

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département :.....
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم:.....
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister

Spécialité ou option :Architecture, Formes, Ambiances et développement durable

**Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques,
Cas de la ville de Biskra.**

Présenté par :
DAICH Safa

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Dr. MAAZOUZ Saïd.	Professeur.	Président.	université de Biskra.
Dr. Zemmouri Nouredine.	M C.	Directeur de mémoire	université de Biskra.
Dr. SAFFEDINE, Rouag Djamila	Professeur.	examinateur	université de Constantine
Dr. BELAKHAL Azzedine.	M C.	examinateur	université de Biskra
Dr. MOUMI Abdelhafid	M C.	examinateur	université de Biskra

"Nous n'héritons pas la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants"
Antoine De Saint Exupéry.

Introduction générale

La demande d'un environnement durable et en particulier l'architecture durable est omniprésente. Il est bien connu que le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie dans le monde : plus de 40% par rapport aux autres secteurs (industrie 28%, transport 32%). La véritable consommation de ces énergies fossiles conduit à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane, etc... et par conséquent, le réchauffement de la planète. Les projections des modèles climatiques présentées dans le dernier rapport du Giec indiquent que la température de la surface du globe est susceptible d'augmenter de 1,1 à 6,4 °C supplémentaires au cours du 21^{ème} siècle et une élévation additionnelle de niveau de la mer de 0,1 à 0,25 mètres d'ici 2100. Ces conséquences vont déséquilibrer l'écosystème terrestre. L'homme est donc le responsable principal de cette catastrophe environnementale, à cause de sa mauvaise compréhension et sa mauvaise gestion de cet environnement fragile. A partir de 1980, l'union internationale sur la conservation de la nature a publié un rapport titré "La Stratégie Mondiale sur la Conservation de la Nature" ou apparut pour la première fois la notion de développement durable. Au delà, plusieurs notions et démarches ont été fondées, comme l'architecture solaire, l'architecture écologique, LEED, la haute qualité environnementale (HQE) notamment avec ces quatorze cibles qui essaient de traiter les problèmes qui touchent l'environnement, le bâtiment et le confort de l'occupant. L'objectif principal de ces démarches converge vers la durabilité de l'environnement et du bâtiment et pour les rendre sains tout en assurant une vie confortable pour les occupants.

Donc, le remplacement d'une énergie fossile devenue incertaine pour assurer la pérennité des ressources naturelle est inévitable. Le recours aux énergies renouvelables comme le solaire, l'hydraulique, la géothermie, etc..., été une solution idéale pour réduire l'utilisation des énergies fossiles dans le bâtiment. Il existe plusieurs techniques permettant l'exploitation de cette énergie propre et principalement l'énergie solaire dans le but de préserver l'occupant et l'environnement. Actuellement, l'éclairage naturel des bâtiments est devenu un objectif recherché par les architectes. L'étude quantitative et qualitative de la lumière permet de maintenir l'occupant dans une situation de confort visuel, ce qui améliore la productivité du

travail, de créer des ambiances lumineuses particulières et de réduire considérablement la consommation d'énergie électrique dans le bâtiment. Pour atteindre cet objectif, des light pipes, des light shelves, des conduits de lumière et d'autres techniques d'éclairage naturel ont été créées et intégrées dans le bâtiment et sont devenues des éléments de conception architecturale. Ces systèmes ont montré leurs capacités à augmenter la pénétration de la lumière en réduisant la consommation d'électricité. Dans notre recherche, nous proposerons l'étude de l'un de ces systèmes, connu pour sa large utilisation par les architectes et qui est le système "*light shelf*".

L'impact de l'énergie solaire sur l'environnement construit est considérable. Pour cela, nous ne pouvons pas parler d'une conception d'un système d'éclairage sans recourir à un autre facteur qui a une grande influence sur la quantité et la qualité de lumière que reçoit le bâtiment. Mais le climat avec ses caractéristiques lumineuses a un effet prépondérant sur l'environnement lumineux intérieur. Le climat est un facteur naturel qui varie d'une région à une autre, chaque région est caractérisée par un climat lumineux particulier qui dépendra de la variabilité importante de l'état du ciel (variabilité sur une journée, fluctuations saisonnières, changements selon le lieu géographique...etc.). Pour cette raison, le climat doit être fondamentalement étudié avant de choisir le ou les systèmes d'éclairage. Les bâtiments dans les climats chauds sont généralement conçus pour bloquer le rayonnement solaire, les fenêtres sont ombragées ou supprimées parfois, ce qui empêche également la lumière du jour de pénétrer à l'intérieur laissant l'espace sombre et inconfortable et l'utilisation de l'éclairage artificiel devient nécessaire. Dans les climats froids, une stratégie complètement différente est adoptée selon des programmes nouveaux. Sous ces latitudes, on a tendance à essayer d'optimiser le potentiel lumineux naturel tout en préservant les conditions de confort thermique, aéraulique, etc... De par sa position géographique, le Sahara algérien constitue un des plus importants gisements solaires et lumineux au monde. Si toute cette énergie était mise en valeur, cela constituerait une source d'énergie très importante qui peut être exploitée dans le bâtiment pour couvrir les besoins de confort thermique et lumineux de l'occupant.

Problématique

Notre travail a pour périmètre de recherche la ville de Biskra ; cette ville se trouve au nord du grand sahara Algérien. Elle est caractérisée par un gisement solaire et lumineux très important

mais aussi par un climat très extrême surtout en été (climat chaud et sec). L'architecture de l'ancienne ville de Biskra est caractérisée par des bâtiments compacts avec des ouvertures réduites et hautes. Cette stratégie a assuré aux occupants un confort thermique pendant l'été mais elle a réduit considérablement le confort visuel intérieur. Le bâtiment devient obscur pendant le jour, ce qui oblige les occupants à utiliser d'autres moyens d'éclairage pour assurer un niveau d'éclairement acceptable. Après l'indépendance, la ville a connu de nouvelles extensions avec de nouvelles conceptions et avec peu de considération pour le confort thermique et visuel. Cette nouvelle approche consiste à ouvrir plus le bâtiment à l'extérieur. L'apport solaire excessif provoque des phénomènes de surchauffe thermique durant l'été en plus du vieillissement de certains matériaux en raison de la grande quantité de rayon ultra-violets admis. Cet excès de lumière peut provoquer l'éblouissement et l'inconfort visuel des usagers qui ont recours à des solutions radicales pour remédier à ce type de problème.

Par sa position géographique, la ville de Biskra a un grand gisement solaire et lumineux ainsi qu'une disponibilité plus au moins uniforme d'énergie durant toute l'année. Mais pour des raisons de confort, cette énergie est exclue par divers dispositifs d'occultation, tels que les brises soleil, les stores, etc... et nous recourons à l'utilisation de l'électricité pour assurer le niveau d'éclairement requis. La protection excessive du soleil, crée des contrastes et des éblouissements qui conduisent à la fatigue visuelle et gênent les utilisateurs de l'espace et par conséquent, réduisent aussi la productivité et le bien être. Il est important de s'interroger sur la manière qui permet de réguler la pénétration des apports solaires dans le bâtiment, de manière à conjuguer une meilleure qualité de confort visuel qui s'adapte à la sensibilité de l'œil humain avec des économies d'énergie substantielles en termes d'électricité pendant le jour. Il faudra ainsi créer un équilibre entre éclairage naturel et artificiel tout en tenant compte du confort thermique.

Alors, peut-on apporter la lumière naturelle au fond de l'espace architectural par l'introduction d'un système light shelf et jusqu'à quelle profondeur l'espace sera-t-il bien éclairé? Quelles sont les configurations du système light shelf qui sont adéquates pour la ville de Biskra? Et comment profiter de cette énergie solaire gratuite pour assurer les besoins de confort visuel, d'ambiance lumineuse et de réduire la consommation d'électricité dans le bâtiment?

Les hypothèses

L'ensemble des questions posées dans la problématique nous a conduit, de manière assez logique à proposer les hypothèses suivantes avec pour but d'arriver à concevoir un système light shelf spécifique pour la ville de Biskra:

-L'optimisation d'un système d'éclairage naturel induit la forme, la configuration, le matériau, les caractéristiques photométriques, etc...

-L'installation d'un système light shelf type dans un espace architectural permet une bonne répartition de la lumière dans tout l'espace, une assurance de confort visuel, une augmentation de la productivité du travail à fournir dans cet espace et une diminution considérable de la consommation électrique pendant le jour.

-Le rendement du système light shelf dépend du climat lumineux de la ville, qui varie selon les saisons.

-Une étude approfondie de l'ensemble de ces facteurs peut indéniablement déterminer les conditions les plus favorables à un environnement lumineux confortable, sain, durable et économique.

Les objectifs

L'objectif de ce travail est de suivre les concepts de l'architecture durable et d'utiliser l'énergie gratuite offerte par le soleil pour tenter de créer sous des conditions climatiques spécifiques de la ville de Biskra, un système d'éclairage naturel "light shelf", qui, au regard des problèmes de lumière naturelle, serait susceptible de répondre aux diverses interrogations, permettra d'éclairer naturellement un espace, assurer le confort visuel ou encore donner des solutions pertinentes au regard des économies d'énergie, en répondant aux objectifs suivants :

-Concevoir un système light shelf type dont la configuration (largeur, hauteur, inclinaison, etc...) sera spécifique pour la ville de Biskra et correspondra le mieux aux caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville.

-Utiliser le système light shelf pour éclairer naturellement un espace architectural qui a une grande profondeur, tout en assurant une bonne répartition de l'éclairage et un bon facteur de lumière du jour dans tout le local.

