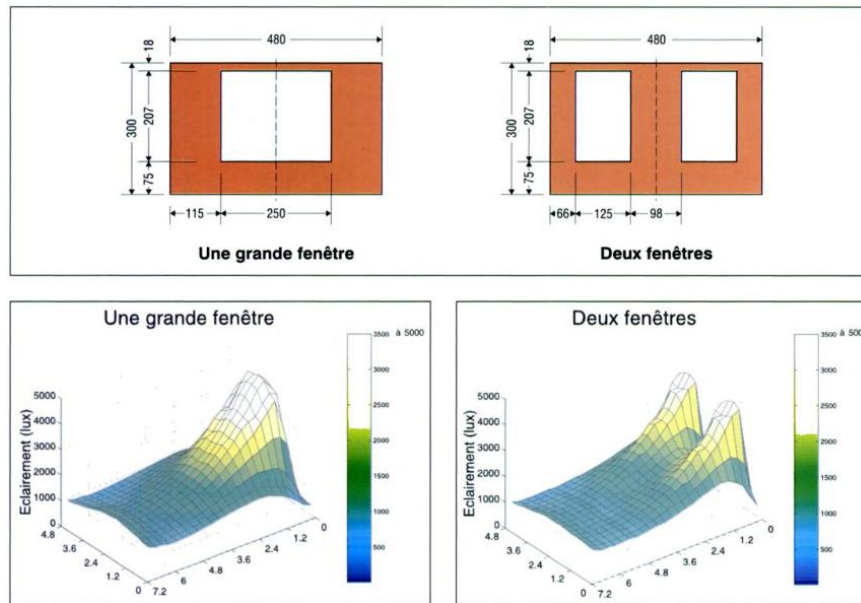


Figure 45: l'influence de la forme d'ouverture
Source : (Reiter & Herde, 2004)

Une ouverture bien conçue peut améliorer l'efficacité de l'éclairage naturel en réduisant les variations et les zones d'ombre. Pour cela, il est utile de comparer l'effet de différentes formes de fenêtres tout en maintenant la même surface vitrée. Par exemple, remplacer plusieurs petites fenêtres étroites par une fenêtre plus large permet de diminuer les contrastes forts et d'obtenir un éclairage plus uniforme dans la pièce.

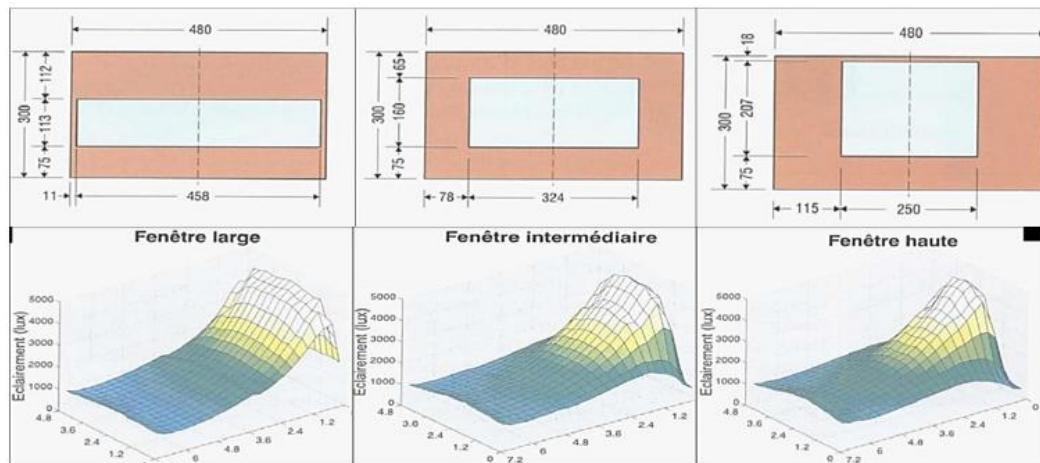


Figure 46: l'influence de la forme d'ouverture
Source : (Reiter & Herde, 2004)

2.3 Les matériaux de contrôle solaire

L'utilisation de matériaux hautement réfléchissants est essentielle pour intégrer efficacement les techniques d'éclairage naturel dans les bâtiments. La réflexion spéculaire est particulièrement précieuse, car elle permet de capter et concentrer la lumière, la rediriger vers des surfaces comme le plafond (à l'aide de bandeaux lumineux ou de lamelles brise-soleil) ou de la distribuer vers des zones spécifiques via des conduits de lumière.

Pour optimiser ces applications, notamment le transport de lumière, il est crucial d'utiliser des matériaux avec un coefficient de réflexion élevé.

2.3.1 Influence du facteur de transmission du vitrage

La quantité de lumière, ce qui pénètre à l'intérieur de l'espace dépend directement de la surface des vitrages et de leur taux de transmission. Lorsque ce facteur diminue, il est nécessaire d'augmenter la taille des ouvertures pour maintenir un niveau d'éclairement équivalent à l'intérieur. (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988)

Il faut tenir compte de ce phénomène, particulièrement pour assurer un éclairage naturel suffisant dans les zones éloignées des fenêtres. Cela est particulièrement pertinent à une époque où les vitrages semi-réfléchissants et teintés sont de plus en plus utilisés.

2.3.2 Influence de la présence d'un vitrage diffusant

Selon des travaux d'analyse effectués par Bernard Paule et Marc Fontoynt Avec l'utilisation du logiciel GENELUX, la distribution de la lumière par le vitrage diffusant diffère de celle assurée par le vitrage classique, et à transmission lumineuse équivalente. En effet, le vitrage diffusant réduit l'éclairement au niveau du sol proche de la fenêtre, tout en augmentant l'éclairement des murs et du plafond. Cela conduit à une plus grande homogénéité de l'éclairement dans le local, sans perte de lumière. En effet, au fond de la pièce, les niveaux de lumière restent similaires dans les deux cas (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988).

Ce phénomène indique qu'un vitrage diffusant agit comme une source lumineuse autonome, redistribuant la lumière d'une manière qui semble moins dépendante des conditions extérieures (comme la position du soleil ou les obstacles environnants). Toutefois il peut être plus éblouissant que la lumière directe provenant depuis l'extérieur à travers une fenêtre claire. Seulement, les vitrages diffusants ont généralement un coefficient de transmission de lumière plus bas que celui des vitrages transparents, réduisant ainsi la quantité de lumière transmise. (L'ARENE Île-de-France, 2014)

Finalement, le principal avantage des vitrages diffusants réside dans la création d'une lumière intérieure plus homogène, éliminant les taches de lumière directe et permettant une gestion plus contrôlée de l'éclairage naturel. Ce phénomène peut être particulièrement utile dans des contextes où une diffusion uniforme de l'éclairage est souhaitée, tout en diminuant les effets de la lumière excessive directe.

2.3.3 Les matériaux influençant l'apport de la lumière naturelle

➤ Les vitrages

Le verre utilisé dans l'habitat a évolué grâce à l'application de couches minces qui modifient son interaction avec la lumière. Il peut être traité pour réduire les reflets, améliorer la transparence des vitrines, ou encore optimiser le contrôle solaire en limitant la transmission de chaleur. (Ruchmann, s. d.). Le vitrage dans ce sens représente « *un paramètre important dans la qualité de l'éclairage puisqu'il s'agit d'un intermédiaire majeur entre l'extérieur et l'intérieur* » (Pineault, 2009).

Le vitrage permet de maximiser l'apport de lumière naturelle afin de réduire l'éclairage artificiel tout en évitant l'éblouissement. Il est essentiel dans le contrôle du rayonnement solaire : en été, il limite la chaleur excessive pour réduire la climatisation, tandis qu'en hiver, il doit préserver un apport solaire suffisant pour profiter d'une source de chaleur naturelle.

➤ Les Concentrateurs Fluorescents

Les concentrateurs fluorescents désignent des panneaux de résine acrylique transparente, ayant une épaisseur peut varier et qui sont colorées dans la masse avec des pigments fluorescents. Ces plaques ont la capacité unique de diriger la lumière incidente sur leurs surfaces principales et de la répartir principalement sur leurs tranches. Cette propriété permet de capturer la lumière diffuse et de la transformer en lumière dirigée, ce qui facilite son transfert. De plus, cette lumière orientée peut remplacer l'éclairage électrique, notamment pour constituer un éclairage de secours fiable et sans risque. (Bernard Paule & Marc FONTOYNONT, 1988)

Ces matériaux offrent des applications pratiques prometteuses, particulièrement dans le domaine de la signalisation. Ils peuvent être utilisés pour éclairer des espaces extérieurs ou des zones de circulation intérieure, en mettant en valeur des formes, en renforçant des

directions privilégiées, ou encore en jouant avec la lumière pour des effets esthétiques et symboliques. Ils contribuent également à améliorer la sécurité grâce à leur capacité d'éclairage en cas de besoin.

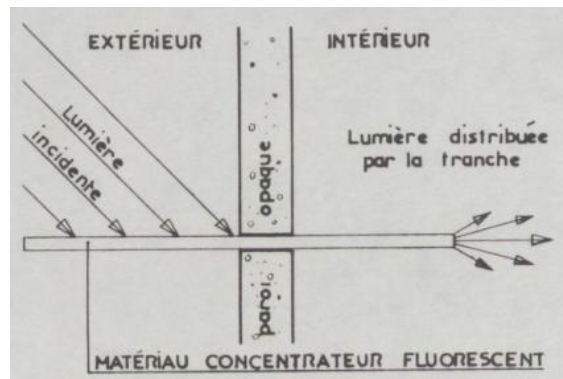


Figure 47: Principe de concentrateur fluorescent.
Source : (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988)

➤ Les Matériaux Prismatiques

Les matériaux prismatiques se présentent sous forme de plaques en matière plastique (acrylique) ou en verre, caractérisées par une face lisse et une autre constituée de "sillons" en forme de prismes. Grâce à la variation de l'indice de réfraction entre l'acrylique et l'air, ces plaques peuvent dévier la lumière (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988).

Le principal atout de ce mécanisme est de diriger la lumière vers le plafond, réduisant ainsi son effet éblouissant sans qu'elle soit rejetée à l'extérieur.

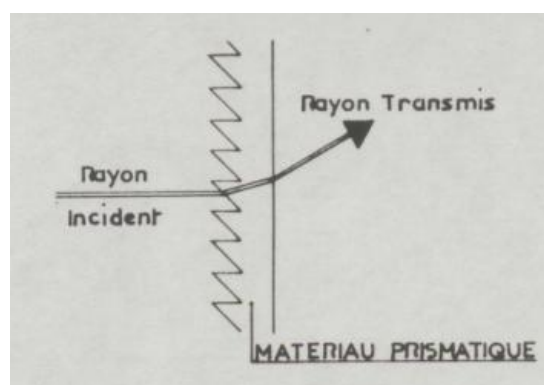


Figure 48: Fonctionnement d'un Matériau Prismatique.
Source : (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988)

➤ **Les Films Holographiques**

Les films holographiques, conçus pour être appliqués sur les vitrages comme des films solaires classiques, se distinguent par leurs propriétés exceptionnelles dans le contrôle et la déviation de la lumière. Inspirés des techniques de l'holographie, ces films contiennent une "information" tridimensionnelle enregistrée sur une émulsion appliquée sur un support plastique. Cette information permet au film de dévier la lumière incidente dans une ou plusieurs directions prédéfinies (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988).

Cependant, leur potentiel pour le contrôle des apports solaires et l'optimisation des ambiances lumineuses naturelles est immense, offrant des perspectives prometteuses pour l'architecture et le design des bâtiments.

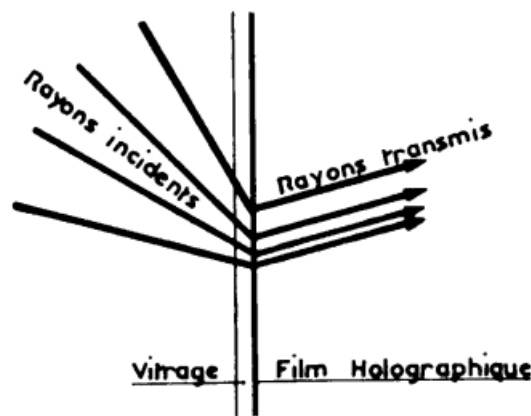


Figure 49: Films holographiques: principe de déviation des rayons lumineux quelque soit leur angle d'incidence

Source : (Bernard Paule & Marc Fontoynt, 1988)

➤ **Le film de redirection de lumière naturelle 3M**

Le film de redirection de lumière naturelle 3M^{TM2} est conçu pour redistribuer l'excès de lumière situé près des fenêtres vers les zones plus profondes du bâtiment. Ce dispositif permet de faire pénétrer la lumière du jour en profondeur, offrant ainsi à un plus grand nombre d'occupants les bienfaits de l'éclairage naturel. Il contribue également à diminuer la dépendance à l'éclairage artificiel, réduisant ainsi la consommation énergétique globale. (3M Science .Appleid to life, 2016)

² - 3MTM : nom de l'entreprise +marque protégée.

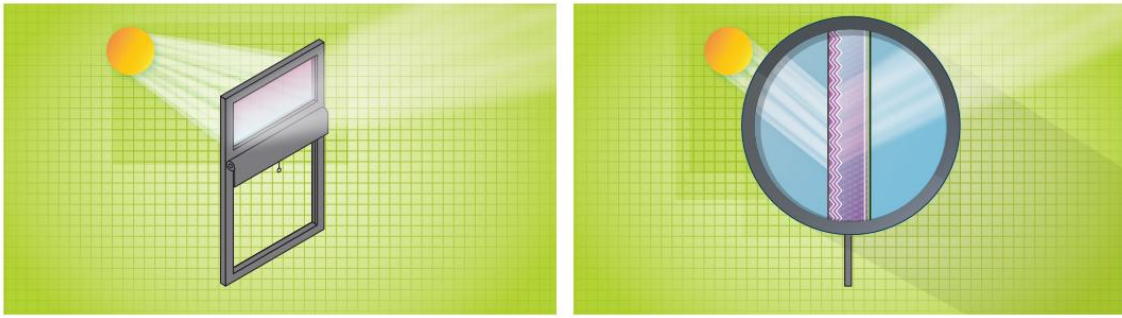


Figure 50: La redirection des rayons de lumière par le film de redirection de lumière naturelle 3M™
Source: (3M Science .Appleid to life, 2016)

Le film de redirection de l'éclairage naturel 3M offre plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes de réflexion de la lumière. Facile à installer, il s'intègre directement dans les fenêtres nouvelles ou existantes, sans nécessiter d'infrastructures ou de matériel supplémentaire. Son entretien est minime, sans besoin de nettoyage spécifique. Il fonctionne efficacement à toute heure de la journée, y compris lorsque le soleil est bas. En outre, il se révèle plus économique que de nombreuses solutions d'éclairage naturel disponibles sur le marché.

Synthèse

Technique	Mise en œuvre
Orientation	<ul style="list-style-type: none"> - L'orientation sud offre une lumière généreuse et stable, idéale pour les pièces de vie. - Des protections solaires sont nécessaires pour limiter l'éblouissement et la chaleur.
	<ul style="list-style-type: none"> - L'orientation est offre une lumière matinale dynamique, idéale pour les chambres et salles de bains. - Elle peut provoquer un éblouissement et un manque de luminosité en fin de journée, nécessitant des protections solaires adaptées.
	<ul style="list-style-type: none"> - L'orientation ouest apporte une lumière intense l'après-midi, mais peut causer de l'éblouissement. - Des protections comme des stores aident à préserver le confort visuel.
	<ul style="list-style-type: none"> - L'orientation nord offre une lumière douce et stable, idéale pour les espaces nécessitant peu d'éblouissement. - Elle peut manquer de luminosité en hiver, nécessitant une conception adaptée des fenêtres.
Les ouvertures	<ul style="list-style-type: none"> - Les types d'ouvertures influencent directement l'optimisation de la lumière naturelle. - L'éclairage latéral capte la lumière via les façades, tandis que l'éclairage zénithal, provenant du toit, diffuse une lumière homogène. - Leur combinaison permet d'atteindre un éclairage naturel équilibré et efficace.

	<ul style="list-style-type: none">- La position des fenêtres influence la répartition de la lumière. Plus elles sont hautes, plus la lumière pénètre profondément.- Création des zones d'ombre près de l'ouverture.
	<ul style="list-style-type: none">- La dimension des ouvertures affecte la quantité de l'éclairage entrant dans un espace. Plus l'ouverture est vaste, plus la lumière naturelle est importante.- Des ajustements comme des subdivisions peuvent optimiser cette entrée lumineuse.
	<ul style="list-style-type: none">- La forme des fenêtres affecte la répartition de la lumière.- Une fenêtre large et haute permet une meilleure diffusion et réduit les zones d'ombre.- Une fenêtre plus petite crée des contrastes et éclaire moins uniformément.
Les matériaux	<ul style="list-style-type: none">- Le vitrage moderne optimise la lumière naturelle grâce à des traitements spécifiques, réduisant l'éblouissement et maximisant la transmission lumineuse.- Il améliore ainsi le confort visuel tout en limitant les pertes énergétiques.
	<ul style="list-style-type: none">- Les matériaux optiques optimisent la lumière naturelle en la captant, en la redirigeant et en la diffusant efficacement.- Ils réduisent l'éblouissement, et limitent la consommation énergétique.- Leurs applications sont variées en architecture, signalisation et éclairage autonome.

Tableau 4:synthèse
Source : auteur 20225

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'approfondir la compréhension des différents facteurs qui influencent l'apport de lumière naturelle au sein des bâtiments. En premier lieu, nous avons identifié les éléments essentiels tels que l'orientation, l'implantation, la conception des ouvertures, les matériaux utilisés, ainsi que l'environnement immédiat, qui interagissent de manière complexe pour déterminer la qualité et la quantité de lumière naturelle perçue à l'intérieur des espaces. Sur cette base, nous avons ensuite structuré notre analyse autour de trois axes principaux : l'orientation, les ouvertures et les matériaux. Ces leviers ont été étudiés comme des moyens concrets et complémentaires pour optimiser l'entrée de lumière naturelle selon les contraintes et spécificités architecturales.

Ainsi, cette étude met en évidence que la lumière naturelle ne peut être efficacement intégrée qu'à travers une approche globale, tenant compte à la fois des principes fondamentaux et des stratégies techniques adaptées. Les solutions évoquées offrent une base solide pour concevoir des espaces lumineux, confortables et durables, en réduisant significativement la dépendance aux éclairages artificiels tout en valorisant la qualité architecturale des lieux.

Chapitre 03 : La simulation de cas d'étude

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la ville de Bejaïa ainsi que le centre commercial Ritaj Mall, retenu comme cas d'étude en raison de ses caractéristiques architecturales et de son contexte urbain particulier. Nous allons évaluer la qualité de l'éclairage naturel dans les espaces commerciaux en adoptant une méthodologie qui combine des mesures in situ et des simulations numériques à l'aide du logiciel Dialux Evo. Cette approche nous permettra de confronter les données réelles aux résultats simulés afin de valider la fiabilité du modèle numérique. Nous analyserons ensuite différentes configurations saisonnières et horaires pour apprécier les performances lumineuses du bâtiment tout au long de l'année. À travers ce travail, nous chercherons à identifier les éventuelles insuffisances en matière d'éclairage naturel et à proposer des recommandations adaptées, tout en soulignant l'importance d'intégrer cette dimension dès les premières phases de conception architecturale.