-Assurer le confort visuel par la diminution de l'éblouissement et du contraste entre l'éclairage au fond de l'espace et la source lumineuse (la fenêtre) et créer une ambiance lumineuse particulière et acceptable dans l'espace.

-Définir une stratégie d'équilibre entre l'utilisation de la lumière naturelle et artificielle par la réduction de la consommation électrique pendant le jour tout en assurant les besoins en matière d'éclairage naturel.

La méthodologie

Cette recherche consiste à étudier l'influence du système light shelf sur l'augmentation du niveau de l'éclairage au fond de l'espace architectural. La question fondamentale posée, c'est quelles technique et technologie peut-on utiliser pour concevoir un système light shelf spécifique à la ville de Biskra qui corresponde à son climat lumineux. Il existe plusieurs outils qui permettent l'étude de l'éclairage naturel dans le bâtiment et de faire une investigation sur les performances du système light shelf. Ces outils peuvent être des algorithmes, des modèles mathématiques, des programmes de simulation ainsi que des modèles réduits. Ces outils peuvent évaluer les niveaux de lumière naturelle en 2D ou en 3D.

Dans notre étude, la technique adoptée se basera sur l'expérimentation. On premier lieu, nous allons faire une expérimentation simulée qui est une technique informatisée à l'aide d'un modèle simplifié de la réalité. Cette première expérience va nous aider à faire une investigation sur les types du système light shelf et nous permettra de choisir les configurations les plus performantes. Dans une deuxième expérience, nous proposerons une évaluation sur un modèle réduit afin de comparer les résultats. Dans une dernière expérience, nous déterminerons l'efficacité de ce système durant toute l'année. L'expérimentation sera exécutée sous un ciel réel et ne va pas prendre en considération les obstructions extérieures.

« Le soleil ne se lève pas en vain tous les jours. La lumière, au contraire, avec ou sans théorie corpusculaire, est quelque chose de concret, de précis, de certain. C'est une matière mesurable et quantifiable, comme le savent bien les physiciens mais semblent l'ignorer les architectes ». [A. C. Baeza]

Chapitre I

La lumière naturelle dans le bâtiment

Introduction

Les êtres humains possèdent une extraordinaire capacité à s'adapter à leur environnement immédiat. De tous les types d'énergie naturelles que les humains peuvent utiliser, la lumière est la plus importante. La lumière est un élément nécessaire à la vision et fondamentale pour apprécier la forme, la couleur et l'ambiance de l'environnement qui nous entoure dans notre vie quotidienne et nous permet d'exercer nos travaux dans des situations de confort visuel. Elle donne un sentiment de gaieté et de luminosité qui peuvent avoir un impact positif et significatif sur les personnes.

La lumière naturelle est l'un des éléments les plus importants dans l'architecture. La valorisation de l'éclairage naturel dans les bâtiments répond à un double objectif : le premier est la recherche du confort visuel et de l'ambiance lumineuse car la lumière du jour est la plus adaptée à la physiologie de l'homme ; le deuxième objectif est la recherche d'efficacité énergétique et la maîtrise des consommations d'énergie (en terme d'électricité). Les stratégies de l'éclairage naturel peuvent contribuer à réduire la consommation énergétique dans les bâtiments ainsi que les émissions de gaz à effet de serre par la réduction des besoins de leur éclairage électrique et de refroidissement [Scartezzini et al, 1993, 1994.]. C'est pour cette raison que l'éclairage naturel d'un bâtiment doit prendre en compte des facteurs influençant l'orientation, la taille, l'emplacement des fenêtres, les caractéristiques du vitrage, le contrôle d'éclairage, l'effet psychologique de la lumière ...etc.

A travers ce chapitre, nous essaierons de définir la notion de la lumière naturelle, de décrire son origine et ses bienfaits ainsi que les outils qui permettent de l'évaluer, de comprendre ces phénomènes, faire un aperçu sur les différentes grandeurs photométriques et enfin étudier la stratégie de la lumière naturelle.

I. Notions de base sur la lumière naturelle

I. 1. La lumière naturelle

L'homme, depuis son existence a essayé de comprendre les phénomènes astronomiques qui l'entourent, comme la nature de la terre, sa distance par rapport au soleil, ainsi que d'autres phénomènes astronomiques. Il a commencé par l'observation de la lumière qui est émise par le soleil, la Lune, les étoiles ...etc, dans le but de comprendre le cycle des journées c'est-à-dire, l'alternance entre le jour et la nuit ainsi que la durée du jour tout au long de l'année (les saisons). Pour améliorer les recherches dans ce domaine, les astronomes ont essayé d'inventer des outils et des appareils pour faciliter leurs recherches et la meilleure découverte est l'invention de la lunette d'approche par Galilée qui a conduit à la naissance de l'astronomie moderne. Cette nouvelle découverte a permis de découvrir et de comprendre des phénomènes qui n'étaient pas connus par les théories existantes, telles que les taches solaires. Assez rapidement, plusieurs phénomènes astronomiques tels que les mouvements de la terre et du soleil ont été confirmés grâce à l'invention des télescopes.

A partir de 1670, les astronomes ont commencé à calculer la vitesse de la lumière. Le premier à avoir calculé cette vitesse est Galilée, mais malheureusement ses calculs n'étaient pas vraiment exacts. Peu après, entre 1675 et 1676, Roemer a donné des résultats parfaitement justes ; il avançait que la lumière nous vient du soleil en 8 minutes 13 secondes, la distance de ce dernier à la terre étant de 33, 670,000 lieues, sa vitesse est donc de 70,000 lieues par seconde. Plus tard, les recherches dans ce domaine ont confirmé que la lumière se propage à une vitesse égale à 299790 km/s, soit 08 minutes 22 secondes pour aller de la surface du soleil à la terre. Ils définissent la lumière par quatre quantités qui sont : la fréquence F , qui est le nombre de pulsations par seconde (l'unité est le hertz), la période P ($P= 2\pi/F$), qui est la durée d'une pulsation (l'unité est la seconde), la longueur d'onde λ (l'unité est le mètre) et l'énergie E dont l'unité est le joule. En 1801, Thomas Young expérimente la diffraction et les interférences de la lumière, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que James Clerk Maxwell explique ce phénomène : il publie en 1873 un traité sur les ondes électromagnétiques, définissant la lumière comme une onde qui se propage sous la forme d'un rayonnement, le spectre de ce rayonnement n'étant qu'une partie de l'ensemble du rayonnement électromagnétique, beaucoup plus large : infrarouge, ultraviolet, ondes radio,

rayons X...etc. Les équations de Maxwell définissant le rayonnement électromagnétique auront de nombreuses applications dès le XIX^e siècle, et encore plus au XX^e siècle.

La lumière, qui fait partie des premiers phénomènes dont l'homme a pris conscience, a d'abord été étudiée sous l'aspect sensoriel, d'après les images perçues visuellement ; pour certaines études de ce genre, on peut assimiler la lumière émise par une source à un faisceau de rayons rectilignes. Mais cette conception simplificatrice (qui suppose une longueur d'onde nulle) se révèle incapable de rendre compte de la totalité des phénomènes de propagation de la lumière, et, pour une étude rigoureuse de tous les phénomènes lumineux, on doit recourir à deux théories physiques correspondant au double aspect de la lumière : ondulatoire et corpusculaire. La première est dite la théorie électromagnétique ; dans cette théorie, la lumière apparaît comme un phénomène ondulatoire périodique dont les longueurs d'onde sont de l'ordre de 0,5 μm , pouvant se propager dans le vide avec une vitesse maximale dont la nature électromagnétique a été établie par les travaux de James Maxwell. En tant qu'onde électromagnétique (onde transversale composée d'une onde de champ électrique et d'une onde de champ magnétique) de fréquence très élevée, la lumière voit sa propagation perturbée, aussi bien par la présence d'obstacles matériels (provoquant des réflexions, des diffractions, des interférences, des réfractions) que par celle de champs électriques ou magnétiques (polarisation rotatoire). Sa vitesse de propagation, dont l'étude cinématique est à l'origine de la théorie de la relativité restreinte, égale à $c = 299\,792\,458$ m/s, est une constante universelle dont la valeur n'est pas modifiée par un changement de référentiel; elle constitue la vitesse maximale de transmission des informations entre deux systèmes quelconques. Mais la théorie électromagnétique, qui décrit correctement les phénomènes de propagation, est insuffisante pour expliquer les interactions de la lumière avec la matière. La deuxième théorie est la théorie quantique, dont la lumière apparaît comme un flux discontinu de photons (particules élémentaires de masse au repos nulle) dont l'énergie est liée à la fréquence de l'onde par la relation $W = h \cdot n$ (h , constante de Planck ; n , fréquence) ; ce point de vue permet d'expliquer les observations relatives à l'émission et à l'absorption de la lumière par la matière.

Il est donc difficile de définir la lumière de façon exacte. On dit qu'elle a une double nature. Elle est formée de particules d'énergie sans masse (les photons). On dit également que c'est une onde électromagnétique qui se déplace dans le vide et dans la matière comme l'air, l'eau et le verre et visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde de 0,38 à 0,78 micron (380 nm à 780 nm). Elle met les objets qu'elle rencontre et les

surfaces qu'elle atteint à deux phénomènes complètement différents; l'un objectif, «l'éclairage», l'autre subjectif « la lumière » car, elle dépend du psychisme de l'individu.