1 Présentation de la ville de Bejaïa

Située dans le nord-est de l'Algérie, Bejaïa est une ville côtière qui borde la mer Méditerranée. Chef-lieu de territoire du même nom, elle s'étend sur environ 120 km² et bénéficie d'un cadre naturel exceptionnel, entre mer, montagnes et forêts.

Bejaïa a un passé historique riche et était une cité florissante à l'époque romaine. Elle portait le nom de Saldae et devint, durant le Moyen Âge, un important centre économique et culturel sous les dynasties des Hammadides et des Hafsides. Elle a notamment contribué à la diffusion des chiffres arabes en Europe et a donné son nom aux bougies en raison de la pureté de ses chandelles à base de cire d'abeille.

Actuellement, Bejaïa est un pôle économique dynamique, doté d'un port stratégique et d'une activité industrielle et touristique en plein essor. Son patrimoine culturel, ses paysages magnifiques et sa richesse historique en font une destination prisée pour les visiteurs à la recherche d'authenticité et de découvertes.

1.1 Situation de La ville de Bejaia

Située au nord-est de la région centrale de l'Algérie, la wilaya de Bejaïa se situe à 240 km d'Alger. Elle occupe l'extrémité ouest d'une vaste baie d'environ 100 km et couvre une superficie de 3 223,5 km². Son emplacement stratégique en fait une région côtière majeure, alliant reliefs montagneux, littoral méditerranéen et richesses naturelles diversifiées.



Figure 51: la situation de Bejaia

Source : <http://ighilali.free.fr/images/thumbs-bejaia.jpg>

1.2 Topographie et morphologie

Située dans le Tell oriental, Bejaïa se distingue par un relief varié qui conjugue harmonieusement mer, montagnes, plaines côtières, vallées et rivières. Son paysage diversifié lui confère une identité unique, mêlant étendues littorales et hauteurs escarpées.

La commune de Bejaïa est principalement dominée par des montagnes et des piémonts, tandis que le reste de la région est couvert par des plaines et le littoral. Ce contraste naturel contribue à la richesse écologique et économique de la région, favorisant à la fois le tourisme, l'agriculture et d'autres activités essentielles au développement local.



Figure 52: la topographie de la ville de Bejaia
Source : wikimedia

1.3 Le climat

La diversité du relief de Béjaïa a un impact sur le climat. Sur le littoral, les températures sont modérées, avec des hivers doux et des étés chauds. Cependant, en raison de l'altitude, la zone montagneuse est sujette à des gelées fréquentes en hiver. Le climat est tempéré par les vents dominants, principalement du nord-ouest, qui ont une influence maritime. La pluviométrie annuelle peut varier considérablement en fonction des régions, oscillant entre des niveaux moyens et élevés, garantissant ainsi une certaine humidité favorable à la végétation.

2 Présentation de cas d'étude

Le centre commercial et de loisirs Ritaj Mall est une destination prisée, bénéficiant d'un emplacement stratégique et d'une accessibilité optimale. Il attire aussi bien les habitants de Bejaïa que ceux des communes avoisinantes.

Réparti sur plusieurs niveaux, il propose une vaste surface commerciale et une grande diversité de magasins. On y trouve une épicerie, un magasin de meubles, un restaurant, des enseignes d'électroménager, de prêt-à-porter pour toute la famille, une blanchisserie, une parfumerie et un magasin de jouets, offrant ainsi une expérience shopping complète et variée.

2.1 Fiche technique

- L'emplacement : Bejaïa ville
- La date de réalisation: 17mai 2017
- Propriétaire: Société des centres commerciaux d'Algérie
- Superficie:3160m²
- Echelle du projet: Quartier
- Nombre de niveau : R+1
- Classification: Les petits centres commerciaux



Figure 53:façade principale de ritadj mall

Source : https://media.safarway.com/content/90c1228a-4ef9-4181-9ab0-991a80cae4ce_xs.jpg

2.2 Justification de choix

En vue d'atteindre les objectifs de notre recherche, nous avons choisi d'analyser le centre commercial et de loisirs Ritaj Mall à Béjaïa comme support d'étude. Ce choix s'est justifié non seulement par son importance en tant que plus grand centre commercial de la wilaya, mais surtout par ses caractéristiques similaires à celles de notre projet.

En effet, son périmètre, son organisation spatiale et ses principes architecturaux, comme la gestion de la lumière naturelle, la répartition des espaces commerciaux et de loisirs, ainsi que les flux de circulation, offrent des points de comparaison pertinents. De plus, les conditions climatiques et environnementales du site étant comparables à celles de notre projet, l'analyse de ce centre permet d'extraire des données transposables et adaptées à nos recherches.

2.3 Situation géographique

Situé à rue Mahfoudi Fatah, en plein cœur de la ville de Bejaïa, à proximité de sites historiques et du célèbre quartier résidentiel de la cité Seghir, il se trouve également en perpendiculaire des deux grandes artères commerçantes de la ville à savoir la Route des Aurès et le Boulevard Krim Belkacem.



Figure 54: la situation de Ritadj mall
Source : Google earth (2025)

2.4 Analyse architecturale

- **Le plan de masse :** Le projet est principalement constitué de d'un sous- sols, d'un Rez de chaussé et d'un étage, huit étages surélevé dédié pour l habitation

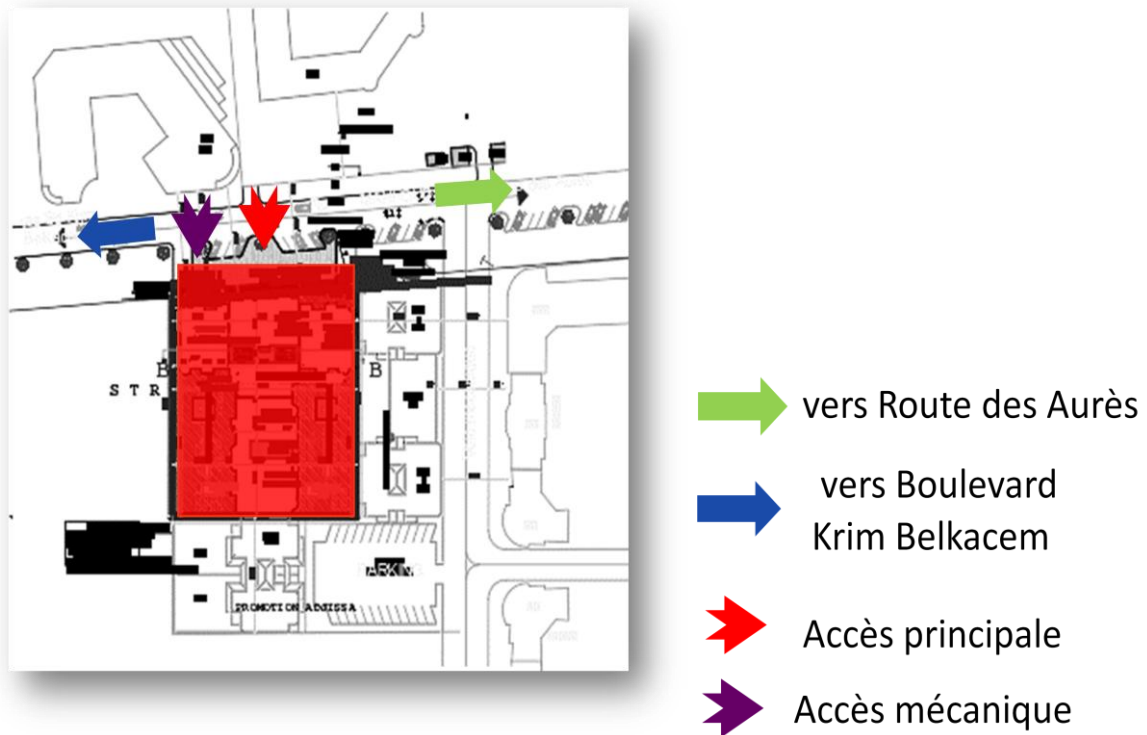


Figure 55: plan de masse
Source : BET Cetau traité par l'auteur

- **Étude de RDC**

Le RDC de centre commercial dispose de deux vastes espaces dédiés, l'un réservé à un hypermarché et l'autre à un magasin de meubles, accompagné d'un espace de stockage.

Au cœur du centre, face à l'entrée, un escalier et un ascenseur permettent d'accéder à l'étage. À l'arrière, un bureau et une salle de prière sont aménagés à proximité des sanitaires, offrant ainsi des services pratiques aux visiteurs.

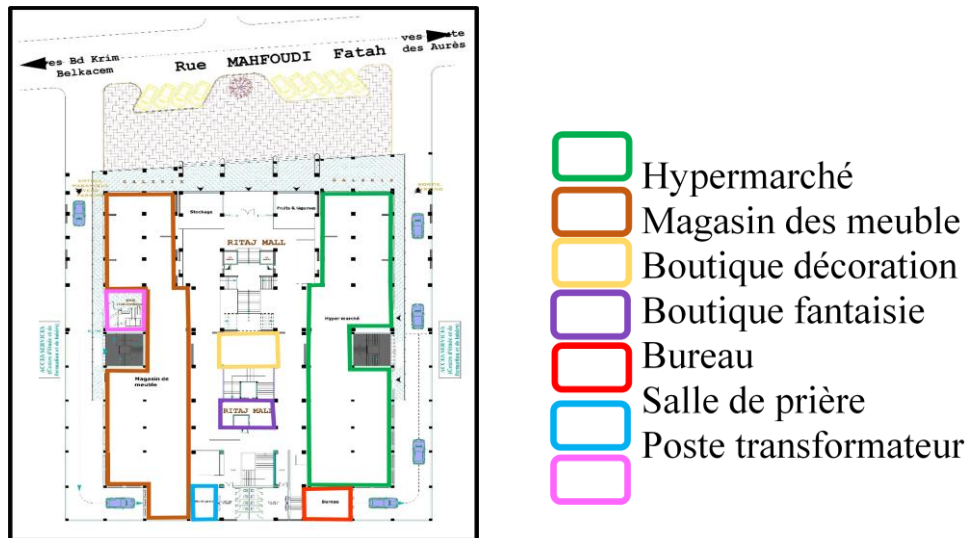


Figure 56: plan RDC

Source : BET Cetau traité par l'auteur

• Étude de 1ere étage

Le centre commercial abrite dans le premier étage trois boutiques de prêt-à-porter pour hommes et femmes, une boutique spécialisée en articles pour bébés, ainsi qu'un magasin dédié aux jeux et un autre à l'électroménager.

Pour le divertissement, une salle de jeux est à disposition des visiteurs. Du côté de la restauration, un restaurant et un snack offrent une variété de choix gourmands. De plus, la présence de monte-charges facilite l'accès aux différents espaces du centre.

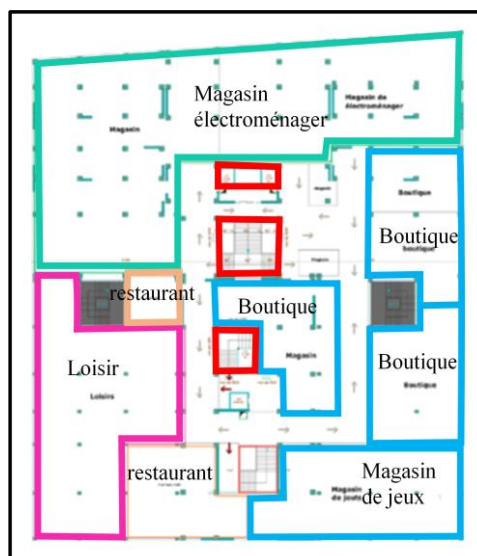


Figure 57: plan R+1

Source : BET Cetau traité par l'auteur

2.5 Étude des façades

La façade du centre commercial présente une conception symétrique, mettant en valeur une harmonie architecturale. Son design repose sur une horizontalité marquée et une grande transparence, renforcée par de larges baies vitrées favorisant un éclairage naturel optimal. L'entrée est mise en avant par un porche apparent, accentuant son accessibilité et son caractère accueillant.

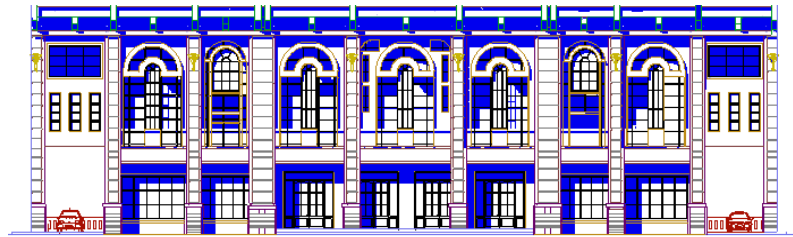
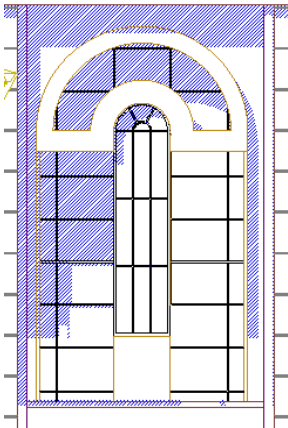
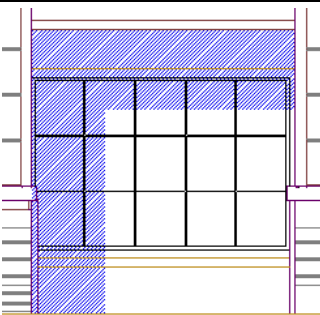


Figure 58 : Façade principale de Ritadj mall
Source : BET Cetau traité par l'auteur

2.6 Les ouvertures forme, type et matériaux

Type	Description
	Cette baie vitrée présente une conception architecturale élégante avec une structure cintrée en partie supérieure, formant une arche qui accentue son esthétique classique. Elle est composée de plusieurs panneaux vitrés, divisés par des montants verticaux et horizontaux, avec un élément central plus étroit qui suit la courbure de l'arc. Cette baie avec une largeur 5m réalisé en simple vitrage.
	Cette baie vitrée en simple vitrage est intégrée dans une structure murale et composée de plusieurs panneaux vitrés séparés par des montants verticaux et horizontaux, formant une grille régulière. Elle est encadrée par une structure, en aluminium, assurant la fixation des vitrages.

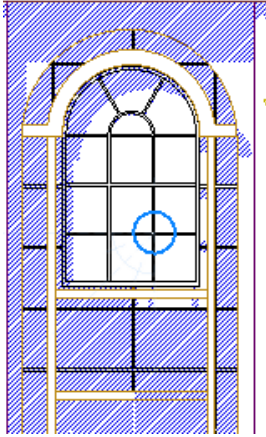
	<p>C'est une baie à arc en plein cintre d'une largeur de 3,80 mètres, composée d'une partie inférieure rectangulaire et d'un arc supérieur. Elle est réalisée en simple vitrage, insérée dans une ossature métallique, et divisée par des petits bois formant un quadrillage régulier. Un motif circulaire est présent en partie haute, ajoutant une touche décorative.</p>
---	---

Tableau 5:les types d'ouvertures
Source : BET Cetau

Constat

À la suite de notre analyse sur le terrain, nous avons constaté une problématique majeure concernant notre cas d'étude initial, le centre commercial Ritaj Mall. Celui-ci ne bénéficie malheureusement d'aucune lumière naturelle. Bien qu'il soit équipé de baies vitrées, celles-ci sont entièrement obstruées par des aménagements intérieurs, empêchant totalement la lumière du jour de pénétrer dans les espaces.

Cette situation entraîne une dépendance totale à l'éclairage artificiel, ce qui compromet sérieusement notre objectif initial. En effet, dans ces conditions, il nous est impossible de réaliser des relevés lumineux fiables ni de procéder à la simulation prévue via le logiciel Dialux Evo, dont la validation repose en grande partie sur les apports en lumière naturelle.

Face à cette contrainte, nous avons été amenés à rechercher un autre espace présentant des caractéristiques similaires à celles du Ritaj Mall. Cette recherche s'est basée sur plusieurs critères essentiels, tels que l'orientation du bâtiment, son emplacement, les matériaux utilisés, la hauteur des volumes, le traitement des façades ainsi que les dimensions et la disposition des ouvertures.

Nous avons ainsi décidé de poursuivre notre étude sur le centre commercial Bobaya, situé juste à côté du Ritaj Mall. Ce nouvel espace répond mieux aux exigences de notre démarche d'analyse et permet de mener à bien les simulations nécessaires à l'aide de Dialux Evo.

3 Evaluation de l'éclairage naturel dans un centre commercial mesures in situ et modélisation numérique

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la qualité de l'éclairage naturel dans les espaces d'un centre commercial en combinant une approche empirique et une simulation numérique.

Dans un premier temps, une analyse sur site sera réalisée sur un seul espace à l'aide d'instruments de mesure permettant de collecter des données quantitatives précises. Par la suite, une simulation numérique sera effectuée sur ce même espace dans le but de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes.

Étant donné que les résultats fournis par la simulation sont similaires ou très proches de ceux des mesures sur site, nous avons choisi de poursuivre l'évaluation des autres espaces exclusivement par simulation numérique. Ce choix est motivé par les contraintes et les difficultés liées aux mesures sur site, rendant la simulation une alternative plus efficace et flexible pour l'ensemble de l'étude.

3.1 Les mesures In-situ (étude empirique)

Tous d'abord, les mesures sur le terrain ont été effectuées sur l'un des espaces du centre commercial afin de quantifier l'éclairage, en utilisant un instrument adapté et un protocole rigoureusement suivi.

3.1.1 Outils de mesure

Le luxmètre est un instrument utilisé pour quantifier l'éclairage lumineux par unité de surface, exprimé en lux (lx). Un lux représente l'éclairage produit lorsqu'un flux lumineux de un lumen éclaire de manière uniforme une surface de un mètre carré. L'appareil se compose principalement d'un capteur de lumière, d'un circuit électronique chargé de traiter les données, ainsi que d'un écran d'affichage permettant de lire directement les mesures. (*Lux Meter* / PDF / Lighting / Electromagnetic Radiation)



Figure 59 : Luxmètre

Source : https://www.turbotronic.fr/sites/default/files/styles/product_detail_image/public/product_photos/A91030089.jpg?c=b80f6242700bb92fa23a3b8ca5c44aaf

3.1.2 Procédure d'utilisation

1. Mettez l'appareil en marche en appuyant sur le bouton d'allumage.
2. Placez le capteur du luxmètre face à la source de lumière.
3. Attendez quelques secondes pour stabiliser la mesure.
4. Lisez la valeur affichée en lux sur l'écran.

3.1.3 Le protocole

- **Date et période de la mesure :**

Les relevés ont été effectués in situ le 06 mai 2025, durant la saison de printemps, en une seule journée.

- **Conditions météorologiques :**

Les relevés ont été réalisées sous un ciel clair, la journée ayant été sélectionnée spécifiquement en fonction du niveau de nébulosité afin de garantir une constance dans l'éclairage naturel.

- **Horaires de mesure :**

Trois relevés ont été effectués durant la journée pour observer l'évolution de l'éclairement naturel : à 9h00, à 12h00, à 16h00

- **Disposition des points de mesure :**

Les mesures ont été prises à l'intérieur du cas d'étude :

- _ Sur un plan horizontal situé à 80 cm du niveau du plancher (représentant une hauteur utile de travail).
- _ Suivant un quadrillage régulier, permettant une couverture homogène de la zone étudiée.

- **Conditions d'environnement lors des mesures :**

- _ L'éclairage artificiel a été coupé durant toute la durée de la campagne.
- _ Les rideaux ont été entièrement ouverts, afin de ne mesurer que l'apport de la lumière naturelle, sans interférence.

3.2 La simulation numérique

La simulation numérique repose sur l'utilisation d'un ordinateur pour effectuer des calculs permettant de reproduire un phénomène physique. Les résultats obtenus offrent une représentation réaliste de ce phénomène, sous forme de données, d'images ou de vidéos, facilitant ainsi son analyse et son interprétation.(Gressier, 2010)

Dans cette étude, l'approche numérique sera utilisée pour compléter et affiner les données empiriques recueillies lors des mesures d'éclairement. Cette démarche s'impose en raison des contraintes temporelles, qui ne permettent pas d'effectuer des relevés tout au long de l'année. Elle repose sur l'utilisation du logiciel spécialisé Dialux, qui permettra d'évaluer quantitativement le confort lumineux dans ces espaces.

3.2.1 Présentation du logiciel DIALux Evo

Le logiciel DIALux a été créé par DIAL GmbH, une entreprise allemande qui se concentre sur les techniques du bâtiment et de l'éclairage depuis 1989. Créé en 1994, DIALux est un logiciel gratuit qui permet la conception et l'analyse de l'éclairage.(Corentin, & Magali, 2012)

En 2012, une version plus avancée, DIALux EVO, a été lancée, offrant plus de fonctionnalités et d'améliorations que la version classique, ce qui améliore la simulation et l'estimation de l'éclairage naturel et artificiel. Il permet de :

- Calcul de la lumière naturelle et artificielle.
- Évaluation de l'éclairement, du l'indice de lumière du jour et de la luminance.
- Prise en compte des différentes conditions de ciel (clair, moyen, couvert).
- Modélisation d'une pièce simple ou d'un bâtiment complet avec son environnement extérieur.
- Réalisation d'études d'ombrage et de rendus.
- Visualisation 3D réaliste du projet.

- Bibliothèque de mobilier évolutive avec choix des textures et matériaux.
- Sélection des matériaux pour les ouvertures.
- Importation de modèles 3D depuis Revit.
- Importation de plans aux formats DXF et DWG.
- Importation de fichiers d'images.
- Planification de scènes extérieures (espaces verts, chemins, parkings, éclairage routier).

3.2.2 Les étapes de la simulation par le logiciel DialuxEvo

Etape 01 : Importation d'un plan DWG

- Définir l'origine de l'axe du projet.
- Déterminer l'échelle du dessin.

Etape 02 : Positionner l'orientation du nord du le plan

- Sélectionner l'outil "Pointeur nord".
- Définir l'orientation nord sur le dessin.

Etape 03 : Modéliser l'édifice

- Tracer le contour extérieur du bâtiment.
- Dessiner les pièces intérieures du bâtiment.
- Ajouter les autres étages en cliquant sur "Nouvel étage vide".
- Répéter les étapes précédentes pour modéliser les autres étages.
- Positionner les ouvertures.

Etape 04 : Modéliser l'environnement immédiat

- Utiliser l'outil "Dessiner un nouveau bâtiment" pour modéliser les bâtiments environnants.
- Sélectionner l'outil "Dessiner un sol" afin de représenter les différents éléments du terrain.

Etape 05 : Vérification préliminaire

- Sélectionner une ouverture du bâtiment.
- Vérifier que l'option [Important pour la lumière du jour] est bien activée.

Etape 06 : Choisir le type de ciel, la journée et l'heure

- Choisir le type de ciel.
- Définir la date et l'heure.

Etape 07 : Les calculs et résultats des calculs

- Cliquer sur l'onglet « Démarrer le calcul ».
- Une fois le calcul terminé, passé en mode "Objets de calcul".
- Accéder au sous-mode "Plans utiles".
- Définir la hauteur du plan utile.
- Choisir un mode d'affichage des résultats (courbes isophotes, fausses couleurs ou numérique).

3.3 Validation de model de mesure

En raison de la contrainte de temps, nous avons eu recours à la simulation numérique pour poursuivre l'étude, en nous concentrant sur les trois moments les plus défavorables de l'année : l'équinoxe (21 mars/septembre), le solstice d'été (21 juin) et le solstice d'hiver (21 décembre). Pour cela, il est d'abord nécessaire de valider le modèle d'analyse « Dialux » en comparant la grille de mesures obtenue par simulation avec celle issue des relevés effectués à l'aide du logiciel.

3.3.1 Analyse et interprétation des résultats de prises des mesures in situ

Plan de quadrillage :

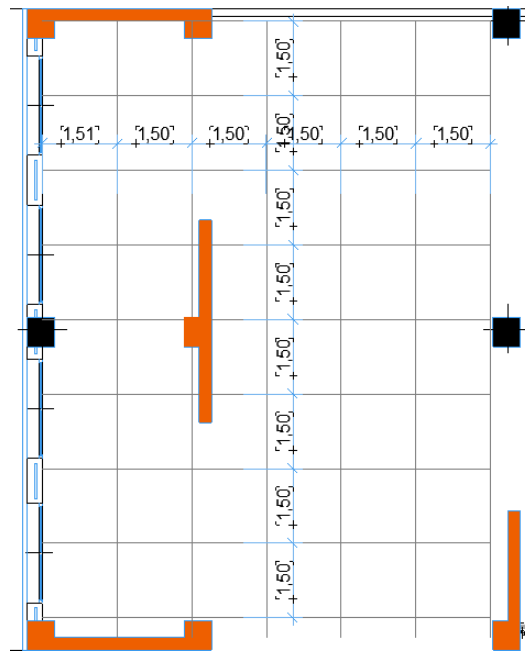


Figure 60: plan de quadrillage

Source : auteur avec archicad .2025

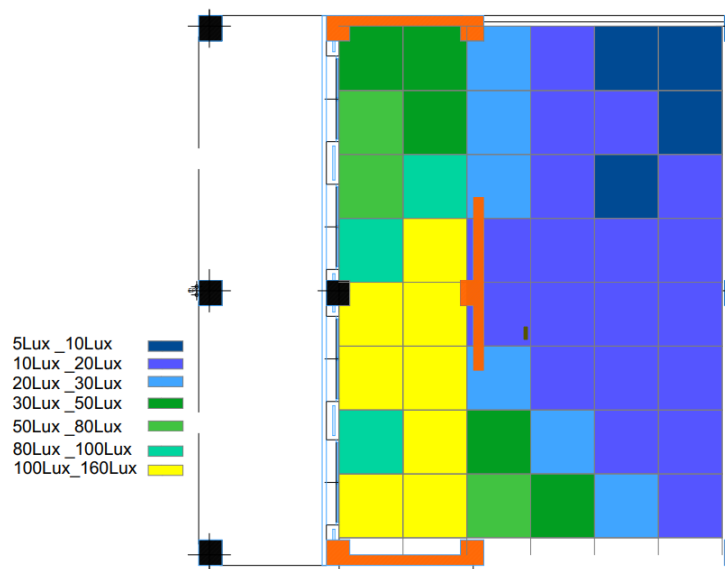
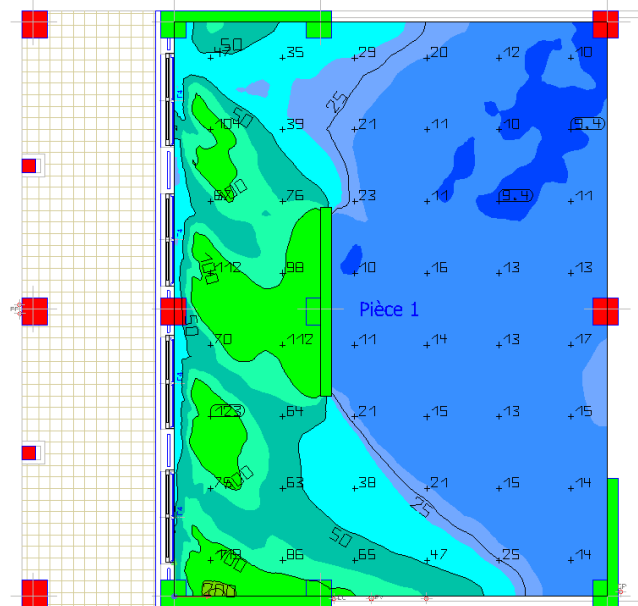


Figure 61: Les résultats de prise de mesure in situ à 10h

Source : auteur avec luxmètre .2025

On observe sur cette carte, présentée sous forme de grille colorée, Les cellules situées juste devant les fenêtres affichent des couleurs jaunes (100–160 lux) et vert clair (80–100 lux), indiquant une très bonne captation de lumière naturelle dans cette zone. Toutefois, cette intensité diminue de manière brutale dès que l'on franchit la limite du voile central, représenté ici en orange. En effet, immédiatement derrière celui-ci, les valeurs tombent rapidement dans les plages de vert foncé à bleu (50 lux et moins), signalant une perte significative d'éclairement. Ce phénomène montre clairement l'effet d'obstruction du voile,

3.3.2 Analyse et interprétation des résultats de simulation par le logiciel DialuxEvo



Source : auteur avec luxmètre. 2025

On constate une distribution graduelle de la lumière naturelle depuis la façade vitrée située à l'ouest de la pièce. Les zones les plus proches des ouvertures atteignent des valeurs élevées, allant de 100 à plus de 120 lux, représentées par des couleurs vert clair à jaune. En s'éloignant vers l'intérieur, l'éclairement décroît rapidement, ce qui est particulièrement visible dans les teintes bleues foncées, correspondant à des valeurs inférieures à 20 lux. La présence d'un voile central, positionné entre les fenêtres et la partie plus profonde de la pièce, joue ici un rôle non négligeable : il interrompt la propagation directe de la lumière et crée une zone d'ombre localisée. Cette obstruction partielle atténue la transition lumineuse et contribue à l'apparition de zones intermédiaires (30–50 lux), mais limite aussi la portée de la lumière vers l'arrière de la pièce.

Afin de valider le modèle d'analyse, il est essentiel d'évaluer le taux de précision de cet outil informatique. Cette évaluation se fera en comparant les valeurs maximales obtenues par simulation avec celles relevées sur le terrain. La démarche adoptée est présentée ci-dessous, en tenant compte des conditions suivantes : 10h00, sous un ciel clair.

On a : -E_{max} des résultats des prises de mesure in situ : 172lux

-E_{max} des résultats de la simulation avec dialux evo : 179lux

$$164\text{lux} = 100\%$$

$$179\text{lux} = X\%$$

$$X = (179 \times 100) / 172$$

$$X = 104\%$$

On a : -E_{min} des résultats des prises de mesure in situ : 8.5lux

-E_{min} des résultats de la simulation avec dialux evo : 9.4lux

$$8.5\text{lux} = 100\%$$

$$9.4\text{lux} = X\%$$

$$X = (9.4 \times 100) / 8.5$$

$$X = 104\%$$

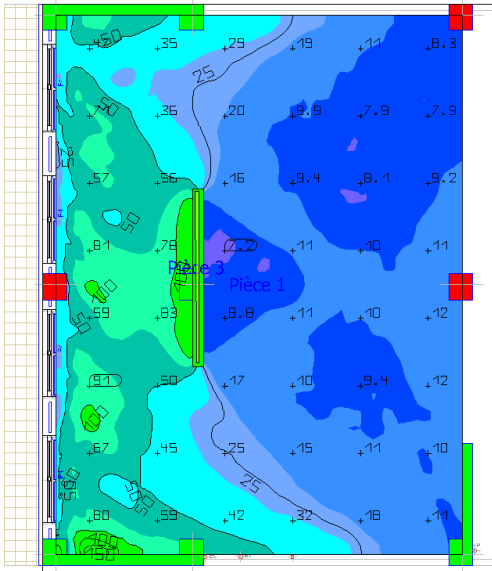
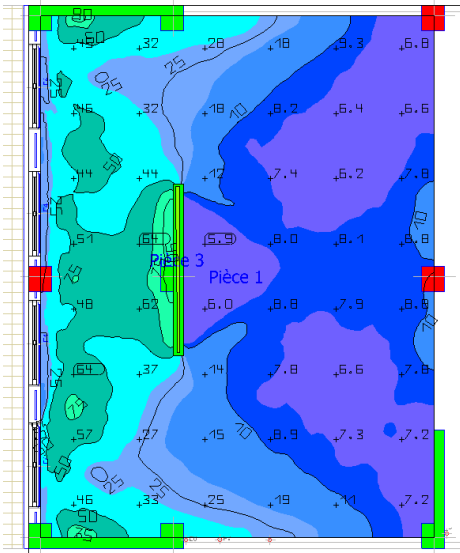
$$\text{Donc : } (104 - 100) = 4\%$$

À l'issue de ces calculs, il a été constaté que l'écart entre les résultats de la simulation et les mesures sur site est de 4 %. Par ailleurs, les courbes obtenues présentent des formes quasiment identiques selon les deux méthodes. Cette concordance nous permet de valider le modèle d'analyse et de poursuivre les simulations avec cet outil informatique pour les différents moments de l'année.

3.4 Analyse et interprétation des résultats des simulations

Après les mesures effectuées in situ et l'analyse des résultats obtenus, nous avons recours à la simulation numérique afin de compléter le travail empirique couvrant l'ensemble de l'année. Cette étape s'appuie sur l'utilisation du logiciel Dialux Evo, avec une analyse et une interprétation approfondies des résultats de la simulation.

3.4.1 Analyse et interprétation des résultats de 21 mars

heure	carte	interprétations
A9h		<p>Les simulations montrent que l'éclairement naturel à 9h au printemps est très insuffisant pour garantir un confort visuel acceptable. La majorité de la surface intérieure se situe dans des teintes bleu foncé à bleu clair, correspondant à des niveaux d'éclairement de 40 à 120 lux. Les zones proches des façades vitrées atteignent tout juste 150 lux, visibles en vert clair, mais cela reste ponctuel. Le voile architectural, constitue une barrière physique rigide qui bloque la lumière incidente dès son entrée, projetant une ombre continue sur toute la bande centrale. Cette ombre structurelle crée une cassure nette entre les zones exposées et celles en retrait, empêchant toute gradation ou diffusion progressive de la lumière. donc les espaces de vente en profondeur sont dans un état d'obscurité incompatible avec un usage fonctionnel,</p>
A12h		<p>À midi, malgré l'élévation du soleil, la lumière peine toujours à atteindre les espaces centraux. On note une extension des zones jaune clair et vert pâle, avec des éclairagements de 130 à 180 lux, mais cette amélioration reste concentrée dans l'axe des baies vitrées. Le voile, en position centrale, interrompt la propagation de la lumière vers l'arrière, projetant une zone d'ombre dense et statique sur une grande partie de la surface intérieure. Les zones derrière ce voile restent bleu foncées à violet, avec des valeurs inférieures à 80 lux, insuffisantes pour toute activité commerciale. Le déséquilibre visuel est flagrant : une moitié de l'espace est partiellement exploitable, l'autre reste dans l'obscurité.</p>

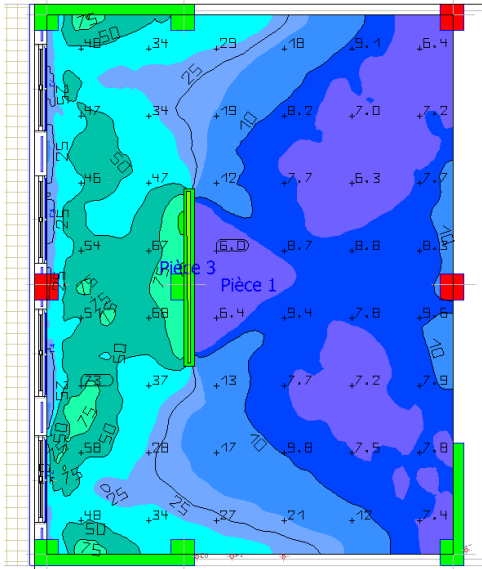
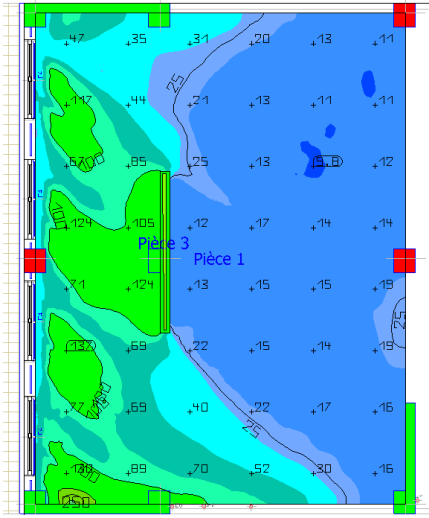
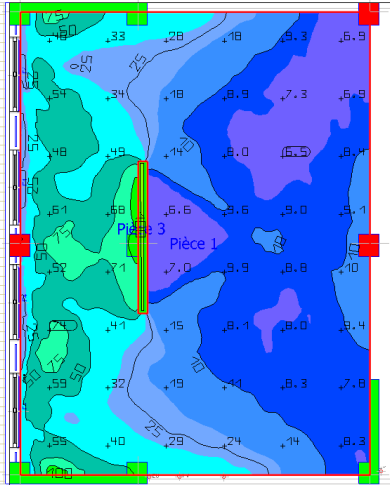
<p>A16h</p>		<p>En fin de journée, la lumière naturelle se déplace vers la façade ouest, mais l'impact du voile devient encore plus marqué. Il bloque complètement l'entrée de lumière rasante, accentuant les zones d'ombre sur toute la profondeur. On observe une majorité de bleu foncé à violet, équivalant à des éclairagements inférieurs à 60 lux. Les quelques bandes en vert clair (jusqu'à 160 lux) sont restreintes à l'extrême bord de la façade. Dans un espace commercial, cette configuration entraîne une situation d'inconfort visuel critique, avec une ambiance sombre, non homogène, et inappropriée pour le commerce de détail.</p>
--------------------	---	--