Au cours des siècles, la lumière naturelle dans l'architecture a pris une place croissante ; quasiment absente dans le passé, elle est devenue capitale et prioritaire actuellement. Au 19^{ème} siècle, dans la conception des bâtiments de grandes dimensions tels que les usines, les musées, les grands ateliers, les architectes ont amené des dispositifs d'éclairage naturel latéraux et même zénithaux tels que verrières, lanterneaux, sheds...etc. afin d'éclairer suffisamment leurs bâtiments. Dans le projet de la Galerie Saint-Hubert à Bruxelles en 1847, l'architecte Jean-Pierre Cluysenaar a utilisé une toiture entièrement vitrée afin d'autoriser une large pénétration de la lumière du jour, ainsi que des façades claires qui permettent de diffuser la lumière dans les parties les plus basses et les espaces adjacents. Le facteur de lumière du jour est d'environ 17% au centre de la galerie St-Hubert qui diminue rapidement vers 1% derrière les baies vitrées des boutiques. Cette dégradation de la lumière permet de créer une ambiance lumineuse spécifique dans cette galerie.



Figure 1 : Galerie Saint-Hubert, Bruxelles, 1847 (Source : M. Fontoynt)

La fin du 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème} siècle ont vu des progrès importants dans la compréhension des phénomènes en rapport avec la lumière naturelle comme l'ensoleillement, la lumière diffuse...etc. et en même temps, on vu une croissance dans le domaine de l'éclairage artificiel grâce à la production de l'électricité ainsi que l'apparition des

dispositifs d'éclairage performants. La conséquence de ce développement a conduit les architectes -surtout dans une période comprise les années cinquante et soixante-dix aux États-Unis- de négliger les apports en lumière naturelle pour s'intéresser principalement aux dispositifs artificiels.

Au 20^{ème} siècle, la lumière naturelle est devenue une source de créativité pour les architectes tels que Frank Lloyd Wright qui affirmait que « la qualité intérieure d'un espace dépend de la quantité d'espace extérieur qui entre par le truchement de la lumière et de la transparence », Le Corbusier avec sa fameuse citation, « L'architecture est le jeu savant, correct et magnifique des volumes sous la lumière ; les ombres et les clairs révèlent les formes Tadao Ando « La lumière est l'origine de tout être », Jean Nouvel, ...etc. Dans la plupart des projets du Corbusier, la lumière naturelle été un élément clé dans sa conception. La chapelle de Ronchamp (Haute-Saône) est l'une de ses grandes œuvres qu'il a conçu en 1955 comme "une sculpture de lumière et de blancheur inscrite dans le paysage", elle est connue, avec ses formes galbées, ses tours chapelles, son voile de béton en guise de toit et surtout son jeu de lumière sur les formes pour montrer la spiritualité. L'architecte a utilisé des puits de lumière de différentes dimensions, la pierre granuleuse qui fait vibrer la lumière ainsi que le "mur verrière" dans le côté sud de la chapelle.



Figure 2 : La chapelle de Ronchamp (Source : Le Corbusier)

Et selon Tadao Ando, La lumière crée tout, elle est la forme fondamentale du sens de l'espace. Elle permet à l'homme de percevoir l'espace qui l'entoure et ainsi définir son propre être. La lumière naturelle définit aussi le temps car elle change avec le moment du jour et de

l'année. Dans son projet de l'église de la lumière, Ando coupe deux lignes dans un des murs. A ce moment, un rayon de lumière fracture l'obscurité. Mur, sol et plafond, chacun intercepte la lumière, et leur existence est révélée. Pour transcrire cela en volume, Tadao Ando utilise des fenêtres basses pour créer une lumière diffuse ou des ouvertures zénithales qui produisent une infinité de lumières douces.



Figure 3 : L'église de la lumière (source : Tadao Ando)

Après la crise pétrolière de 1972, le monde s'est tourné vers une nouvelle architecture dite verte ou écologique et le monde a connu l'apparition de plusieurs notions telles que la démarche américaine « Leadership in Energy and Environmental Design » (LEED) et la démarche française « la Haute Qualité Environnementale » (HQE) avec ses 14 cibles ainsi que de nombreuses publications et ouvrages vantant l'intérêt de la protection de l'environnement. Les pays développés tels que l'Allemagne, la France...etc ont connu une forte recrudescence de maisons solaires, habitats bioclimatiques par la prise en considération du climat de la région et l'introduction des techniques et des systèmes environnementaux tels que des pompes à chaleur, des éoliennes, des capteurs solaires et autres dispositifs. La lumière naturelle a pris une place dans cette nouvelle stratégie, elle est devenue un élément principal dans la conception architecturale dans le but d'éclairer naturellement le bâtiment tout en réduisant au maximum la consommation énergétique par l'introduction de nouveaux systèmes d'éclairage naturel tels que les stores réglables, les puits de lumière, les light shelves, les atriums, etc...

I. 2. Les bienfaits de la lumière naturelle

La lumière naturelle joue un rôle fondamental pour l'activité de l'ensemble de la biosphère terrestre et apporte plusieurs bienfaits sur les êtres vivants et l'environnement; elle est la première source d'énergie des écosystèmes terrestres. Elle interprète plusieurs rôles dans des domaines différents: elle a probablement été un facteur essentiel dans la formation et le développement de la vie sur terre, tant par le maintien d'une température ambiante favorable que par les réactions photochimiques telle la photosynthèse qu'elle génère. Chez la plupart des animaux, c'est encore la lumière qui, selon la durée du jour, corrige les horloges biologiques animales par la production de mélatonine qui est une hormone uniquement produite la nuit. Chez les plantes, la durée du jour contrôle aussi, avec la température, l'apparition des bourgeons, des feuilles, des fleurs ou l'ouverture et la fermeture de fleurs grâce aux phénomènes singuliers par les mouvements alternatifs appelés sommeil et réveil des plantes. C'est ainsi qu'un grand nombre de fleurs s'épanouissent pendant le jour alors que d'autres se resserrent à l'approche de la nuit. Une autre action encore extrêmement importante de la lumière sur les végétaux, c'est qu'elle semble contribuer à entretenir la salubrité, la pureté de l'atmosphère et cela en absorbant la plus grande partie du carbone du gaz carbonique expiré par les animaux.

La lumière joue encore un rôle psychologique, elle est le support informationnel le plus important pour l'homme, étant donné l'extrême richesse des perceptions visuelles. Elle détermine une grande partie de l'action psychologique du milieu (confort visuel, esthétique, sentiment de sécurité)...etc. En plus, la lumière naturelle est indispensable à notre équilibre vital, à notre santé, notre bien être et plus encore. Il a été ignoré pendant longtemps que le manque de lumière était source de dépression, de fatigue, qu'il engendrait des tendances à la boulimie, que c'était un facteur provoquant une augmentation du stress, voire dans les cas extrêmes des tendances suicidaires. Le manque de lumière retarderait la production de la mélatonine, sécrétée par la glande pinéale mais aussi par la rétine. Cette hormone intervient dans l'endormissement et une baisse de celle-ci provoque une sensation de fatigue dans la journée. Il est confirmé que la lumière a un effet thérapeutique sur le moral des personnes si bien que ces maux se soignent à présent par la lumière. On parle alors de luminothérapie ou photothérapie. Un autre rôle est maintenant économique : la lumière constitue une source énergétique vitale (énergie solaire), qui a contribué à la formation des combustibles fossiles.

Le dernier rôle est technique : de nombreuses sciences ont pour but l'étude de la lumière. Citons l'éclairagisme, les arts, la photonique, **etc...**

Nous passons plus de 80% de notre temps à l'intérieur des bâtiments, c'est pour cela que l'éclairage naturel doit être suffisant en quantité tout d'abord puis en qualité pour éviter tous les problèmes d'inconfort visuel qui sont causés par un mauvais éclairage. Donc, le besoin instinctif de lumière naturelle que nous ressentons s'explique par les bienfaits qu'elle nous apporte. Nous avons, en effet, besoin de la lumière pour agir et vivre en bonne santé physique et psychique.

I. 3. Les sources lumineuses

La définition la plus simple qu'on peut donner à une source lumineuse est que « tout corps qui émet de l'énergie rayonnante soit par une surface ou un volume ». Cette source lumineuse peut être une source primaire ou une source secondaire : La source est dite primaire quand elle transforme une énergie en rayonnement lumineux, c'est-à-dire, c'est elle qui produit la lumière qu'elle émet; elle peut être naturelle, comme le soleil, les étoiles et les astres, ou artificielle, comme les lampes électriques, les ampoules, les tubes fluorescents, etc.

La source est dite secondaire quand elle modifie par réflexion, par transmission ou par absorption le rayonnement reçu d'une source primaire. Les sources secondaires sont des sources lumineuses qui ne produisent pas de la lumière; elles ne font que diffuser les rayons reçus d'autres sources lumineuses, elles peuvent être naturelles, comme la lune, les planètes qui diffusent la lumière du soleil, un ciel bleu, les nuages, **etc...**ou artificielles, comme un bâtiment et tous les objets que nous percevons. C'est grâce à ces rayons qui sont diffusés et renvoyés dans toutes les directions que nous voyons le monde extérieur car c'est eux qui atteignent nos yeux.

I. 3. 1. Les sources primaires : La source principale "le soleil"

Notre étoile, le soleil, est une source primaire de lumière qui se trouve à la centrale de notre système planétaire; il a une dimension gigantesque par rapport à la terre avec un diamètre de 1 390 000 km, une masse de $1,989 \times 10^{30}$ kg et une température qui est entre 5800 et 15 millions °C. Cette source lumineuse transforme une partie de son énergie nucléaire en énergie

lumineuse qui peut éclairer tout l'univers. Le soleil émet de la lumière blanche ou lumière visible mais aussi d'autres rayonnements appartenant au spectre électromagnétique comme les rayonnements infrarouges et l'ultraviolet.