Tableau 6: Interprétation des résultats de simulation pour le 21mars

Source : auteur, avec dialux.2025

3.4.2 Analyse et interprétation des résultats de 21 juin

Heure	Carte	Interprétations
A9h		<p>Lors du solstice d'été, l'ensoleillement est nettement plus favorable en matinée, avec des zones exposées atteignant des niveaux d'éclairement compris entre 160 et 180 lux, visibles en vert pâle, notamment à proximité des vitrages. Toutefois, la présence constante du voile architectural génère une ombre importante au centre de l'espace, limitant considérablement la pénétration de la lumière naturelle vers l'intérieur. Cette zone ombragée se manifeste par des teintes allant du bleu clair au violet, correspondant à des valeurs maximales de 60 à 100 lux. Cette ombre statique, non compensée par des effets de réflexion ou de diffusion, rend près de la moitié de la surface inutilisable sans éclairage artificiel. Dans le contexte d'un espace commercial, cela nuit directement à la mise en valeur des produits, au confort visuel des usagers, et à la cohérence spatiale globale</p>
A12h		<p>Il s'agit du moment le plus lumineux de l'année. Les zones directement exposées peuvent approcher 190–200 lux, visibles en jaune clair et vert vif. Cependant, cet éclairage optimal reste confiné aux abords des façades vitrées. Le voile, rigide et mal positionné, interrompt brutalement le flux lumineux et crée un effet d'ombre durable sur les espaces centraux. Même à midi en été, des zones entières restent en bleu ou violet, avec des valeurs de 50 à 90 lux. Ce manque d'homogénéité rend l'ensemble du plan difficilement utilisable sans appui technique.</p>

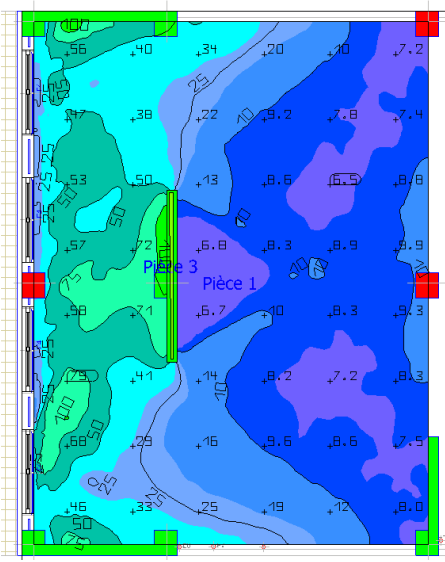
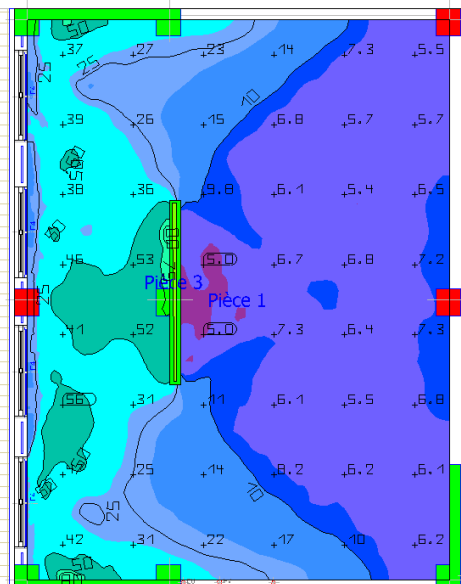
<p>A16h</p>		<p>En fin d'après-midi, la lumière naturelle se décale progressivement vers l'ouest, mais cette orientation favorable ne suffit pas à compenser les limitations architecturales existantes. Le voile structurel, toujours présent, projette une ombre latérale longue et dense qui s'étend sur les zones de circulation arrière et les espaces latéraux, empêchant toute pénétration efficace de la lumière dans la profondeur du bâtiment. Seules les zones situées immédiatement devant les vitrages de la façade ouest bénéficient d'un éclairage modéré, atteignant 150 à 170 lux, visibles sous forme de teintes vert pâle sur la carte. Cependant, ces apports lumineux restent très localisés et ponctuels. L'ensemble de l'espace central et arrière est dominé par des teintes bleu foncé à violet, indiquant des valeurs inférieures à 70 lux, insuffisantes pour répondre aux besoins visuels d'un espace de vente.</p>
--------------------	---	--

Tableau 7: Interprétation des résultats de simulation pour le 21 juin
Source : auteur, avec dialux.2025

3.4.3 Analyse et interprétation des résultats de 21 décembre

heure	carte	interprétations
<p>A9h</p>		<p>À 9h, l'éclairage naturel est à son niveau le plus faible de l'année. La carte de simulation est presque entièrement recouverte de teintes violettes à bleu foncé, indiquant des valeurs inférieures à 40 lux, voire parfois proches de 20 lux dans les zones les plus reculées. Le soleil, très bas sur l'horizon, ne dépasse même pas le voile architectural, qui agit ici comme une cloison visuelle imperméable à la lumière. Son ombre couvre l'intégralité des zones intérieures. Aucune partie de l'espace n'est naturellement utilisable sans apport lumineux externe. Cette configuration est inacceptable pour un espace public ou commercial.</p>

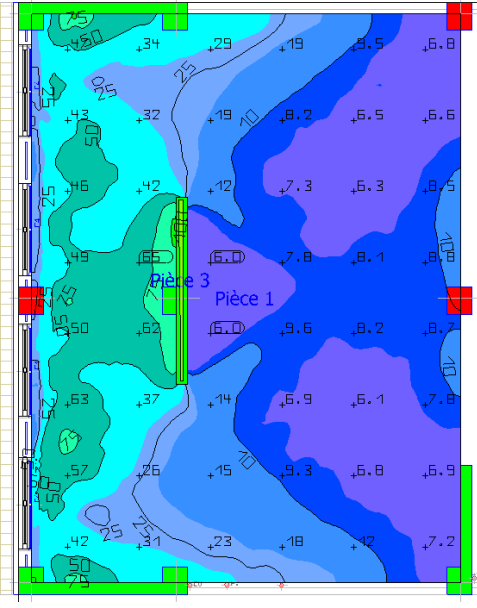
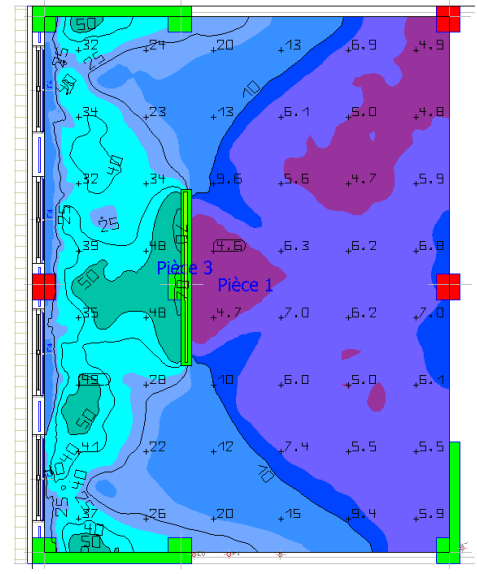
<p>A12h</p>		<p>À midi, malgré un ensoleillement plus direct, l'amélioration de l'éclairement reste marginale. Seules les zones immédiatement bordant les façades vitrées sud montrent des teintes bleu clair, correspondant à des niveaux compris entre 90 et 110 lux, encore loin des 200 lux exigés pour une ambiance visuelle confortable dans un environnement commercial. Au-delà de ces premiers mètres, la lumière est brutalement coupée par le voile architectural, qui empêche toute diffusion naturelle vers la profondeur du bâtiment. Cette ombre structurelle génère une fracture visuelle : les deux tiers du plan restent en bleu foncé à violet, avec des valeurs souvent inférieures à 70 lux. Le voile devient ici un élément de rupture fonctionnelle.</p>
<p>A16h</p>		<p>À 16h, la configuration lumineuse atteint son paroxysme négatif. La carte de simulation est quasiment entièrement violette, traduisant des niveaux inférieurs à 30 lux, soit une situation proche de l'obscurité. Le voile architectural, toujours visible en superstructure, masque totalement l'horizon lumineux : à ce moment de la journée et en cette saison, aucun rayon solaire n'entre plus dans le bâtiment. L'intérieur bascule alors dans une ambiance sombre, froide et sans relief, où les volumes se confondent, les textures disparaissent, et les repères spatiaux s'effacent. Le centre commercial, dans ces conditions, devient un espace sans vie, sans lisibilité, ni attractivité, incapable de fonctionner sans un dispositif d'éclairage artificiel parfaitement dimensionné.</p>

Tableau 8: Interprétation des résultats de simulation pour le 21 décembre
Source : auteur, avec dialux(2025)

Synthèse

Les simulations effectuées avec le logiciel Dialux Evo révèlent une situation extrêmement préoccupante en matière d'éclairage naturel. Aucun des neuf scénarios analysés couvrant les trois périodes clés de l'année (équinoxe, solstice d'été, solstice d'hiver) et trois horaires distincts (9h, 12h, 16h) n'offre un niveau d'éclairement suffisant, homogène et adapté aux exigences d'un centre commercial. La majorité des surfaces analysées présentent des valeurs d'éclairement comprises entre 40 et 150 lux, bien en dessous du seuil recommandé de 200 lux pour ce type d'espace. Cette insuffisance est particulièrement marquée dans les zones profondes et éloignées des façades vitrées, où la lumière chute brutalement, même aux heures de fort ensoleillement. Le voile architectural est un obstacle rigide et constant qui sépare les espaces, projette des ombres profondes et fixes, et empêche la diffusion naturelle de la lumière dans la profondeur des espaces. Ce dispositif accentue les contrastes lumineux extrêmes, crée une forte hétérogénéité dans la répartition de la lumière, et engendre un inconfort visuel généralisé. Dans cette configuration, le recours à l'éclairage artificiel ne relève plus d'un simple complément, mais devient une nécessité structurelle, imposée par les limites mêmes de la conception actuelle. Il est crucial de repenser les dispositifs architecturaux et techniques pour améliorer significativement la performance lumineuse naturelle des espaces intérieurs et garantir des conditions de confort adaptées à un usage commercial, c'est ce que ces constats mettent en évidence.

4 Recommandations pour l'amélioration de l'éclairage naturel

- Augmenter les surfaces vitrées pour maximiser l'entrée de lumière naturelle par les façades.
- Ajouter des puits de lumière ou lanterneaux pour apporter la lumière au cœur des espaces profonds.
- Utiliser des vitrages à haute transmission lumineuse pour favoriser l'entrée de lumière.
- Installer des dispositifs réfléchissants ou conduits de lumière afin de rediriger la lumière vers les zones sombres.
- Créer des atriums ou patios lumineux pour apporter de la lumière naturelle en profondeur et animer les espaces.
- Utiliser des matériaux intérieurs clairs et réfléchissants pour améliorer la diffusion de la lumière.
- Équiper les vitrages de films ou dispositifs diffusants pour répartir la lumière de

manière plus homogène.

- Réaliser une étude préalable détaillée des conditions climatiques du site avant toute implantation.
- Utiliser des logiciels de simulation dès la conception pour anticiper les contraintes et garantir un meilleur confort visuel.
- Prendre en compte l'implantation et l'orientation de l'aménagement intérieur pour éviter les ombres perturbant les plans de travail.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la ville de Bejaïa ainsi que le centre commercial Ritaj Mall, choisi comme cas d'étude représentatif en raison de ses caractéristiques architecturales et contextuelles. Nous avons ensuite détaillé la méthodologie adoptée, combinant mesures in situ et simulation numérique à l'aide du logiciel Dialux Evo, dans le but d'évaluer objectivement la qualité de l'éclairage naturel dans les espaces commerciaux. Les résultats issus des deux méthodes ont été comparés afin de valider la fiabilité du modèle de simulation. Par la suite, nous avons analysé les différentes configurations saisonnières et horaires pour évaluer les performances lumineuses sur toute l'année. Cette étude a révélé que les niveaux d'éclairement naturels restent largement insuffisants par rapport aux recommandations en vigueur pour les espaces commerciaux. En conclusion, des recommandations spécifiques et générales ont été formulées pour améliorer la qualité de la lumière naturelle dans ce type de bâtiment. Cette étape nous a permis de mieux comprendre les enjeux liés à la conception lumineuse et de souligner l'importance d'intégrer cette dimension dès les premières phases de tout projet architectural.

***Chapitre 04 : Application des résultats de
recherche dans le cadre du projet de fin
d'études***

Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous mettons en valeur les principaux volets de notre démarche de recherche et de conception. Nous débuterons par une présentation du site d'intervention, en en décrivant les caractéristiques majeures qui ont influencé nos choix conceptuels.

Nous poursuivrons avec une exposition détaillée de notre projet de fin d'études. Cette section comprendra la présentation du programme, accompagnée de schémas de principe et de structure. L'analyse englobera également l'idéation morphogénétique, les plans, organigrammes, volumes, ainsi que l'ensemble des éléments nécessaires à la compréhension du processus de conception.

Enfin, nous soumettrons notre projet à une analyse technique approfondie à l'aide du logiciel Dialux, afin de vérifier sa conformité avec les recommandations en vigueur et les normes réglementaires. Cette évaluation permettra de s'assurer que notre proposition répond aux exigences en matière de confort, de bien-être, et d'efficacité énergétique.

5 Le choix de projet de fin d'étude

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons examiné en détail les différentes stratégies visant à optimiser l'utilisation de la lumière naturelle dans les bâtiments à énergie zéro, en particulier dans le cadre des centres commerciaux. En se basant sur cette analyse, nous suggérons la création d'un centre commercial qui intègre les trois techniques d'optimisation de la lumière naturelle développées dans les chapitres précédents.

La lumière naturelle sera un élément central et structurant de notre approche architecturale. L'objectif est de concevoir des espaces commerciaux qui exploitent pleinement cette ressource pour favoriser à la fois le confort des usagers et la performance énergétique du bâtiment.

6 Analyse de site d'intervention

6.1 Choix de site

Notre site d'intervention « Sidi Ali Labhar » présente une nouvelle extension urbaine et une nouvelle centralité de la ville de Bejaia. Il se caractérise par une situation stratégique entre les cités résidentielle, l'aéroport Aban ramadan qui est la porte d'accueil aérienne pour cette ville qui offre un flux de passagers. L'existence des cités universitaires qui donne un flux important de population universitaire toutes ses conditions nous ont poussés à exploiter ce flux pour réaliser un centre commercial qui renforce l'aspect économique de cette ville.

6.2 Situation et présentation

Le terrain d'intervention se situe dans la willaya de Bejaia au milieu de Sidi Ali Labhar qui se situe sur la plaine côtière, à 4.9 Km au sud du centre ville de Bejaia près du dernier méandre de la Soummam, elle est limitée à : L'ouest et le nord par oued Soummam - l'est par la mer méditerranée et au sud par l'aéroport.

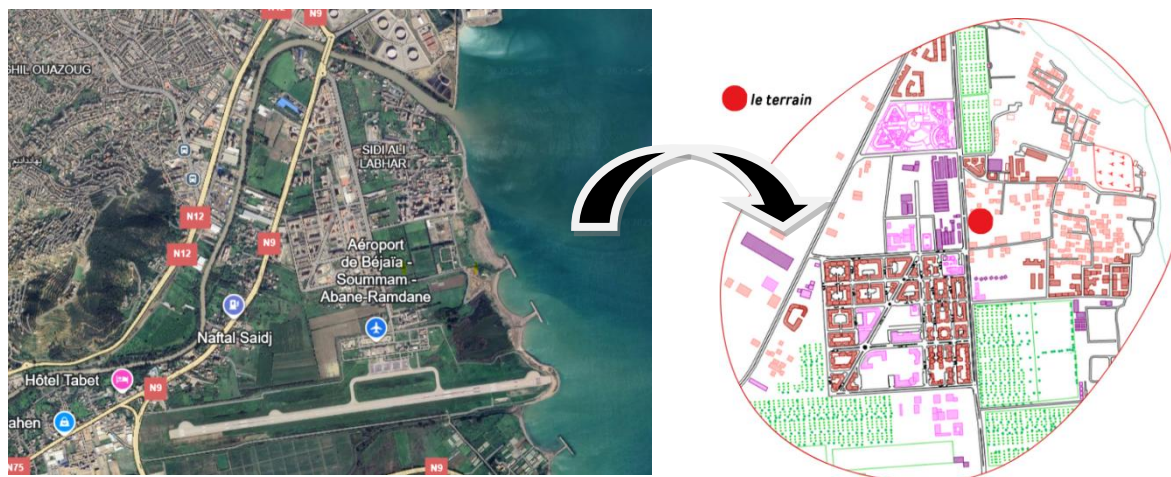


Figure 63: situation de sidi Ali Labhar
Source : auteur par google earth .2025

Le terrain située dans une partie plane ou la morphologie n'est pas remarquable veut dire une faible altitude. Le terrain d'une forme régulière rectangulaire.

6.3 Accessibilité

Le terrain est accessible par la route qui mène vers l'aéroport et par la route nationale RN09 qui est reliée avec une voie secondaire accessible au terrain.

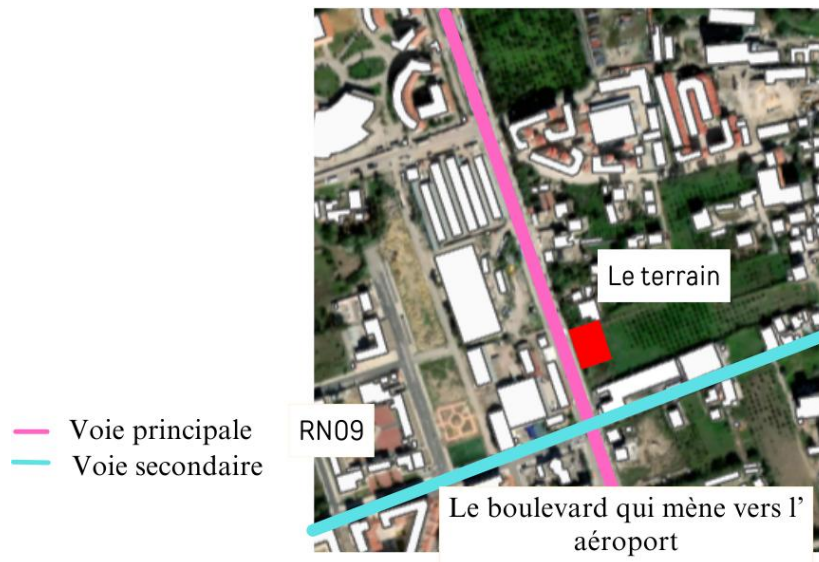


Figure 64:l'accessibilité de terrain
Source : auteur par google earth .2025

6.4 L'environnement immédiat

Le terrain se situe dans un environnement urbain dynamique et bien structuré. Il est entouré de commerces, ce qui renforce son potentiel en tant que futur pôle d'attractivité commerciale. À proximité immédiate, on trouve des logements collectifs et individuels, ce qui garantit une fréquentation régulière du site par une population locale variée. La présence d'une résidence universitaire à quelques pas ajoute une dimension jeune et active, tandis que la proximité d'équipements publics et de zones de stockage ou d'activités logistiques peut soutenir le bon fonctionnement du futur centre commercial. Cet ensemble offre un cadre favorable au développement d'un projet intégré, accessible et ancré dans son contexte.