I. 3. 1. 1. La position géographique du soleil

La planète terre tourne autour d'un axe définissant les pôles nord et sud du globe en 24 heures ce qui permet de générer l'alternance du jours et de la nuit. Ainsi, la trajectoire de la terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité, effectuée en environ 365 jours. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan de l'écliptique est constante et égale à $23^{\circ}27'$; elle est l'origine du phénomène des saisons. La distance terre-soleil varie entre 153.10^6 km et 147.10^6 km, ce qui donne un faisceau parallèle car les dimensions de la terre sont faibles en comparaison avec le soleil.

Le schéma ci-dessous montre les différentes rotations que fait la terre sur elle-même et autour du soleil.

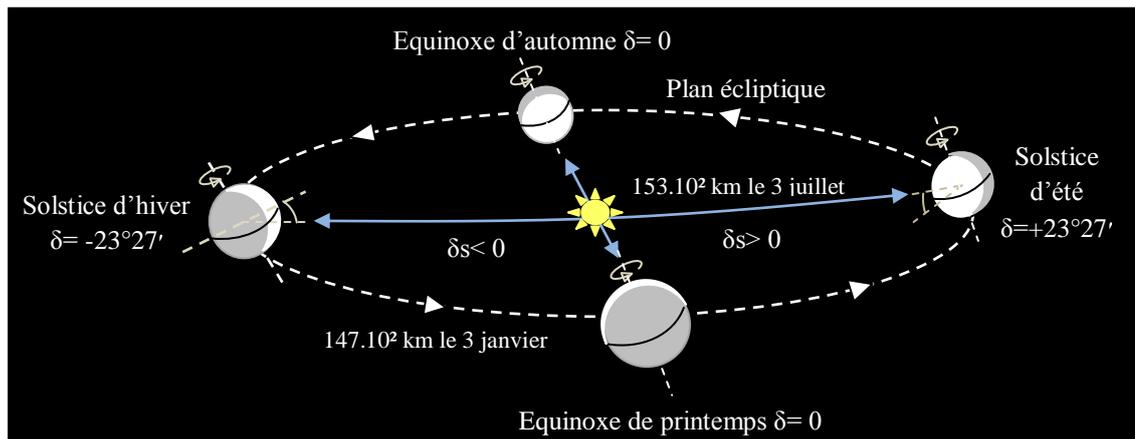


Figure 4 : La position géographique du soleil (Source : Auteur)

I. 3. 1. 2. L'angle d'incidence et la densité énergétique

L'angle qui sépare les rayons du soleil de la normale d'une surface est appelé angle d'incidence et détermine le pourcentage de lumière directe interceptée. Plus le flux est normal à la surface, plus il est important. Dans le bâtiment, l'angle d'incidence caractérise l'incidence avec lequel les rayons solaires frappent une paroi : c'est l'angle entre la normale à la paroi et

le rayon solaire à l'instant considéré. Cet angle d'incidence est évalué par l'inclinaison et l'orientation de la paroi ainsi que par la direction des rayons solaires. La densité énergétique que reçoit une surface est l'angle que forment les rayons du soleil avec cette surface. Pour que cette densité soit maximale, la surface réceptrice doit être perpendiculaire aux rayons du soleil, si le rayon solaire ne forme pas un angle droit, la quantité d'énergie va être répartie sur une surface plus large, ce qui réduit sa densité énergétique.

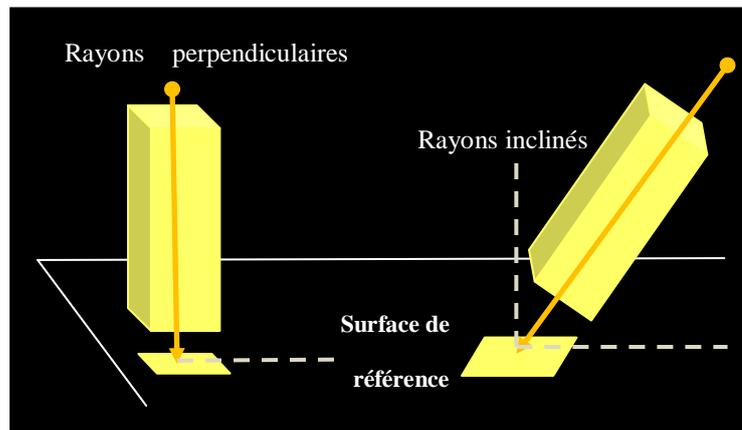


Figure 5 : La densité énergétique (Source : Auteur)

I. 3. 1. 3. Le rayonnement solaire

Avant d'étudier les différentes propriétés du rayonnement solaire, on commence tout d'abord par le définir. Le rayon lumineux est la direction que suit la lumière en se propageant; la réunion de plusieurs rayons voisins constitue le pinceau lumineux alors que le faisceau lumineux résulte de la réunion de plusieurs pinceaux. Le rayonnement solaire est aussi une énergie électromagnétique libérée par les réactions thermonucléaires au sein du soleil. Malgré la distance entre le soleil et notre planète, l'impact de ce rayonnement sur la terre représente un apport énergétique important. Sa répartition n'est pas uniforme, ni d'un point de vue géographique, ni temporellement. En effet, la rotation de la terre sur elle-même d'une part et sa révolution au sein du système solaire d'autre part, produisent une mobilité apparente en tout lieu. Le rayonnement solaire qui arrive au niveau du sol est composé des ondes correspondant aux domaines proches du visible. Le rayonnement infrarouge représente 49° de l'énergie totale émise par le soleil, le domaine visible recouvre 46° et l'ultraviolet 5°. Environ 35% du rayonnement solaire capté par l'atmosphère est réfléchi vers l'espace. Au cours de sa traversée de l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire subit une diffusion au contact

de molécules d'air, d'aérosols et de particules de poussière. D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15% du rayonnement solaire. L'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement solaire doit traverser permet d'évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre. Lorsque le soleil est en haut dans le ciel, ses rayons doivent traverser une épaisseur d'air plus faible que lorsqu'il est bas sur l'horizon. Et lorsque l'altitude augmente, la couche atmosphérique à traverser est plus réduite et l'intensité de rayonnement s'accroît et le contraire se produit au coucher du soleil, les rayonnements solaires sont affaiblis.

I. 3. 1. 4. L'éclairage solaire global

Le rayonnement émis par le soleil constitue un spectre continu allant des ultra-violet à l'infrarouge en passant par le visible où il émet le maximum d'énergie. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire incident se décompose en une composante directe, qui atteint la surface terrestre sans modifier sa trajectoire et une composante diffuse, qui atteint la surface après absorption et réémission dans l'atmosphère. Donc, le rayonnement solaire global est la somme du rayonnement solaire diffus, du au ciel et du rayonnement solaire direct, du exclusivement au soleil selon la formule suivante :

$$[G=I \cdot \cos (Z+D)] \quad [1.1] \text{ [Francis Miguet, 2000]}$$

où G est le rayonnement global, I le rayonnement direct, D le rayonnement diffus, et Z l'angle zénithal du soleil.

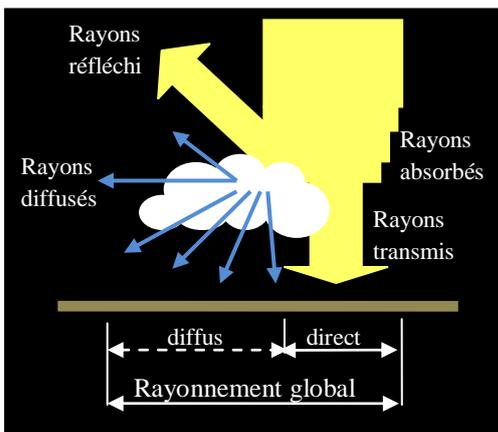


Figure 6 : L'éclairage solaire global
(Source : Auteur)

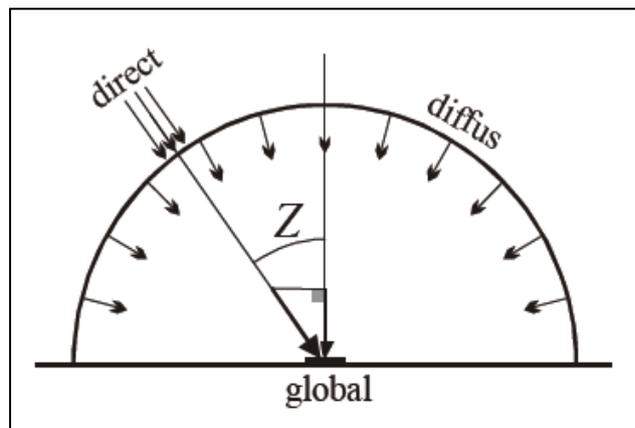


Figure 7 : L'angle zénithal du soleil
(Source : Francis Miguet)

I. 3. 1. 5. L'éclairage énergétique

L'énergie solaire disponible est évaluée par l'éclairage énergétique ou par l'exposition énergétique. L'éclairage énergétique est le flux énergétique solaire reçu par unité de surface : il s'exprime en Wh/m² ou en J/cm². L'exposition énergétique est le produit de l'éclairage énergétique par la durée d'irradiation : c'est la quantité d'énergie captée par unité de surface. Cette quantité d'énergie solaire reçue en un lieu varie suivant le jour, l'heure, les conditions météorologiques et le niveau de pollution de l'air.

I. 3. 2. Les sources secondaires

Ce serait une erreur de ne parler que du soleil. En effet, s'il est la source originale de lumière naturelle sur terre, nous devons nous intéresser également aux sources secondaires générées par les phénomènes optiques de réflexion, de diffusion et d'absorption sur le rayonnement solaire, distinguons la voûte céleste (énergie diffuse) d'une part et l'environnement terrestre (tout élément de surface de la scène (énergie diffuse également) ; comme le sol, les façades, la végétation, un plan d'eau, etc.), d'autre part. Ces trois éléments (le soleil, la voûte céleste et l'environnement terrestre) composent un tout que nous appelons 'la lumière naturelle'.

I. 3. 2. 1. La voûte céleste

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit des modifications spectrales et directionnelles. Des phénomènes d'absorption et de diffusion sont générés par les particules atmosphériques, si bien que la lumière connaît une redistribution spatiale donnant lieu à une source de lumière secondaire constituée de l'hémisphère céleste au-dessus de l'horizon. Cette nouvelle donne de la lumière naturelle conduit à considérer deux contributions en provenance du ciel : une partie directe caractérisée par le rayonnement solaire non dévié et une partie diffuse relative à la lumière provenant du reste du ciel. Le tout constitue la contribution globale de la lumière du ciel.

I. 3. 2. 2. Le ciel

La division 3 de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a depuis longtemps repris les modèles isolés à chaque type de ciel et travaillé sur une généralisation en un modèle unique [CIE110,1994],[CIE CL114,1997]. Richard Pérez a également établi deux modèles.

Le premier souvent nommé «Perez-ASRC» consiste en une interpolation des modèles spécifiques aux ciels sans nuage, couvert et intermédiaire (les trois modèles CIE et celui de Nakamura) [PEREZ, 1990]. Le second, appelé «Perez» ne tient plus compte des modèles précédents mais est construit empiriquement à partir de 3 millions de points de mesures pour des conditions d'ensoleillement variées sur le site de Berkeley en Californie [PEREZ, 1993-1]. Le modèle de Perez et al est paramétré à l'aide des 2 coefficients ϵ et Δ , le premier traduisant le degré de pureté du ciel, le second sa luminosité (ϵ et Δ sont les indices de clarté et de luminosité du modèle de Perez). Ces coefficients permettent de déterminer l'éclairement énergétique diffus sur un plan horizontal De et normal direct Se . Perez définit ces éclaircissements par les expressions suivantes :

$$[Se = De \cdot (\epsilon - 1)(1 + 1,041 \cdot Z^3)] \quad (\text{W/m}^2) \quad [1.2] \quad [\text{PEREZ}, 1993-1]$$

$$[De = \Delta \cdot E_{0e} \cdot (\alpha' / m)] \quad (\text{W/m}^2) \quad [1.3] \quad [\text{PEREZ}, 1993-1]$$

où ϵ et Δ sont les coefficients du modèle (indices de clarté et de luminosité respectivement), E_{0e} la constante solaire ($1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), α' le coefficient d'excentricité, m la masse d'air optique, et Z l'angle solaire zénithal ($Z = \pi/2 - h$).

En 2002, la CIE soumet une nouvelle version proche de la formulation unique de Pérez. Lors de cette étude, cette version est finalement approuvée par les comités nationaux de la CIE pendant l'année 2003. Elle reprend l'étude menée par Richard Kittler et Richard Pérez. Les premiers ont été développés pour des types de ciels bien limités : parfaitement couvert (le ciel Moon and Spencer retenu par la CIE en 1955), sans nuage (un ciel formulé par Kittler est adopté par la CIE en 1973), intermédiaires (en particulier le ciel proposé par Nakamura [NAKAMURA, 1983][NAKAMURA, 1985][NAKAMURA, 1987]). Puis après, les chercheurs ont essayé de composer un modèle unique reprenant les diverses catégories de ciel comme Kittler [KITTLER, 1986], Perraudau [PERRAUDEAU, 1990].

Quinze ciels standards sont référencés, contenant 5 types de ciels clairs, 5 intermédiaires et 5 types couverts, couvrant tout les spectres des ciels qu'on peut trouver d'habitude dans la nature. Ces types du ciel sont référencés et rassemblés en une formule unique. Nous retrouvons dans la formulation mathématique générale la luminance en fonction de la luminance au zénith selon l'équation [f(x)].

$$[F x = 1 + c * \exp d * x - \exp d * \frac{\pi}{2} + e * \cos^2(x)] \quad [1.4] \text{ [CIE 110, 1994]}$$

$$[\varphi(z) = 1 + a * \exp (\frac{b}{\cos z})] \quad [1.5] \text{ [CIE 110, 1994]}$$

Le tableau ci-dessous montre les 15 types de ciels ainsi que les indicatrices de diffusion et de gradation notons que : a, b, c, d et e sont des coefficients dont les valeurs sont définies dans la publication de la CIE [CIE S011, 2003] pour les 15 types de ciel standard :

Type	Caractérisation	Graduation		Indicatrices		
		a	b	c	d	e
1	Ciel CIE Standard Overcast Sky. Forte graduation de la luminance vers le zénith. uniformité azimuthale.	4	-0.7	0	-1	0
2	Ciel couvert. Forte graduation de la luminance vers le zénith. Luminosité légèrement supérieure vers le soleil.	4	-0.7	2	-1.5	0.15
3	Ciel couvert. Graduation zénithale modérée. uniformité azimuthale.	1.1	-0.8	0	-1	0
4	Ciel couvert. Graduation zénithale modérée. Graduation légère vers le soleil.	1.1	-0.8	2	-1.5	0.15
5	Ciel couvert. Uniformité totale.	0	-1	0	-1	0
6	Ciel partiellement nuageux. Graduation zénithale nulle. Graduation légère vers le soleil.	0	-1	2	-1.5	0.15
7	Ciel partiellement nuageux. Graduation zénithale nulle. Zone circumsolaire plus lumineuse.	0	-1	5	2.5	0.3
8	Ciel partiellement nuageux. Graduation zénithale nulle. Couronne solaire distincte.	0	-1	10	-3	0.45
9	Ciel partiellement nuageux. Le soleil est totalement masqué.	-1	-0.55	2	-1.5	0.15
10	Ciel partiellement nuageux. Zone circumsolaire plus lumineuse.	-1	-0.55	5	-2.5	0.3
11	Ciel bleu laiteux. Couronne solaire distincte.	-1	-0.55	10	-3	0.45
12	Ciel CIE Standard Clear Sky. Ciel bleu sans nuage faiblement pollué.	-1	-0.32	10	-3	0.45
13	Ciel CIE Standard Clear Sky. Ciel bleu sans nuage fortement pollué.	-1	-0.32	16	-3	0.3
14	Ciel sans nuage. Large couronne solaire.	-1	-0.15	16	-3	0.3
15	Ciel sans nuage bleu laiteux. Large couronne solaire.	-1	-0.15	24	-2.8	0.15

Tableau1 : Tableau regroupant les quinze types de ciel standard (Source : Cyril Chain)

Un seizième ciel est repris dans la recommandation. Il s'agit en fait du modèle de Moon and Spencer, modifié par Fritz qui a été formulé pour des ciels couverts en tout point de la voûte céleste par des nuages denses dont le disque solaire ne doit pas être détectable.

Les distributions de luminances sont symétriques par rapport au zénith et indépendantes de la position du soleil. Les luminances de l'horizon sont trois fois plus petites que celle au zénith [MOON, 1942]. L représente la luminance à l'horizon, Lz représente la luminance au zénith selon l'équation suivante :

$$\left[\frac{L}{Lz}\right] = \frac{1+2*\sin \gamma}{3} \quad [1.6] \text{ [CIE 110, 1994]}$$

Vu la multitude des conditions météorologiques, quatre types de ciels standards ont été établis pour les études d'éclairage. Chacun d'eux est caractérisé par sa répartition de la luminance sur la voûte céleste qui varie en fonction de la latitude, de l'altitude, de saison et de l'heure.

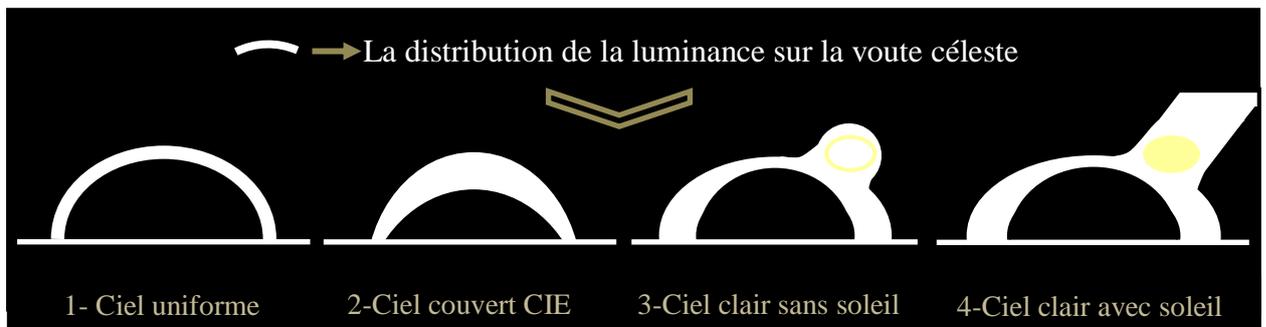


Figure 8 : Les quatre types de ciel standard (Source : Auteur)

- 1- **Ciel uniforme** : c'est le modèle le plus simple, il correspond à un ciel couvert d'une couche épaisse de nuages laiteux ou à une atmosphère pleine de poussières, ou le soleil n'est pas visible. Sa luminance est indépendante des paramètres géométriques : elle est constante en tout point du ciel à un moment donné.
- 2- **Ciel couvert(CIE)** : Ce type de ciel a été établi par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), pour lequel la luminance en un point varie en fonction de sa position sur la voûte céleste, suivant la loi :

$$[L = Lz *(1+2*\sin \Theta/3)] \quad [1.7] \text{ [SO11.2003, C.I.E]}$$

L_z = la luminance au zénith et Θ = la hauteur de la zone du ciel considérée. La luminance au zénith est donc trois fois plus élevée que la luminance à l'horizon. Ce type de ciel correspond à un ciel de nuages clairs cachant le soleil.