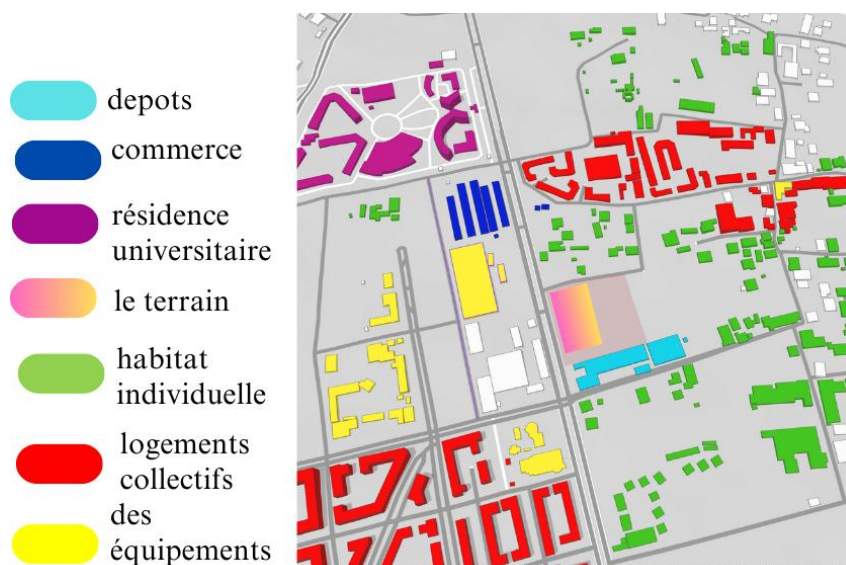


Figure 65:l'environnement immédiat de terrain
Source : auteur par autodesk .2025

6.5 Climatologie

6.5.1 Ensoleillement

Le terrain bénéficie d'un soleil constant tout au long de la journée, avec une durée d'exposition pouvant aller jusqu'à 10 heures par jour pendant les saisons printanière et estivale. Grâce à cette exposition idéale, la luminosité et le chauffage naturel sont favorisés. Durant l'hiver, le soleil baisse légèrement en raison de l'inclinaison et de la saison, mais reste tout de même suffisant pour maintenir un bon niveau de lumière naturelle sur le terrain.

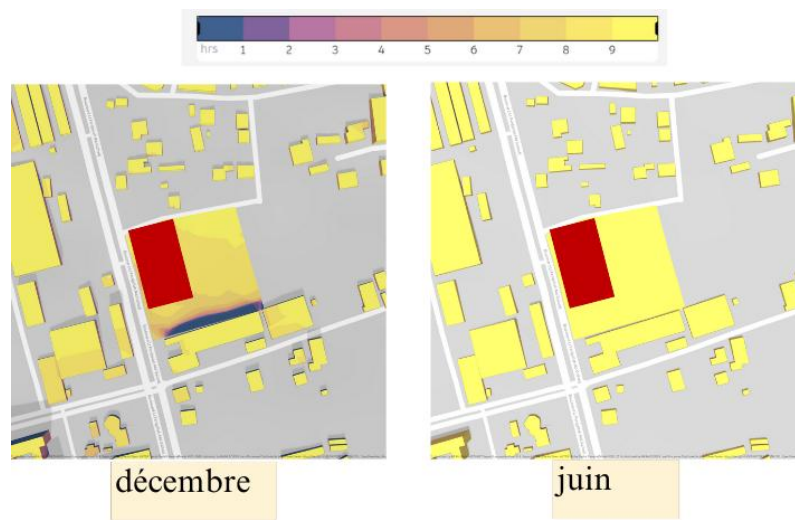


Figure 66:cartes d'ensoleillement

Source : auteur par autodesk .2025

6.5.2 Température

Les températures sur ce site sont typiquement méditerranéennes, avec des étés chauds et secs, et des hivers doux et humides. Les températures moyennes se situent entre 11 °C en décembre et 40 °C en août. Pendant la saison estivale, il est possible que les températures maximales atteignent 40 °C. En hiver, il fait plus doux, avec des températures allant de 8 °C à 15 °C, et des minimales qui se situent autour de 6 °C la nuit.

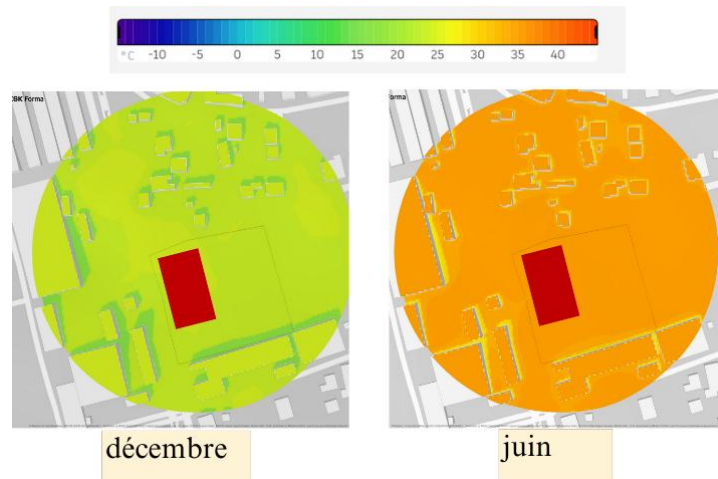


Figure 67: cartes des températures
Source : auteur par autodesk .2025

6.5.3 Les vents dominant:

Les vents dominants sur le site proviennent principalement de l'ouest, sud-ouest et nord-est, qui arrive jusqu'au 6m/s.

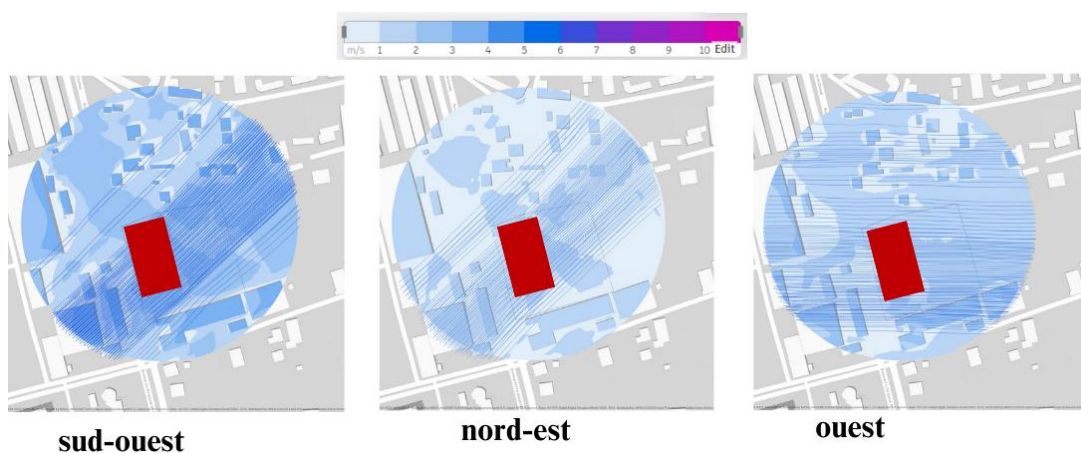


Figure 68: cartes des vents dominant
Source : auteur par autodesk .2025

6.6 Schéma de principe existant

L'analyse du site révèle un ensemble de caractéristiques favorables à l'implantation du projet. Le terrain bénéficie d'une excellente accessibilité grâce à sa position le long de voies à fort trafic, ce qui en fait un emplacement stratégique et attractif. Il profite également de vues panoramiques dégagées sur trois côtés, ouvrant sur des paysages naturels tels que la mer et des zones agricoles, apportant une qualité visuelle appréciable. Le site jouit d'un bon

ensoleillement, renforcé par l'absence de masques solaires, ainsi que de conditions climatiques favorables, avec des vents dominants provenant du sud-ouest, du sud et de l'est, permettant une ventilation naturelle efficace. Toutefois, la proximité de l'aéroport et des axes routiers engendre des nuisances sonores notables, un facteur qui devra être soigneusement pris en compte dans la conception architecturale et acoustique du projet.

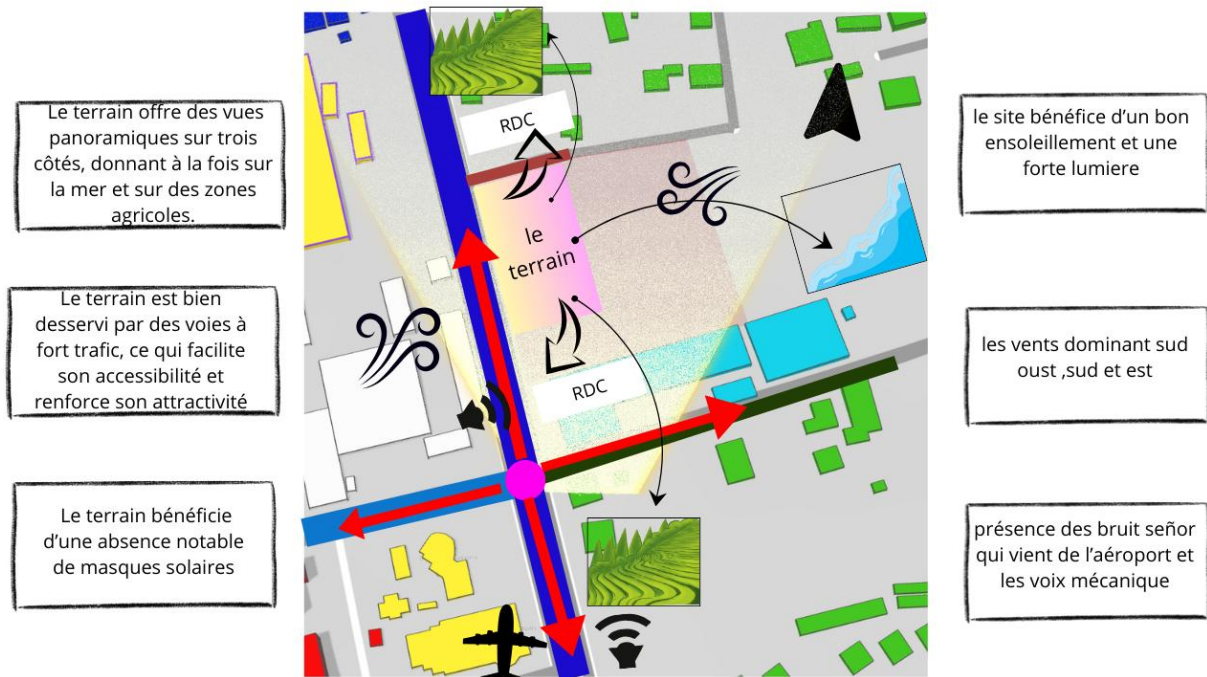


Figure 69: schéma de principe existant

Source : auteur par autodesk .2025

6.7 Schémas de principe proposé

À l'issue d'une analyse détaillée du site et de l'étude du schéma structurel existant, une première orientation conceptuelle du projet a été développée, en tenant compte des contraintes et atouts propres au terrain.

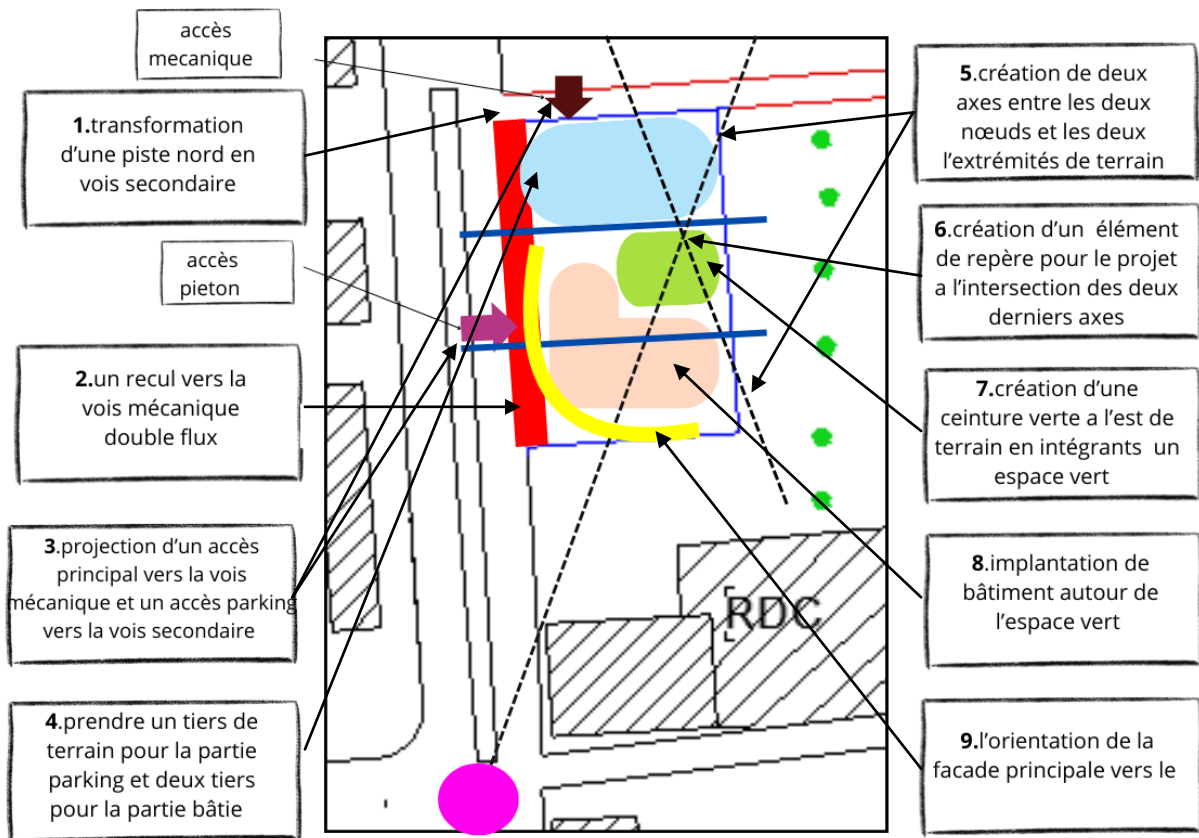


Figure 70: schéma de principe propose
Source : auteur par autodesk .2025

6.8 Les scenarios

Nous avons exploré trois scénarios majeurs, chacun analysé et affiné à chaque étape. Ce processus itératif a permis d'identifier les points à améliorer et de corriger les propositions. Ainsi, nous avons abouti à une configuration finale optimisée et alignée sur les objectifs du projet.

Chapitre 04 : Application des résultats de recherche dans le cadre du projet de fin d'études

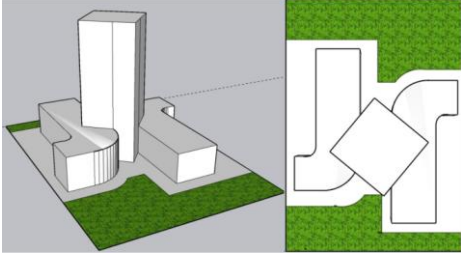
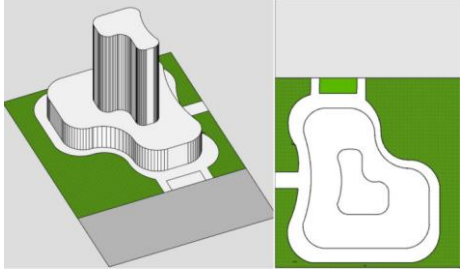

scenario :	photo	description
01		Le projet s'organise autour d'un élément central marquant, conçu pour identifier et structurer le bâtiment. Ce volume vertical, de forme cubique, s'élève au cœur de la composition. De part et d'autre, deux formes de base symétriques viennent renforcer l'équilibre architectural de l'ensemble. Le stationnement est prévu en sous-sol afin de libérer les espaces extérieurs. Ces derniers sont aménagés en espaces verts, contribuant à la qualité environnementale et au confort des usagers.
02		Le projet s'organise autour d'un élément central emblématique, pensé pour affirmer l'identité du bâtiment tout en offrant des vues panoramiques. Une partie de la parcelle est réservée au stationnement, tandis que des espaces verts entourent l'ensemble, favorisant une intégration paysagère harmonieuse. La forme bâtie adopte une approche organique, en parfaite cohérence avec le schéma structurel, permettant ainsi d'atténuer l'aspect cubique dominant du quartier de Sidi Ali Lebher et d'apporter une dynamique architecturale plus fluide et naturelle.
03		En reprenant le même principe que le deuxième scénario, ce projet intègre une dégradation progressive des niveaux sur le volume de base, permettant une meilleure insertion dans le site. Les toitures-terrasses sont végétalisées afin de renforcer l'aspect écologique et paysager. Le bâti s'élève sur pilotis, libérant le sol et favorisant la circulation de l'air ainsi que la perméabilité du site. Enfin, l'implantation d'arbres le long des voies mécaniques joue un rôle d'écran végétal, contribuant à atténuer les nuisances sonores.

Tableau 9:les scenarios proposés
Source : auteur.2025

6.9 Genèse du projet

On commence par poser une base rectangulaire, qui constitue l'ensemble de départ. Ensuite, ce rectangle est divisé en quatre parties distinctes, selon un découpage bien défini qui répartit l'espace en sous-sections. Une fois cette division effectuée, on procède à la soustraction d'une des quatre parties.

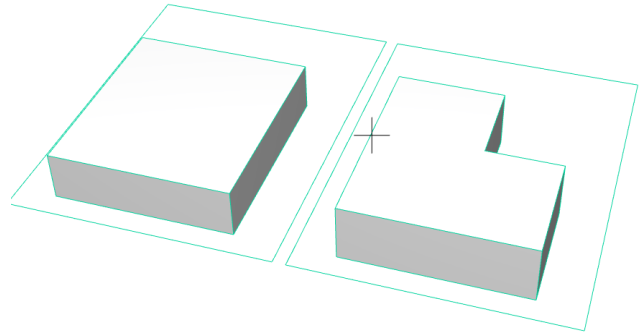


Figure 71: première étape de la genèse
Source : auteur par archicad.2025

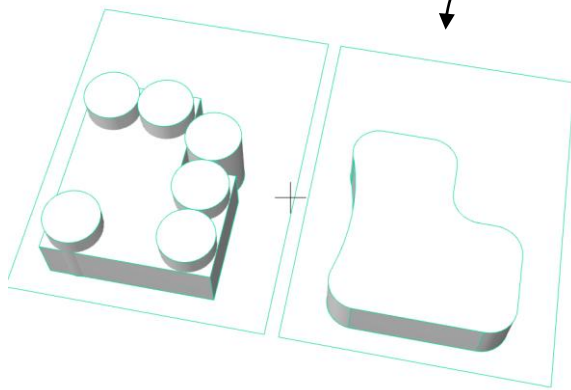


Figure 72: deuxième étape de la genèse
Source : auteur par archicad. 2025

Après avoir obtenu la forme composée de trois parties, on superpose un cercle sur chacun des coins restants de cette figure. Ensuite, on procède à la soustraction des parties qui dépassent lors de la superposition des cercles sur les coins, de façon à affiner les bords et harmoniser la silhouette. Par ailleurs, on trace la tangente entre deux cercles adjacents pour créer un effet courbé et fluide entre les zones circulaires.

Après avoir obtenu la forme de base, désormais fluide grâce aux cercles superposés et aux tangentes tracées entre eux, on procède à une dégradation en dupliquant cette forme deux fois. Chaque duplication subit une réduction progressive de taille, permettant de dégager des espaces ou terrasses autour de la structure initiale. Cette opération vise non seulement à alléger visuellement la composition, mais aussi à libérer des zones fonctionnelles.