3- Ciel clair : Ce type est caractérisé par des valeurs de luminance qui varient en fonction de paramètres géométriques et de la position du soleil. Il émet un rayonnement diffus qui dépend de la variation de la position du soleil et exclu le rayonnement solaire direct.

4- Ciel clair avec soleil : Il prend en compte le rayonnement global (direct+diffus) alors que les trois modèles précédents ne font intervenir que la composante diffuse de rayonnement solaire. Il correspond à un ciel serein où le soleil brille. Le ciel clair avec soleil offre la possibilité d'étudier les jeux d'ombres et de lumière ainsi que les risques d'éblouissement dus à la pénétration du soleil dans un bâtiment.

Pour étudier l'éclairement à l'intérieur d'un bâtiment et pour arriver à des résultats exactes, la Commission Internationale de l'Eclairage propose de prendre comme base de calcul un ciel couvert, car sa luminance est égale en tout point du ciel à un moment donné donnant un niveau d'éclairement de 5000 lux sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé.

I. 3. 2. 3. Les nuages

Il n'y aurait pas de vie sur terre sans le soleil pour chauffer notre planète. L'atmosphère ainsi que les nuages interagissent avec la lumière du soleil. Les nuages réfléchissent une partie de la lumière du soleil vers l'espace. Il y a donc moins d'énergie solaire arrivant sur le sol et une modification de la quantité de lumière solaire absorbée par la terre. Un nuage est composé de millions de toute petites gouttes d'eau ou de cristaux de glace, flottant dans l'air. Les nuages contiennent des particules en suspension dans l'air, sur lesquelles la condensation se forme. Afin de caractériser la couverture nuageuse, il faut se référer à deux paramètres : d'une part leur type et d'autre part leur quantité. Les variétés de nuages sont définies à l'aide d'une classification internationale, qui catégorise les types de nuages d'après leur aspect, leur dimension et leur altitude alors que la quantité de nuages couvrant la voûte céleste est

caractérisée par la nébulosité N qui égale à la fraction du ciel occupé par une couverture nuageuse visible. La nébulosité varie de $N=0$ (pas de nuages) à $N=8$ (ciel totalement couvert) et $N=9$ pour les cas de brouillard. A l'exception de quelques nuages spéciaux comme les nuages nacrés, nuages nocturnes lumineux...etc.), les nuages sont groupés en trois étages : supérieur (haut), moyen et inférieur (bas) comme on peut avoir des nuages à développement vertical. Le tableau ci-dessous montre la classification des nuages selon les régions:

Famille	Régions polaires	Régions tempérées	Régions tropicales
Nuages supérieurs	3 à 8 km	5 à 13 km	6 à 18 km
Nuages moyens	0,5 à 5 km	0,5 à 9 km	0,5 à 12 km
Nuages inférieurs	0 à 2 km	0 à 2 km	0 à 2 km
Nuages à développement vertical	(0,5) à 8 km	(0,5) à 13km	(0,5) à 18 km

Tableau 2 : La classification de nuages selon leurs altitudes
(Source : <http://pages.infinet.net/vasgrav/meteo/ref/nuages.htm>)

Les nuages hauts sont souvent minces et pas très réfléchissants, ils laissent entrer la plupart de l'énergie solaire, ils sont aussi très hauts dans le ciel où il fait très froid, donc ils n'émettent pas beaucoup de chaleur et, en moyenne, ont tendance à chauffer la planète alors que les nuages bas sont souvent épais et réfléchissent une grande partie de l'énergie solaire vers l'espace, ils sont aussi plus bas dans l'atmosphère et émettent donc plus de chaleur et comme conséquent, ils vont refroidir la planète. Le schéma ci-dessous illustre les effets des nuages sur les rayonnements solaires qui arrivent sur la terre ainsi que leurs caractéristiques :

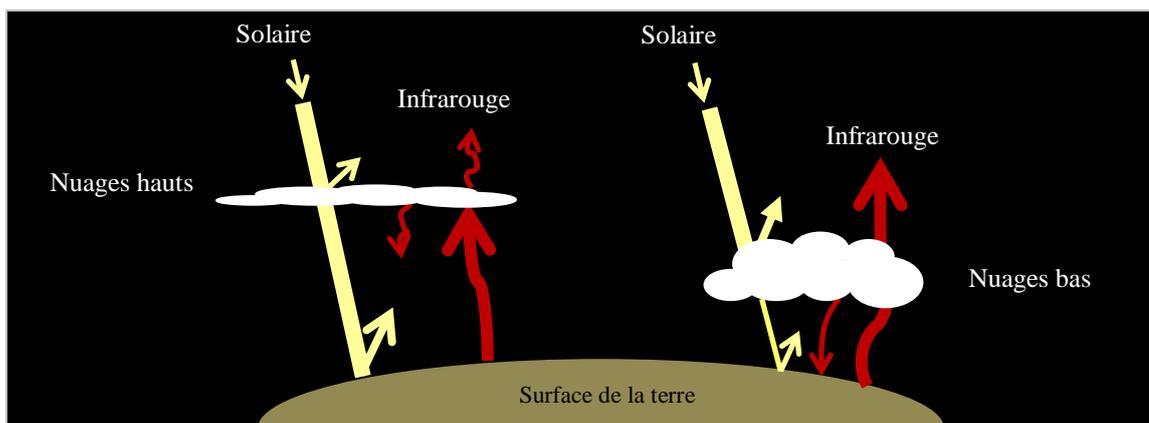


Figure 9 : Les effets de nuages sur le rayonnement solaire (Source : Auteur)

Autrement dit, la nébulosité est l'angle solide dessiné par la couverture nuageuse en prenant comme unité le huitième d'angle solide du ciel visible.

Un angle solide est l'analogie tridimensionnelle de l'angle plan. Pour trouver l'angle solide couvert par un objet, on considère une sphère centrée au point d'intersection de l'objet. Ensuite, on mesure la superficie de la partie de la sphère qui est contenue dans l'objet, et on la divise par la surface totale de la sphère. Les angles solides sont mesurés en radians carrés (rad^2) ou en degrés carrés. L'unité du système international de l'angle solide est le stéradian (symbole sr).

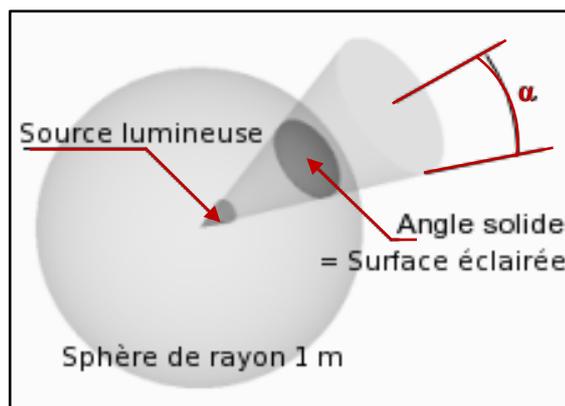


Figure 10 : L'angle solide
(Source : Auteur)

I. 3. 2. 4. L'albédo

L'albédo est une grandeur sans dimension, il représente le rapport de la quantité de lumière réfléchie par un objet sur la quantité de lumière qu'il reçoit. L'albédo est exprimé par un nombre qui va de 0 (aucune lumière réfléchie) à 1 (toutes les ondes électromagnétiques sont réfléchies), ou bien est exprimé en pourcentage. Généralement, les surfaces claires ont un fort albédo (réfléchissent l'énergie solaire) et que les surfaces foncées ont un faible albédo (absorbent l'énergie solaire).

La lumière blanche, émise par le Soleil, est en fait composée d'une multitude de radiations différentes, de l'infrarouge à l'ultraviolet. Lorsque cette lumière arrive sur un objet, certaines radiations sont absorbées, et le reste est réfléchi. Les radiations réfléchies forment une certaine couleur, que nous percevons comme étant la couleur de l'objet. Ainsi, un objet blanc réfléchira toutes les radiations et un objet noir les absorbera toutes. Le réchauffement de la

planète conduit à la diminution de l'albédo et, par conséquent, l'augmentation de la température de la planète. Le tableau suivant énumère quelques surfaces et leur albédo :

Matériau	Facteur de réflexion moyen estimé (Albédo)
Foret sombre Champs verdoyants	3 – 5%
Bâtiment sable humide rochers	8 –15%
Asphalte sol nu sec	15 – 25%
Briques herbes sèches déserts étendues de sel	25 –40%

Tableau 3 : L'albédo de quelques surfaces (Source : Francis Miguet)

Pendant l'absence du soleil et des sources lumineuses secondaires telle que le ciel, la voûte céleste et les nuages qu'on a vues précédemment, nous serions dans l'obscurité la plus complète, mais, il ne faut pas oublier qu'il existe encore d'autres sources secondaires qu'on pas entamées, parmi ces sources : la lune, les planètes et les étoiles...etc.

I. 4. Les projections solaires

I. 4. 1. Le diagramme solaire

Le diagramme solaire ou une projection solaire est un outil facile et pratique qui permet de connaître la position du soleil dans le ciel. Ce repérage est assuré grâce à une représentation plane en coordonnées locales de la trajectoire du soleil perçue depuis un point quelconque de la surface terrestre. La position du soleil est définie par sa hauteur (angulaire) et son azimut, qui varie d'heure en heure mais aussi suivant le rythme des saisons :

- La hauteur (H) du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et le plan vertical, elle se compte de 0° à 90° à partir de l'horizon vers la voûte céleste.
- L'azimut (A) est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu qui se mesure à partir du Sud (= 0°) vers l'Est ou vers l'Ouest. L'azimut solaire

- est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe.

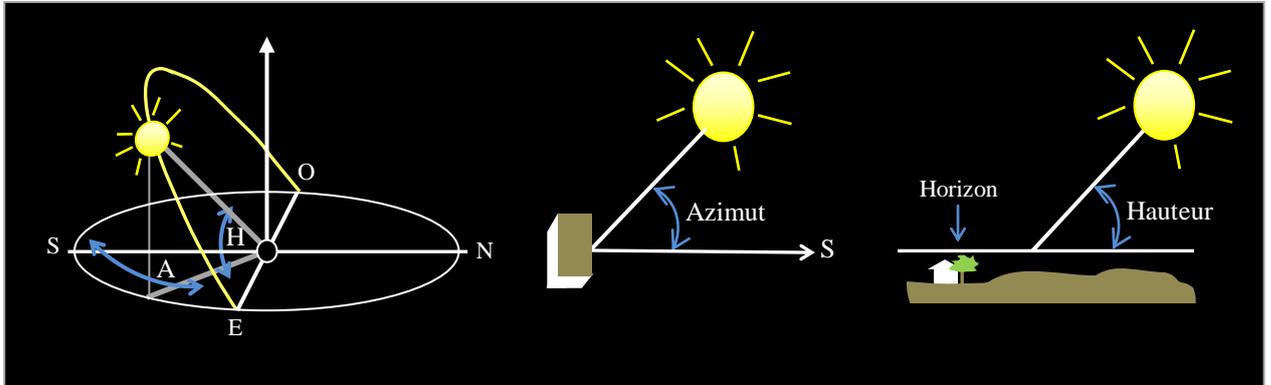


Figure 11 : Les coordonnées solaires : hauteur et azimut
(Source : Auteur)

Le diagramme solaire est composé de : Lignes verticales qui représentent l'azimut, lignes horizontales qui représentent la hauteur du soleil, le zénith se trouve au centre, l'horizon dans le périphérique, des heures de 5h à 19h et des mois. Les diagrammes solaires sont spécifiques d'une latitude et permettent de déterminer la hauteur et l'azimut solaire en fonction de la date et l'heure, de connaître l'ensoleillement (durée d'insolation), le bilan énergétique annuel et la performance en protection solaire des masques architecturaux.

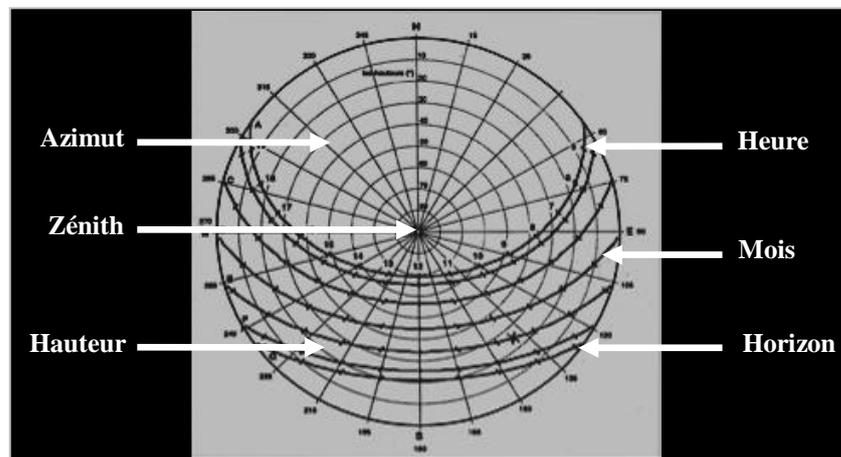


Figure 12 : Les différentes composantes de diagramme solaire
(Source : Auteur)

1.4.2. Les types de projection solaire

Il existe cinq types de projections qui peuvent être utilisés : pseudo-cylindrique, orthographique, perspective (gnomonique), stéréographique et sphérique équidistante. Ces projections permettant de dresser des plans et des élévations du ciel.

1.4.2.1. Projection pseudo-cylindrique

Dans ce système de projection, l'observateur se trouve au point 0, observe le mouvement du soleil à travers un cylindre de rayon unité centré sur l'observateur. Les hauteurs et azimuts sont reportés sur le cylindre que l'on déroule ensuite. Pour plus de commodité, l'échelle des hauteurs est alinéatisée ce qui provoque une déformation de la course solaire, surtout sensible aux basses latitudes. Cette représentation est utilisée aux latitudes comprises entre 40 et 60°.

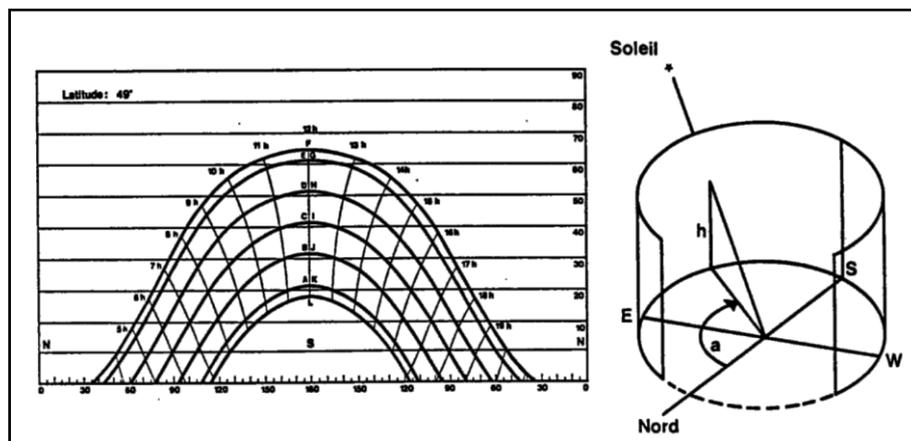


Figure 13 : Projection pseudo-cylindrique (Source : Les projections de la course solaire)

1.4.2.2. Projection orthographique

C'est une projection cylindrique difficilement utilisable dans le domaine de l'architecture, parce qu'elle tasse la couronne de ciel voisine de l'horizon, qui est la plus intéressante car la plus encombrée et donc la plus critique pour l'architecte ou l'urbaniste... Elle est par contre favorable aux calculs énergétiques rapides (approximatifs toutefois) dans la mesure où elle conserve les surfaces. Dans cette projection, la voûte céleste (au lieu considéré) est projetée sur un hémisphère de rayon unité centrée sur l'observateur. Le mouvement du Soleil est à son tour projeté sur le plan horizontal du lieu.

1.4.2.3. Projection gnomonique ou perspective

Il s'agit d'une projection conique dont le centre est l'extrémité du style, transforme les trajectoires solaires en hyperboles, mais les lever et coucher du soleil sont malheureusement rejetés à l'infini sur les perspectives horizontales ; cette projection présente l'avantage d'offrir un aspect de l'environnement proche de la vision ordinaire, tout au moins dans la partie centrale de l'angle de vue. De plus, les perspectives transforment les grands cercles de la voûte céleste en droites ; cet aspect rend finalement la projection intéressante puisque ces grands cercles sont nombreux : lignes horaires, trajectoires solaires aux équinoxes, cercles des longitudes, et toutes les droites elles-mêmes.

1.4.2.4. Projection stéréographique

Afin d'obtenir une représentation lisible et conforme de la course solaire on fait recours à la projection stéréographique. Dans cette représentation, la position du Soleil est reliée au Nadir qui est le point opposé au zénith du lieu. Elle offre le grand avantage de représenter les trajectoires solaires selon des arcs de cercle.

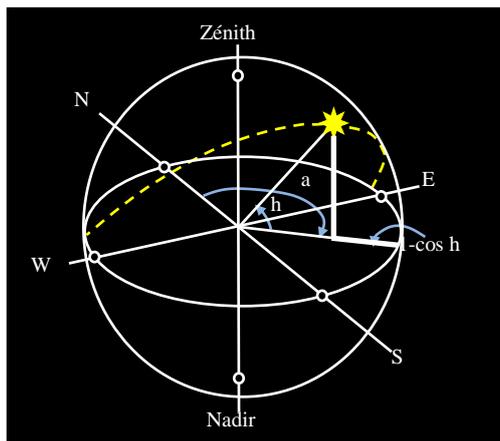


Figure 14 : Projection orthogonale
(Source : Auteur)

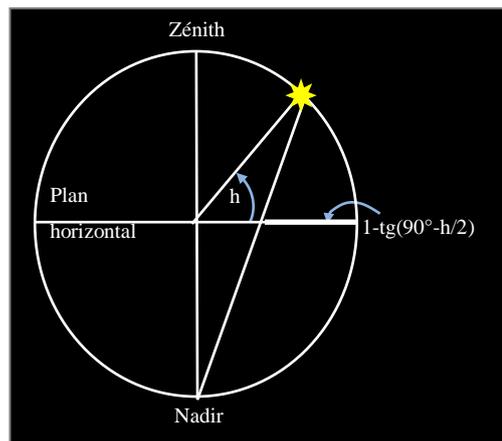


Figure 15 : Projection stéréographique
(Source : Auteur)

1.4.2.5. La projection sphérique équidistante

Cette projection présente plusieurs avantages, elle facilite les repères angulaires, ne pas déformer le voisinage du zénith, et surtout être compatible avec les photographies réalisées avec un objectif de type fish-eye pointé verticalement. En revanche les arêtes rectilignes des bâtiments deviennent courbes.