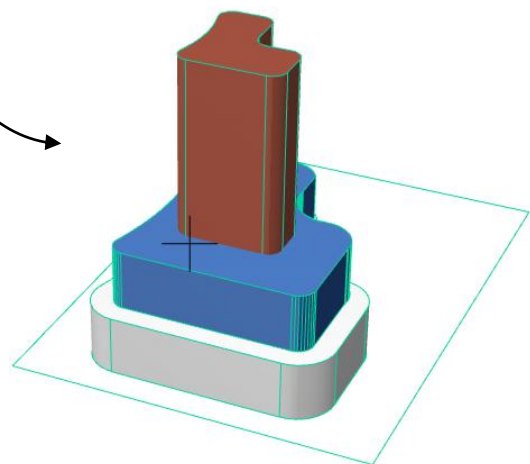


Figure 73: troisième étape de la genèse
Source : auteur par archicad. 2025

6.10 L'organigramme du projet

L'organigramme présente une organisation fluide où les différents espaces s'articulent autour de la circulation verticale, qui naît de l'intersection des deux accès principaux. Ce noyau central agit comme point de convergence, structurant la distribution des fonctions tout autour. À l'extérieur, le parking facilite l'arrivée des usagers, tandis que les espaces verts viennent enrichir et adoucir l'ensemble du projet.

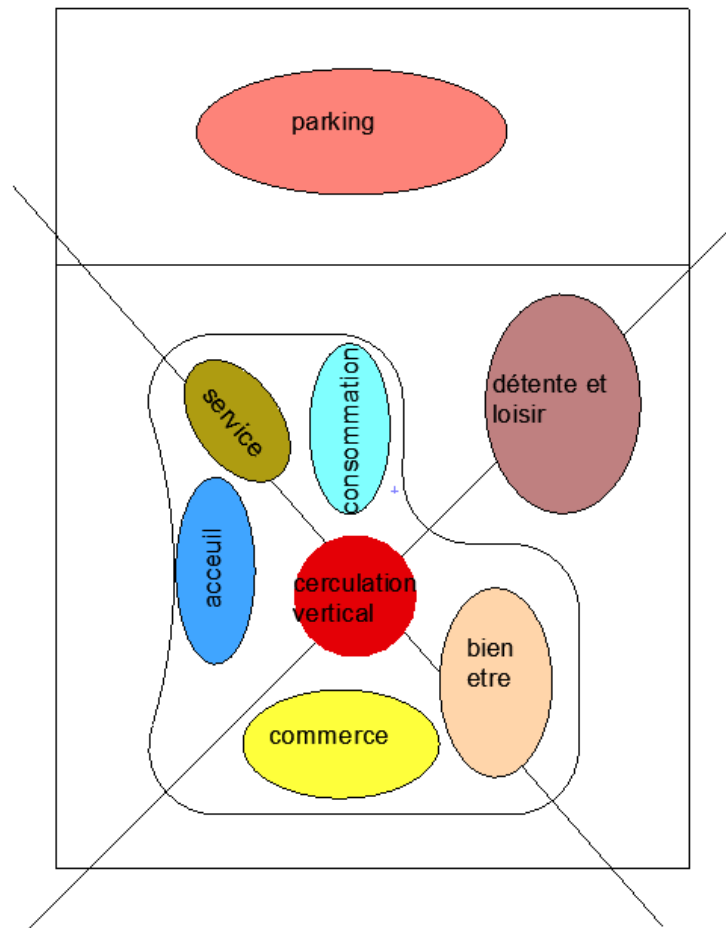


Figure 74: organigramme de centre commercial
Source : auteur par archicad (2025)

6.11 Plan de masse :



Figure 75: plan de masse de centre commercial

Source : auteur. 2025

7 L'intégration des trois stratégies analysées dans le cadre du projet de fin d'études

7.1 L'orientation

L'intégration des trois stratégies étudiées dans le projet de fin d'études s'est accompagnée d'une attention particulière portée à l'orientation des façades principales vers le sud et le sud-ouest, afin de maximiser la captation de la lumière naturelle tout au long de la journée. Cette orientation permet de bénéficier d'un ensoleillement vif, stable et prolongé, idéal pour les espaces d'un centre commercial nécessitant un éclairage abondant, tels que les zones de vente, ou les vitrines. Dans cette optique, un effort a été fait afin de l'ouvrir au minimum vers une orientation favorable, tout en évitant une exposition exclusive au nord sans

dispositif compensatoire, dans le but d'améliorer le confort visuel, de réduire la dépendance à l'éclairage artificiel et de valoriser l'expérience utilisateur au sein du bâtiment.

7.2 Les ouvertures

Afin de tirer pleinement parti de la lumière naturelle en journée, et sur la base des recherches approfondies menées tout au long de notre projet, nous avons veillé à optimiser l'éclairage naturel dans notre conception architecturale. Dans cette optique, nous avons décidé d'intégrer des murs-rideaux sur l'ensemble des façades du centre commercial, s'étendant du rez-de-chaussée jusqu'au R+9. Cette solution nous permet de capter un maximum de lumière naturelle à tous les niveaux du bâtiment.



Figure 76: façade du centre commercial
Source : auteur.2025

L'orientation des espaces a été minutieusement étudiée pour garantir que chaque zone bénéficie, au cours de la journée, d'un certain apport lumineux naturel. L'idée étant que, quelle que soit l'heure, chaque espace profite d'une durée minimale d'éclairage naturel, en fonction de son exposition.



Figure 77: façade du centre commercial
Source : auteur.2025

Cependant, l'utilisation extensive des murs-rideaux peut entraîner des problématiques liées à l'éblouissement. Pour y remédier, nous avons mis en place, sur certaines façades, un système de double peau incluant des dispositifs de protection solaire tels que des brise-soleil fixes ou orientables. Ces éléments permettent non seulement de filtrer la lumière, réduisant ainsi l'éblouissement, mais aussi de maintenir une bonne qualité de lumière diffuse à l'intérieur des espaces, tout en contribuant à la performance énergétique globale du bâtiment.



Figure 78: les dispositifs de la double peau
Source : auteur.2025

Ainsi, notre approche concilie confort visuel, efficacité énergétique et valorisation de la lumière naturelle, tout en offrant une enveloppe architecturale contemporaine et dynamique.

7.3 Les matériaux de contrôle solaire

Nous avons opté pour des murs-rideaux à double vitrage, mais avec une particularité qui représente l'intégration d'un film de redirection lumineuse entre les deux vitrages. Ce film permet de capter la lumière naturelle incidente et de la rediriger vers l'intérieur du bâtiment, notamment vers les zones plus profondes qui, habituellement, reçoivent peu d'éclairage naturel. Grâce à ce système, nous améliorons la diffusion de la lumière dans les espaces commerciaux tout en limitant le recours à l'éclairage artificiel en journée.

Cette solution présente également un double avantage : elle réduit les effets d'éblouissement liés aux grandes surfaces vitrées et contribue à une meilleure performance énergétique du bâtiment. C'est une approche qui combine efficacité lumineuse, confort visuel et durabilité,² tout en renforçant l'identité architecturale moderne et technologique du projet.

8 Vérification de la pertinence de la conception de notre projet architectural

Afin d'évaluer la quantité de lumière naturelle apportée au sein du rez-de-chaussée de notre projet de fin d'études, nous avons réalisé une simulation du niveau d'éclairement. Cette analyse a été effectuée durant les trois périodes les plus défavorables de l'année (le 21 mars, le 21 septembre et le 21 décembre), sous un ciel dégagé. Ceci est effectué pour vérifier l'efficacité de l'organisation des espaces et des éléments architecturaux en termes de confort visuel.

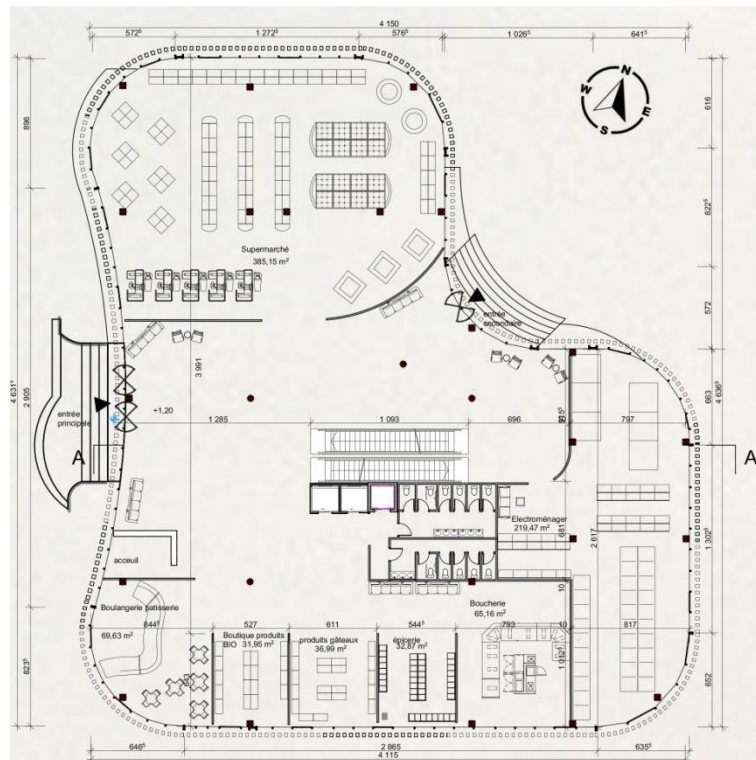


Figure 79: plan de RDC
Source : auteur.2025

8.1 Résultats obtenus pour le 21 Mars/septembre :

A9h : La carte de 9h au printemps/automne montre une large dominance de beige (1000 lux) et orange clair (2000lux) sur les façades est et sud-est, avec quelques zones rouge et gris (+5000 lux) vers les vitrines sud profondes et ouest. À cette heure, le soleil commence à bien frapper les surfaces vitrées du mur-rideau, surtout en façade ouest. Les zones commerciales en façade sont idéalement éclairées pour la mise en valeur des vitrines. Les espaces plus centraux du centre commercial restent eux aussi largement supérieurs au seuil de 200 lux, ce qui permet une autonomie lumineuse totale. Aucun recours à l'éclairage artificiel n'est nécessaire, et le confort visuel reste acceptable. (Voir annexe 01)

A12h : La carte de midi montre une nette montée en intensité avec la présence généralisée de beige (1000 lux), d'orange clair (2000 lux) au centre, et de rouge (5000 lux) sur les nord nord-est. Le soleil étant zénithal et percutant directement les façades vitrées, la lumière pénètre profondément dans les zones commerciales. L'éclairement naturel est excessif par endroits, notamment près des vitrines ou dans les circulations exposées directement. Le confort visuel peut être compromis, avec un risque d'éblouissement important. (Voir annexe 01)

A16h : À 16h, la lumière se décale nettement vers les façades est, où dominant du rouge (5000 lux) et du gris en zone de baie vitrée directe, voire l'orange clair (2000 lux), l'orange

foncé (3000 lux). Les espaces sud-ouest reçoivent une lumière rasante intense, mettant en valeur les vitrines, mais aussi posant un risque d'éblouissement pour les clients et usagers. Les zones profondes reçoivent encore suffisamment de lumière (1000 lux minimum), ce qui maintient une excellente autonomie lumineuse. Toutefois, le confort visuel en fin de journée peut être compromis sans gestion de l'ensoleillement direct. (Voir annexe 01)

8.2 Résultats obtenus pour le 21 Juin

A9h : Dès 9h, la carte d'été affiche déjà des couleurs élevées : jaune, beige, et de nombreuses zones orange clair à orange foncé, allant jusqu'à 3000 lux. L'inclinaison estivale du soleil permet une large couverture lumineuse, touchant aussi bien les vitrines ouest que les zones profondes via le mur-rideau continu. L'ensemble des zones commerciales est suréclairé, bien au-dessus du besoin fonctionnel, ce qui garantit l'autonomie mais exige une stratégie de protection. La lumière naturelle est très valorisable. (Voir annexe 02)

A12h : À midi, la carte atteint des sommets : on observe massivement de l'orange foncé (3000 lux), du rouge (5000 lux), du rouge clair (7500 lux), voire du rose (10000 lux) et du gris sur les toitures vitrées ou murs-rideaux exposés au sud sud-ouest. C'est un cas clair de sur-éclairage généralisé. Toute la surface du centre commercial est éclairée bien au-delà des exigences fonctionnelles, et cela peut devenir problématique sans protections. Les vitrines exposées sud et ouest risquent un éblouissement sévère. (Voir annexe 02)

A16h : À 16h, la lumière reste intense sur les façades est, avec des valeurs dominées par l'orange foncé (3000 lux), le rouge foncé (5000 lux), et quelques taches rouge clair. Le soleil, encore haut, projette sa lumière directement à l'horizontale sur le mur-rideau ouest, provoquant des lumières rasantes puissantes. Les espaces commerciaux en façade ouest peuvent en tirer un bénéfice visuel fort (attractivité, visibilité), mais également subir un inconfort sans protections solaires. Les espaces profonds restent eux aussi éclairés largement au-dessus de 200 lux, assurant une autonomie lumineuse totale jusqu'en fin de journée. (Voir annexe 02)

8.3 Résultats obtenus pour le 21 Décembre

A9h : La carte du matin en hiver montre une lumière plus faible mais encore élevée pour la saison : principalement jaune (750 lux) et beige (1000 lux) sur les zones sud-est. Cela indique que même en hiver, les espaces directement en façade sud-est bénéficient d'une lumière suffisante, et souvent bien supérieure au seuil de confort visuel. Les zones profondes sont moins éclairées mais toujours au-dessus de 200 lux. (Voir annexe 03)

A12h : À midi, les cartes hivernales affichent une montée en intensité : beige, orange clair, voire orange foncé sont visibles sur les façades sud. Cela indique une bonne performance du mur-rideau pour capter un maximum de lumière malgré la faible hauteur du soleil. Les zones profondes restent bien éclairées, notamment par la lumière rasante sud, qui pénètre loin dans les galeries. Autonomie lumineuse élevée, mais plus contrastée qu'en été. (Voir annexe 03)

A16h : La carte de 16h en hiver indique un éclairage naturel encore suprêmement efficace, avec du jaune (750 lux) et du beige (1000 lux) bien répartis sur les façades ouest et jusque dans les zones centrales. Malgré un soleil très bas sur l'horizon, la lumière rasante en fin d'après-midi pénètre largement grâce au mur-rideau périphérique, particulièrement à l'ouest et au sud-ouest. Cette orientation permet à la lumière d'atteindre non seulement les vitrines mais aussi les galeries centrales, assurant ainsi un niveau de lumière supérieur au seuil requis de 200 lux. L'autonomie lumineuse est donc pleine et suffisante à cette heure, et aucun appoint d'éclairage artificiel n'est nécessaire, même en profondeur. (Voir annexe 03)

Synthèse :

L'interprétation des neuf cartes d'éclairement naturel réalisées pour le centre commercial met en évidence une performance lumineuse remarquable sur l'ensemble des saisons, des heures de la journée et des orientations. Le mur-rideau en façade continue sur 360° permet à l'édifice de capter efficacement la lumière naturelle dès le lever du soleil et jusqu'à la fin de la journée, quelles que soient les conditions météorologiques. Les valeurs observées sur les cartes commencent à 750 lux (jaune) et s'étendent jusqu'à 15 000 lux (gris clair), ce qui indique que toutes les zones représentées bénéficient d'un éclairage largement supérieur au seuil minimal de 200 lux requis pour les espaces commerciaux. Que ce soit à 9h, 12h ou 16h, en mars/septembre, juin ou décembre, tous les espaces, vitrines, galeries périphériques, zones centrales et circulations, sont bien éclairés naturellement. Même en hiver

à 16h, moment où la lumière est généralement critique, l'éclairement reste suffisant dans les galeries centrales grâce à la lumière rasante de la façade ouest, assurant une autonomie lumineuse totale sans recours à l'éclairage artificiel. Le confort visuel est donc globalement excellent, mais en été les cartes révèlent des niveaux pouvant atteindre jusqu'au 10 000 lux dans certaines zones exposées, notamment en façade sud et ouest. Un risque réel d'éblouissement, d'inconfort visuel et thermique pour les utilisateurs est provoqué par ces excès de lumière, en particulier en fin de matinée et en après-midi. Afin d'assurer une qualité d'utilisation optimale et de protéger les produits exposés, il est crucial de mettre en place des dispositifs de gestion solaire comme des brise-soleil, des stores intérieurs ou des vitrages à contrôle solaire. Pour résumer, le projet offre une autonomie lumineuse exceptionnelle toute l'année, mais nécessite des mesures de régulation pendant l'été pour contrôler les excès et maintenir un équilibre entre performance lumineuse, confort visuel et efficacité énergétique.

Afin de réduire, voire d'éliminer l'éblouissement, une solution a été mise en œuvre dans notre projet : l'intégration d'une double peau ainsi que de brise-soleil. Pour évaluer la pertinence de cette solution, une seconde simulation sera réalisée en tenant compte des brise-soleil. En raison du manque de temps, cette simulation portera uniquement sur un espace représentatif.

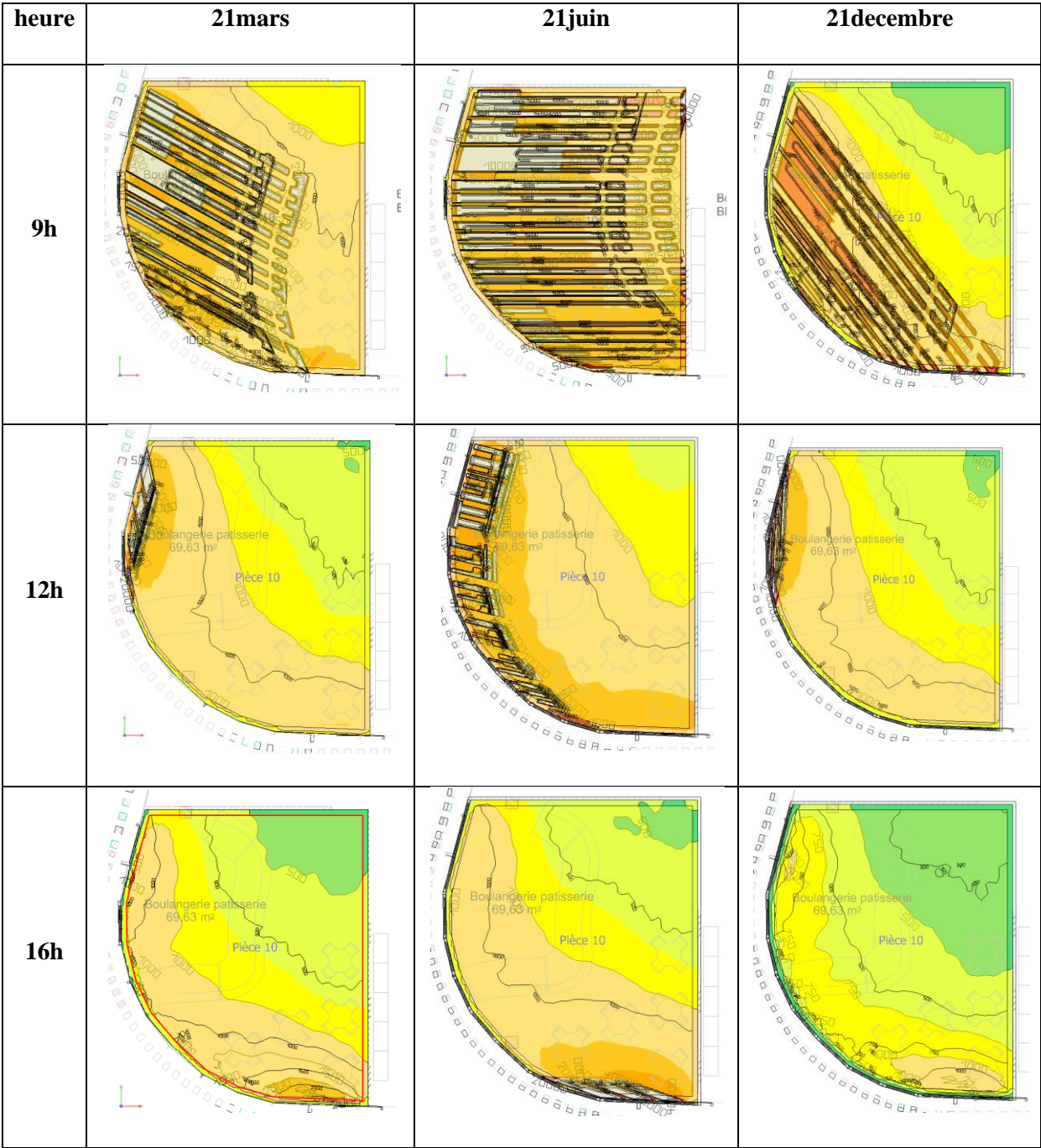


Tableau 10:résultats de simulation d'un espace avec brise solaire.

Source : auteur, avec dialux.2025

Dans le cadre de la simulation d'éclairage naturel réalisée avec DIALux Evo pour notre centre commercial, les cartes correspondant aux dates clés du 21 mars, 21 juin et 21 décembre, à des horaires spécifiques (9h, 12h, 16h), permettent une lecture détaillée de

l'impact des brise-soleil sur la qualité de l'éclairage intérieur. L'interprétation de ces cartes montre que les brise-soleil remplissent pleinement leur fonction de modération de la lumière :

- au printemps et en automne (21 mars), ils assurent un éclairage équilibré et diffus dans les espaces intérieurs, évitant les pics de lumière directe tout en maintenant une clarté suffisante.
- En été (21 juin), où le soleil est au zénith, les brise-soleil filtrent efficacement la lumière intense, réduisant les zones surexposées et les éblouissements, comme le confirme la carte de 12h qui montre un éclairage bien réparti malgré un fort ensoleillement extérieur.
- En hiver (21 décembre), lorsque le soleil est bas sur l'horizon, les protections laissent passer davantage de lumière, ce qui est souhaitable, et permettent un éclairage naturel plus profond, surtout en matinée et en fin d'après-midi

La comparaison avec la simulation initiale sans brise-soleil révèle une nette amélioration : les zones autrefois surexposées sont désormais mieux contrôlées, les contrastes lumineux sont atténués, et les éblouissements quasi éliminés. Bien que les niveaux d'éclairage mesurés restent en dessous de la valeur de référence de 200 lux recommandée pour un centre commercial, ils demeurent suffisants pour assurer une bonne visibilité et un confort visuel acceptable sans recourir à l'éclairage artificiel. La lecture conjointe des cartes précédentes montre une répartition plus homogène de la lumière naturelle dans l'espace, traduisant l'efficacité des dispositifs de protection solaire dans une logique de conception bioclimatique et de qualité d'usage.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude complète du site afin de définir les conditions optimales pour l'implantation du projet. Sur cette base, un programme surfacique architectural et urbain cohérent a été élaboré, en lien avec les caractéristiques physiques, fonctionnelles et contextuelles du lieu. Une analyse approfondie du site a permis de guider les choix conceptuels en vue de concevoir un centre commercial à la fois fonctionnel, adapté à son environnement et répondant aux attentes des usagers. Ce processus a été structuré en plusieurs étapes, allant de l'idée initiale et du scénario de base jusqu'aux plans, volumétries et organigrammes. Enfin, une simulation d'éclairement naturel a été réalisée afin de vérifier que l'ensemble des espaces du centre commercial bénéficie d'un apport suffisant en lumière naturelle, condition essentielle au confort visuel, à la valorisation commerciale et à l'efficacité énergétique du projet.

Conclusion générale

Dans un contexte où le secteur du bâtiment est l'un des plus grands consommateurs d'énergie dans le monde, la recherche de solutions durables s'impose comme une priorité absolue. Le concept d'habitat à énergie zéro est né de cette urgence : un habitat capable de produire autant d'énergie qu'il en consomme sur une base annuelle, notamment grâce à des stratégies de réduction de la demande énergétique, à l'utilisation des énergies renouvelables et à une conception architecturale bioclimatique. Parmi ces stratégies, on peut trouver l'exploitation de la lumière naturelle qui occupe une place centrale. Non seulement elle permet de limiter l'usage de l'éclairage artificiel, mais aussi, elle contribue à améliorer le confort visuel, la qualité des espaces intérieurs et ainsi que le bien-être des usagers. L'architecture contemporaine ne peut donc pas ignorer l'importance de la lumière dans la conception des espaces. En effet, notre travail s'inscrit dans cette optique pour étudier l'impact de la lumière naturelle sur l'efficacité énergétique des habitats à énergie zéro, en explorant les enjeux et les stratégies architecturales adaptées.

Dans notre travail de recherche nous avons focalisé notre intérêt sur la recherche des solutions qui permettent de maximiser **l'utilisation de la lumière naturelle dans les bâtiments à énergie zéro, tout en garantissant un confort visuel optimal et en limitant les pertes énergétiques liées à une mauvaise gestion de la lumière. Cette question principale de recherche traduit la nécessité de conjuguer** des exigences techniques, environnementales et humaines, dans le cas où les bâtiments sont appelés à répondre aux standards de la durabilité énergétique.

L'hypothèse avancée repose sur l'idée que l'orientation optimale des bâtiments, la conception rigoureuse des ouvertures, ainsi que l'usage de matériaux innovants de contrôle permettrait de maximiser l'éclairage naturel tout en minimisant les risques d'éblouissement et les déperditions énergétiques. Ces choix devraient ainsi contribuer à une meilleure efficacité énergétique globale du bâtiment, tout en assurant un confort visuel et thermique satisfaisant. L'interrogation exprime la nécessité de comprendre la relation entre l'orientation du bâtiment, les dimensions des ouvertures, et le choix des matériaux de contrôle solaire, pour maîtriser les apports lumineux et thermiques.

Afin de confirmer cette hypothèse, une méthodologie rigoureuse alliant une approche théorique et une approche empirique a été mise en œuvre. Celle-ci a mis en lumière un état de l'art permettant de poser les fondations conceptuelles de l'étude. Cette étape a permis d'approfondir les notions essentielles liées au confort visuel, à l'orientation optimale des

bâtiments, à la conception des ouvertures et aux matériaux de contrôle solaire, dans le contexte particulier des bâtiments à énergie zéro.

Par la suite, une approche empirique a été exploitée en faisant appel à des mesures in situ de l'éclairement naturel à l'aide de l'appareil de luxmètre. L'objectif était de recueillir des données réelles sur les performances lumineuses des espaces étudiés. Ces données ont été complétées par des simulations numériques avec le logiciel Dialux Evo. Elles ont permis l'analyse de la répartition et la qualité de la lumière naturelle en fonction de différentes orientations et configurations architecturales.

Enfin, l'ensemble de ces analyses a été appliqué et vérifié dans le cadre d'un projet architectural de fin d'études portant sur un centre commercial à énergie zéro. Cette application a permis de tester la pertinence des stratégies d'orientation, de traitement des ouvertures et de choix des matériaux dans une logique de performance énergétique et de confort visuel durable. Ce croisement entre la théorie, l'expérimentation et la conception a ainsi permis de valider la méthodologie et d'enrichir les résultats de l'étude.

Ce travail traite trois axes importants dans l'optimisation de la lumière naturelle à savoir : l'orientation, les ouvertures et les matériaux de contrôle solaire.

- ***L'orientation*** : constitue un paramètre déterminant, car elle conditionne l'intensité et la durée d'exposition des espaces intérieurs à la lumière naturelle. Une orientation stratégique permet de maximiser les apports solaires passifs, assurant par conséquent un bon niveau d'éclairement naturel stable.
- ***La conception des ouvertures*** : La position, la taille et la répartition de ces ouvertures dans les façades sont essentielles pour garantir une distribution homogène de la lumière dans les différentes zones du bâtiment. Si elles sont bien pensées, l'efficacité de l'éclairage et la réduction de la dépendance à l'éclairage artificiel sont des avantages bien réussis.
- ***Le choix des matériaux de contrôle solaire*** : ceci représente un levier important pour la gestion des apports lumineux et thermiques. Ils sont utilisés sur la façade ou en éléments de protection et permettent de moduler l'intensité de la lumière entrant dans le bâtiment. Ceci est assuré en fonction de la saison et de l'orientation, pour éviter les phénomènes d'éblouissement et les surchauffes.

Ces trois approches permettent de concilier efficacité énergétique et confort visuel, en plaçant la lumière naturelle au cœur de la conception architecturale durable.

Les résultats issus de cette approche intégrée confirment pleinement l'hypothèse initiale : une conception architecturale rigoureuse, centrée sur la maîtrise de la lumière

Conclusion générale

naturelle, peut significativement contribuer à la réduction de la consommation énergétique d'un bâtiment tout en assurant un haut niveau de confort visuel pour ses occupants.

La lumière naturelle quant elle bien exploitée devient un vecteur de l'efficacité énergétique et permettent d'assurer un confort visuel optimal.

En synthèse, notre travail a mis en évidence que la combinaison d'une orientation optimisée, des ouvertures adaptées avec protections solaires, et de matériaux innovants de contrôle lumineux constitue une stratégie efficace pour répondre aux exigences des bâtiments à énergie zéro. Cette approche permet d'améliorer le confort visuel des occupants, de valoriser l'expérience utilisateur et de réduire la consommation énergétique liée à l'éclairage.

Finalement, la lumière naturelle représente un des piliers de l'architecture durable. Malgré son abondance, mais elle nécessite une gestion fine et stratégique. Dans une perspective de transition énergétique, elle est considérée comme une ressource inestimable, à condition qu'elle soit exploitée avec rigueur et créativité.

Ce travail de recherche a permis de démontrer que la lumière naturelle, bien intégrée dans une démarche architecturale consciente, peut transformer un bâtiment en un espace économe, confortable et profondément humain.

Bibliographie

1. 3M Science .Appleid to life. (2016). *Éclairage naturel*.
2. Aboina, G. T. (2020). *Etude du confort et de gestion d'un ensemble hétérogène de dispositif de collecte, de stockage et distribution d'énergie renouvelable pour l'habitat* [Doctorat]. Ecole Doctorale SIE-UPE.
3. Atik-Mehaoued, K. (2019). *Impact des bâtiments de verre réfléchissant sur le microclimat urbain et la consommation énergétique Cas de la saison estivale à Alger*. [Doctorat]. Université Mohamed Khider – Biskra.
4. Belkhir, H. (2022). *Optimisation de la consommation énergétique d'un habitat saharien par des techniques passives* [Doctorat]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
5. Benharkat, S. (2005). *Impact de l'éclairage naturel zénithal sur le confort visuel dans les salles de classe cas d'étude : Bloc des lettres de l'université Mentouri Constantine* [Memoire de magistere]. Universite Mentouri.Constantine.
6. Benharra, H. (2016). *Impact de l'orientation sur la consommation énergétique dans le bâtiment. -Cas des zones arides et chaudes-*. [Magister]. Université Mohamed Khider – Biskra.
7. Bernard PAULE & Marc FONTOYNONT. (1988). *Maitrise de l'eclairage naturel dans le projet architectural* (Rapport de recherche No. 536/88). Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports.
8. Boudoukha, A. (2015). *Analyse de la Symbiose environnement lumineux et qualité architecturale dans le secteur résidentiel. Cas de la cité des 426 lots El Eulma, Sétif*. [Magister]. Université Mohamed Khider – Biskra.
9. Boursas, A. (2012). *Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation a l'aide d'un logiciel de simulation* [Memoire de magistere]. Constantine01.

10. Cárcel Carrasco, J., Peñalvo López, E., Albiol Ibáñez, J. R., & Gandía Romero, J. M. (2021). *Efficacité énergétique et construction durable* (1^{re} éd.). Editorial Científica 3Ciencias. <https://doi.org/10.17993/IngyTec.2021.74>
11. CDDP DE L'HERAULT. (2009). *Architecture et lumière*. 102.
12. CEREFE: la consommation énergétique nationale a augmenté de 59% en dix ans. (s. d.). Consulté 24 décembre 2024, à l'adresse <https://www.aps.dz/economie/117116-cerefe-la-consommation-energetique-nationale-a-augmente-de-59-en-dix-ans>
13. Chateau, T. (1880). *Technologie du bâtiment : Ou, Étude complète des matériaux de toute espèce employés dans les constructions depuis leur fondation jusques et y compris leur décoration*. Ducher et Cie.
14. Compagnie des libraires associés. (1752). *Dictionnaire universel françois et latin, contenant la signification et la definition tant des mots de l'une & de l'autre langue ... Tome premier (-septieme) : D-F* (Numéro vol. 3). <https://books.google.dz/books?id=N43cNWmmHvwC>
15. Corentin, H., & Magali, B. (2012). *Formations METRICS Module 3 – Modélisation et simulation de la lumière naturelle au moyen de DIALux*.
16. Cyril, C. (2004). *Caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle application à l'éclairage des bâtiments* [Doctorat]. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
17. Dachelet, M. (2007). *Aménagement du territoire, urbanisme, architecture...plus durables ?* (Mardaga, Vols. 1-66). Editions Mardaga.
18. Daich, S. (2011). *La lumière naturelle dans le bâtiment* [Doctorat]. Université Mohamed Khider – Biskra.
19. Ferradji, K. (2017). *Évaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l'habitat* [Magister]. Université Mohamed Khider – Biskra.

20. Ghedamsi, R. (2018). *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie* [Doctorat]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
21. Gif lumière. (2018). *Le guide de l'éclairage naturel zénithal pour les bâtiments industriels, commerciaux et tertiaires*.
22. Gressier, J. (2010). *Introduction à la Simulation Numérique*.
23. Harzallah, A. (2023). Le rôle du soleil dans le remodelage des formes architecturales et urbaines pendant la période hygiéniste en France. *Diacronie. Studi di Storia Contemporanea*, 54. URL: <
http://www.studistorici.com/2023/06/29/harzallah_numero_54/ >
24. Hirt, M. A., & Crisinel, M. (2005). *Conception des charpentes métalliques*. EPFL Press.
25. Imene, S. (2023). *Lumière et Vue sur l'extérieure : 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*. [Doctorat]. Biskra – Khider Mohamed U.
26. James, S. (2004). *Entreprises Vertes : Une Introduction Complète Avec Des Études De Cas* (Dr. Samuel Inbaraja S). Dr. Samuel Inbaraja S.
27. Khaoula, L. (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* [Doctorat]. Université Mohamed Khider – Biskra.
28. Kingspan Light + Air. (2023). *Avantages de l'éclairage naturel* (p. 10).
29. Lacheheb, S. (2013). *Étude expérimentale de l'impact de la baie et de la composante réfléchie interne sur l'environnement lumineux intérieur cas des mosquées algériennes* [Magister]. Université Mohamed Kheider – Biskra.
30. l'arene Île-de-France. (2014). *L'éclairage naturel*. guide_bio_tech_.
31. Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Patio - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 24 janvier 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/patio/58668>

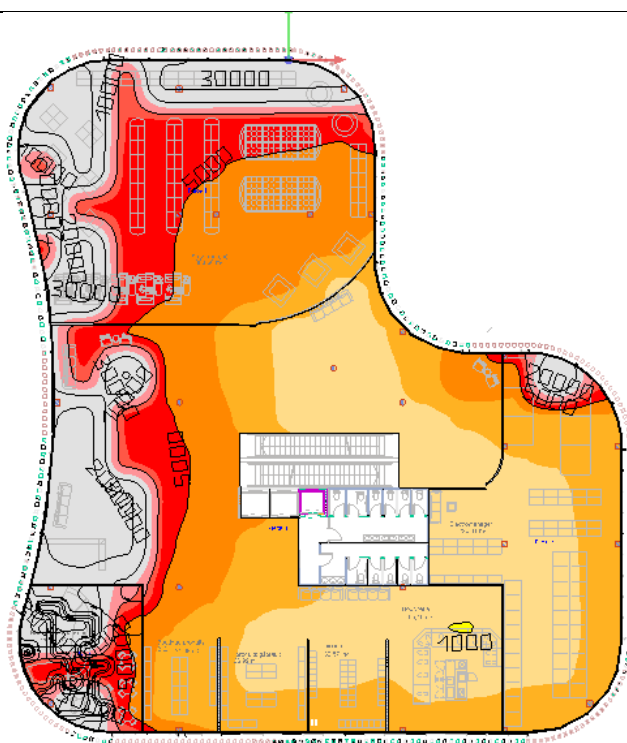
32. *Lux Meter / PDF / Lighting / Electromagnetic Radiation*. (s. d.). Consulté 7 juin 2025, à l'adresse <https://fr.scribd.com/document/455956043/LUX-METER-docx>
33. Maamari, F. (2004). *La simulation numérique de l'éclairage, limites et potentialités* [Doctorat]. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
34. Makhloufi, A. W. (2023). *L'utilisation de la méthode 'cost-optimality' dans la conception d'un bâtiment collectif à net zéro énergie sous des scénarios futurs de changement climatique en Algérie*. [Doctorat]. Université de Constantine 3.
35. Matallah, Z. (2016). *Étude des effets de l'orientation sur le confort visuel dans les salles de cours avec éclairage naturel latéral. Cas des salles de classe de l'université de Laghouat* [Magistère]. Université Mohamed Kheider – Biskra.
36. MEM. (2021). *Bilan énergétique 2021* (p. 48). Ministère de l'énergie et de Mines.
37. Mokhnache, N. (2023). *Impact de l'enveloppe du bâtiment sur son efficacité énergétique cas des lotissements Guelma* [These de DOCTORAT]. Université 8 Mai 1945 Guelma.
38. Olgyay, V. (2015). *Design with Climate : Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition*. Princeton University Press.
39. Pineault, N. (2009). *EFFETS DES TYPES DE VITRAGE SUR LA QUALITÉ DE L'ÉCLAIRAGE NATUREL Étude expérimentale à l'aide d'une maquette à échelle réduite d'une salle de séjour*. UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.
40. Rahmouni, S. (2020). *Evaluation et Amélioration Énergétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Énergétique* [Doctorat]. Université Mostepha Ben Boulaid- Batna 2.
41. Reiter, S., & Herde, A. D. (2004). *L'éclairage naturel des bâtiments*. Presses univ. de Louvain.
42. Ruchmann, J. (s. d.). *Les vitrages : Laissez entrer la lumière !* [Rapport de stage]. École Normale Supérieure.

43. Sabry, F. (2022). *Zero Energy Building : Total utility energy consumed equal to total renewable energy produced* (Vol. 28). One Billion Knowledgeable.
44. Semahi, S. (2013). *Contribution méthodologique a la conception des logements a haute performance énergétique (hpe) en Algérie* [Magister]. École polytechniques d'architecture et d'urbanisme EPAU.
45. Terrier. et Vandevyver, C. et B. (1999). *L'éclairage naturel, fiche pratique de sécurité* (No. 82; p. 4).
46. Zekraoui, D. (2017). *L'impact de l'ouverture de la façade sur la consommation de l'énergie dans les bâtiments à usage de bureau sous un climat chaud et sec.* [Magister]. Université Mohamed Khider - Biskra.
47. Zemmouri, malika. (2010). *Caractérisation et optimisation de la lumière naturelle en milieu urbain* [Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat Science]. FERHAT ABBAS-SETIF.

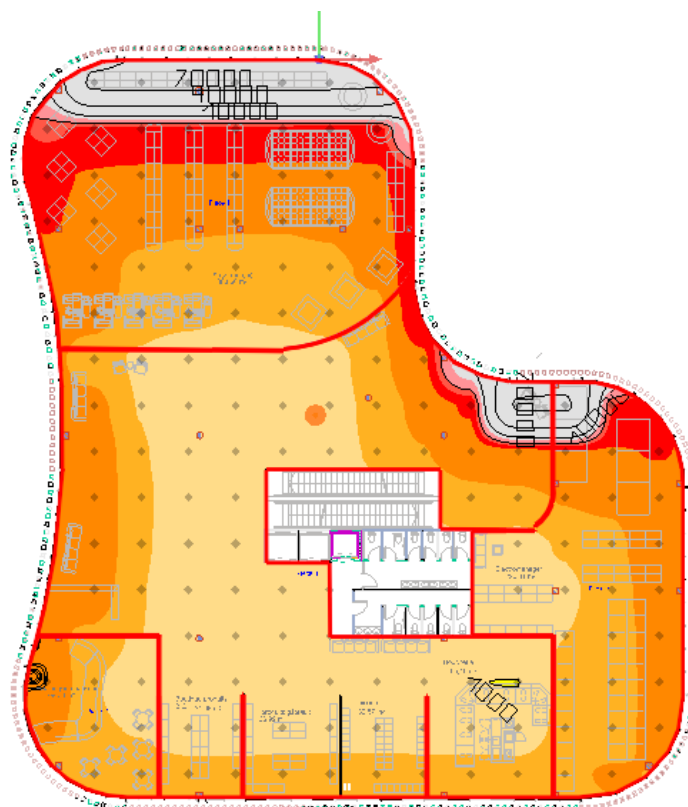
Annexes

Annexe 01 : résultats de simulation du PFE le 21 mars

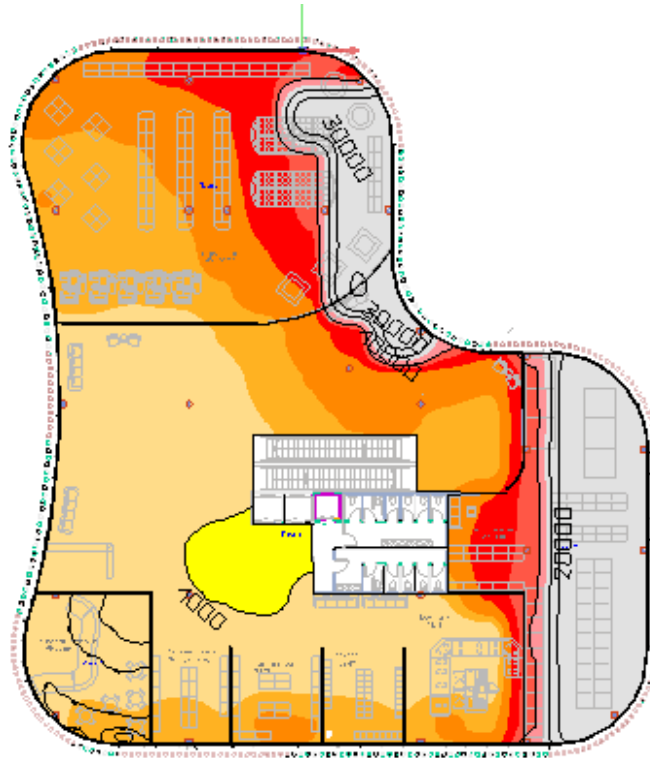
A9h



A12h

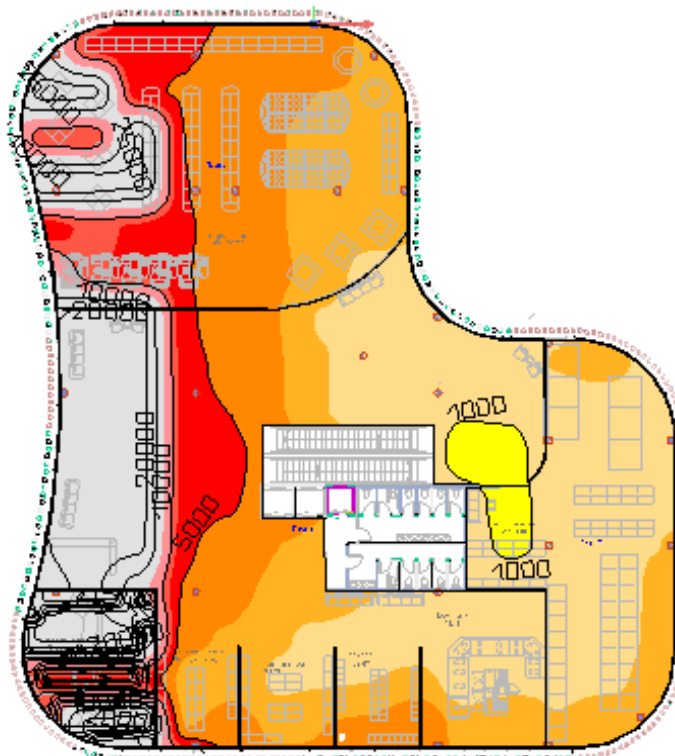


A16h

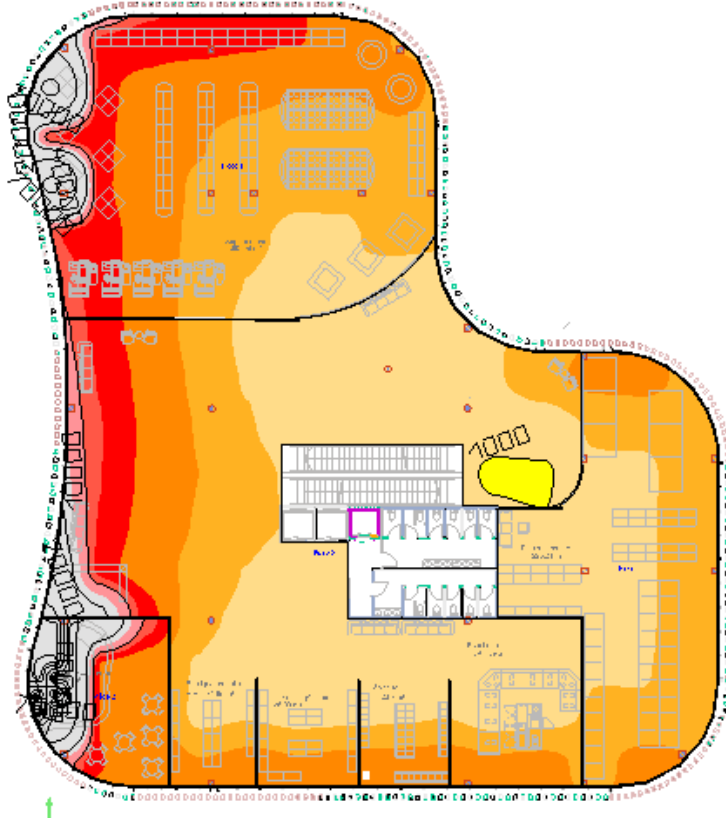


Annexe 02 : résultats de simulation du PFE le 21 juin

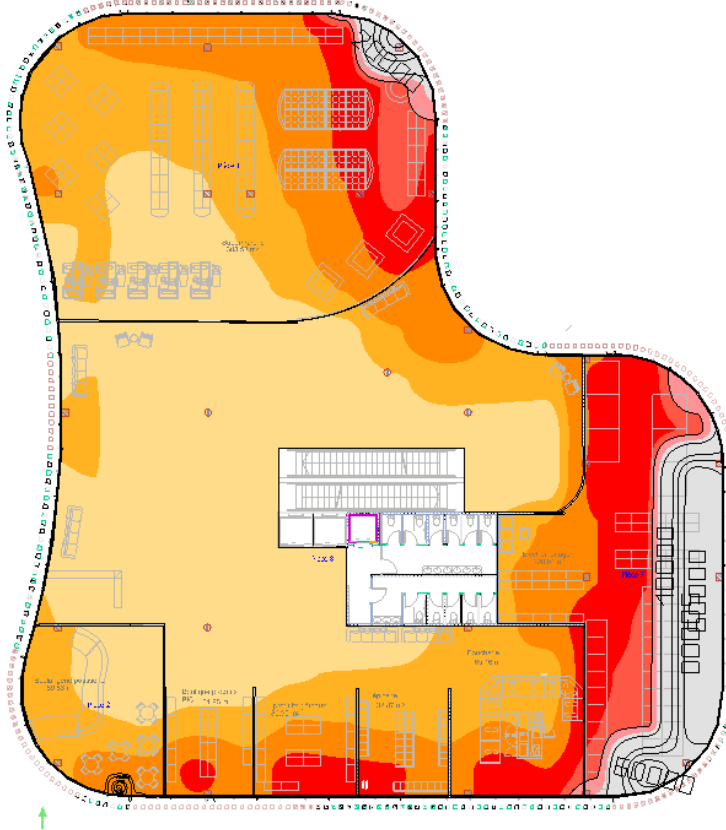
A9h



A12h

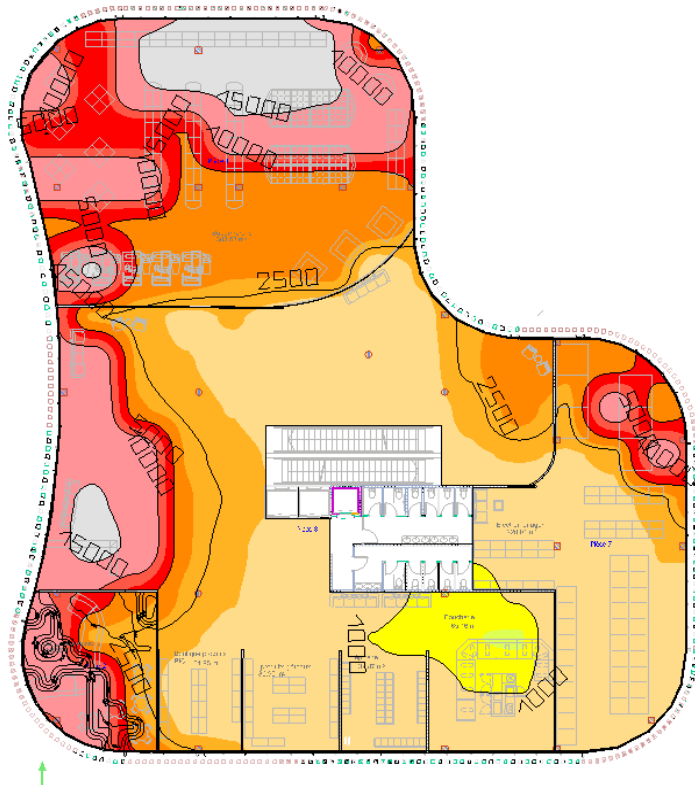


A16h

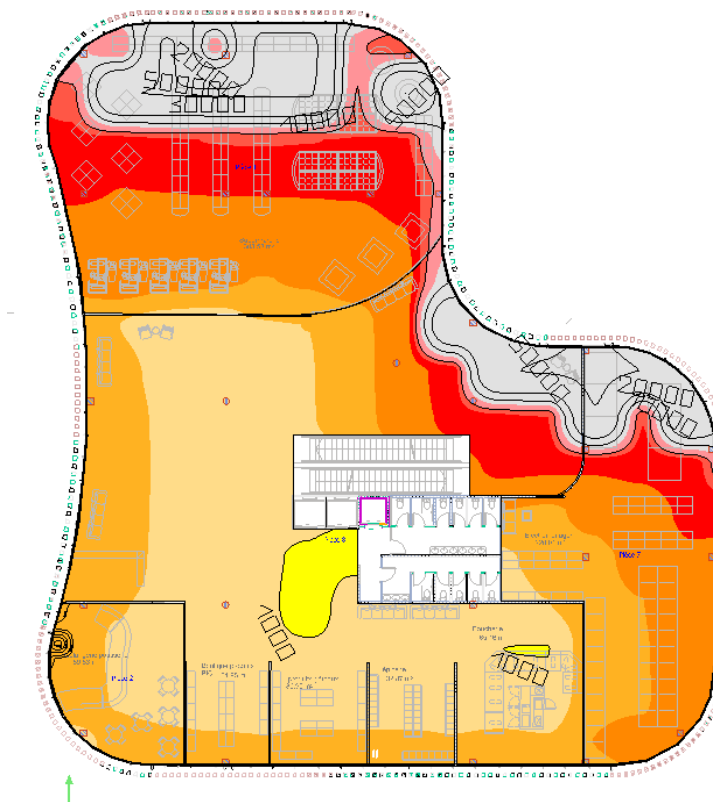


Annexe 03 : résultats de simulation du PFE le 21 décembre

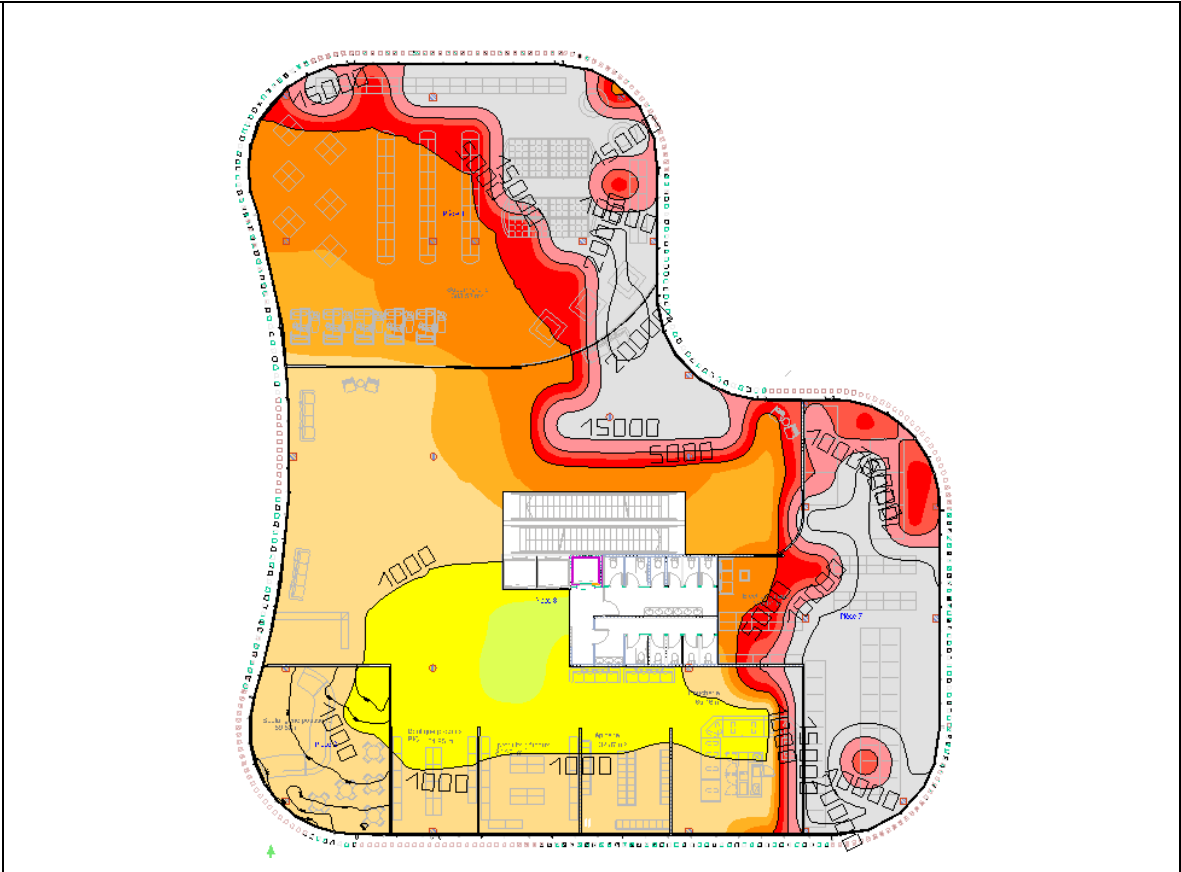
A9h



A12h



A16h



Annexes

Annexe 04 : programme de centre commercial

Entités	Sous-entités	Espace	nom bre	S unitai re m ²	S totale m ²
commerce	Vestimentaire	Boutique de marque	5	100	500
		Boutique vêtements femme	3	80	240
		Boutique vêtements homme	3	80	240
		Boutique article bébé	1	100	100
		Boutique chausseur	2	80	160
		Boutique lingerie	1	60	60
		Boutique de sacs	1	60	60
	souvenir	Boutique cadeau	1	50	50
		Fleuriste	1	40	40
		Livres	1	40	40
	Electroménage r	Boutique électroménager	1	300	300
	Luxe	Boutique bijoux accessoire	1	60	60
		Cosmétique de luxe	1	100	100
	Ameublement	Boutique meuble et décoration	1	200	200
		Lustre et miroir	1	100	100
		Boutique tapisserie et matelas	1	100	100
	Cosmétique et parfumerie	Cosmétique	1	60	60
		Boutique parfumerie	1	40	40
	hypermarché	Boulangerie	1	40	40
		Pâtisserie	1	40	40
		Supermarché		350	350
		Boucherie	1	50	50
		Boutiques des produits BIO	1	30	30
		magasin de fournitures produits gâteaux et emballage	1	30	30

Annexes

consommation	Restauration rapide	Cafeteria	1	80	80
		Fastfood	1	60	60
	Restauration long	Restaurant	1	200	200
Bien être	Beauté et esthétique	Salon de coiffeur homme	1	80	80
		Salon de coiffeur femme	1	80	80
		Salon de beauté et soin	1	60	60
Services	Photographier		1	40	40
	Agence immobilier		1	40	40
	Pharmacie		1	60	60
	Agence de voyage		1	30	30
Gestion	Administration	Bureau directeur	1	25	25
		Secrétariat	1	16	16
		Bureau financière	1	16	16
Détente et loisir	Détente et Loisir	Salle de jeux	1	200	200
		Jeux de billard	1	120	120
		Jeux vidéo	1	120	120
annexes	Stockage				
	Circulation				1000
	Locaux techniques				60
	Sanitaire				
Surface totale					5280 m ²