II. Les caractéristiques physiques de la lumière naturelle

II. 1. Le rayonnement et le spectre électromagnétique

Un rayonnement électromagnétique désigne une perturbation des champs électriques et magnétiques qui a comme vecteur le photon. En physique classique, il est décrit sous la forme d'une onde électromagnétique correspondant à la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique (l'un étant perpendiculaire à l'autre) en ligne droite à partir d'une source constituée par un mouvement alternatif de charges électriques. La décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en termes de fréquence, d'énergie des photons ou encore de longueur d'onde nous donne un spectre électromagnétique, ou la lumière visible constitue une petite tranche de ce large spectre .

Spectre électromagnétique : Radioélectricité Spectre ' radiofréquence' Bande VHF-UHFS' spectre micro-ondes															
Fréquence	9 KHz	1 GHz	300 GHz	3 THz	405 THz	480 THz	508 THz	530 THz	577 THz	812 THz	890 THz	750 THz	30 PHz	30 PHz	
Longueur d'onde	33 km	30 cm	1 mm	100 µm	745 nm	625 nm	590 nm	585 nm	520 nm	490 nm	435 nm	400 nm	10 nm	5 pm	
Bande	Ondes radio	Micro-ondes	térahertz	Infra rouge	rouge	orange	jaune	vert	cyan	bleu	violet	Ultra violet	rayons X	rayons Y	
		Rayonnement pénétrants		Lumière visible									Rayonnement ionisants		

Tableau 4: Domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence (Source: Auteur)

II. 2. Les Spectres lumineux (Light Spectrum)

Ce qu'on appelle lumière blanche ou solaire est la lumière usuelle, celle du jour. La lumière se décompose en plusieurs ondes qui ont différentes fréquences, et que l'œil l'aperçoit comme des couleurs : rouge, orange, jaune, verte, bleue et violette. Ces ondes forment un faisceau de bandes parallèles qu'on appelle le spectre lumineux. Les couleurs d'un arc-en-ciel sont les couleurs du spectre qui résulte de la décomposition de la lumière du soleil. Autrement dit, le spectre lumineux est la figure obtenue par la décomposition d'une lumière en radiations monochromatiques au moyen d'un système dispersif. Il constitue l'ensemble de toutes les vibrations du champ électromagnétique possibles. Il existe deux principaux types de spectre lumineux, le premier, est appelé le spectre d'émission qui est produit directement par la

lumière émise par une source. Le deuxième, c'est le spectre d'absorption qui est obtenu en analysant la lumière blanche qui a traversé une substance gazeuse ou liquide. La lumière visible par l'œil humain est une partie infime de toutes les vibrations du champ électromagnétique. Le spectre visible correspond aux longueurs d'ondes situées entre 400 nm (vu par l'œil comme la couleur violette) et 700 nm (la couleur rouge). Au-delà de ces longueurs d'onde, l'œil ne détecte plus la lumière.

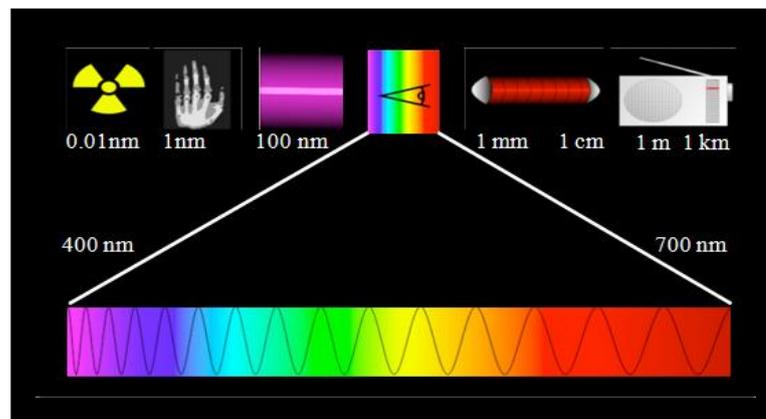


Figure 16 : La lumière visible par l'œil humain
(Source: Marcial CARDO-SABAN)

II. 3. Les phénomènes physiques de la lumière

II. 3. 1. La propagation de la lumière

La trajectoire de la lumière est rectiligne lorsqu'elle se propage dans un milieu homogène où il n'y a pas d'obstacle, le terme homogène signifie que le milieu traversé possède les mêmes propriétés en tout point. Si ce n'est pas le cas, elle n'est plus rectiligne. La propagation de la lumière dans un milieu transparent peut se faire de deux manières différentes et complémentaires; soit en terme de propagation d'une onde lumineuse ou la lumière se propage dans un milieu homogène dans toutes les directions sous forme d'une onde lumineuse sphérique, et en ligne droite, de la source de lumière vers l'objet éclairé si le milieu de propagation est homogène et transparent; soit en terme de rayons lumineux, qu'on peut la représenter en traçant la direction de propagation des ondes par des rayons perpendiculaires aux fronts d'onde. Contrairement au son, la lumière peut se propager dans le vide, elle parcourt alors dans des distances gigantesques avec une vitesse constante et universelle qui est égale à $300\,000\text{ km.s}^{-1} = 3,0.108\text{ m.s}^{-1}$.

La direction de propagation de la lumière peut uniquement être modifiée par réflexion, réfraction, diffraction ou diffusion :

II. 3. 1. 1. La réflexion

On dit qu'un rayon de lumière est renvoyé ou réfléchi, toutes les fois qu'en tombant sur une surface polie, il fait avec cette surface un angle égale à celui qu'il faisait de l'autre coté en arrivant. C'est-à-dire, quand il rencontre un objet, il va rebondir sur cet l'objet. Il existe trois formes de la réflexion, elle peut être spéculaire ou bien diffuse suivant la nature de l'interface. La réflexion est dite spéculaire lorsque la lumière est renvoyée selon un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence du rayon lumineux. Le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique. Idéalement, l'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi, en pratique une partie de l'énergie peut être absorbée ou diffusée au niveau de l'interface. La qualité de la réflexion dépend de la qualité de l'interface, dès que la taille des défauts de ce dernier est inférieure de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, l'interface tend à devenir parfaitement réfléchissante. Le deuxième mode dite la réflexion diffuse qui intervient sur les interfaces irrégulières, la lumière est réfléchie dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis. Cette diffusion permet de créer une source ponctuelle à partir du simple impact d'un seul rayon lumineux sur une surface diffusante, ce type de réflexion peut être une réflexion diffuse parfaite (la lumière réfléchie est distribuée dans toutes les directions) ou bien une réflexion diffuse quelconque (la lumière se répartit de manière aléatoire). Le dernier mode de réflexion est dite réflexion mixte ou la lumière est réfléchie de manière diffuse mais privilégie quand même une direction précise.

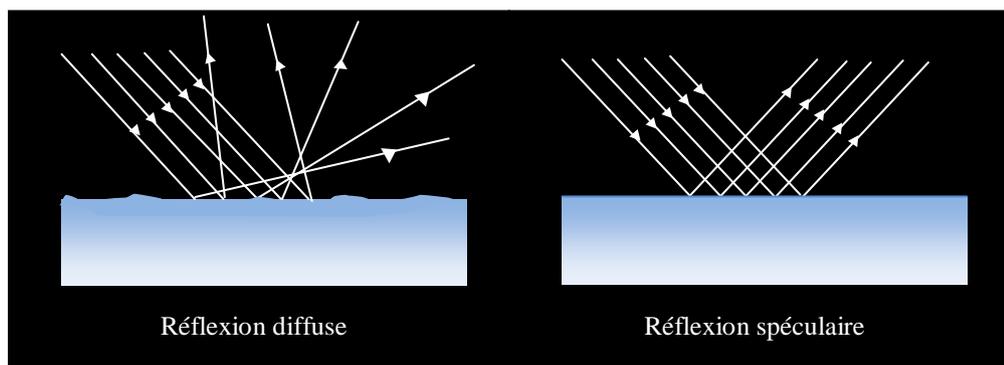


Figure 17 : Les deux types de réflexion
(Source: Auteur)

II. 3. 1. 2. La réfraction

Le phénomène de réfraction est le changement de direction lorsque le rayon lumineux traverse obliquement la limite séparant deux milieux avec différentes vitesses de propagation de lumière c'est-à-dire, la déviation d'une onde lorsque la vitesse de celle-ci change. Ces changements de direction obéissent aux lois de la géométrie optique de Snell-Descartes. Typiquement, cela se produit à l'interface entre deux milieux, ou lors d'un changement d'impédance du milieu. En traversant un prisme, la lumière blanche se décompose en ses différentes composantes colorées car l'angle de déviation du rayon lumineux dans un milieu transparent est d'autant plus grand que la longueur d'onde est plus petite.

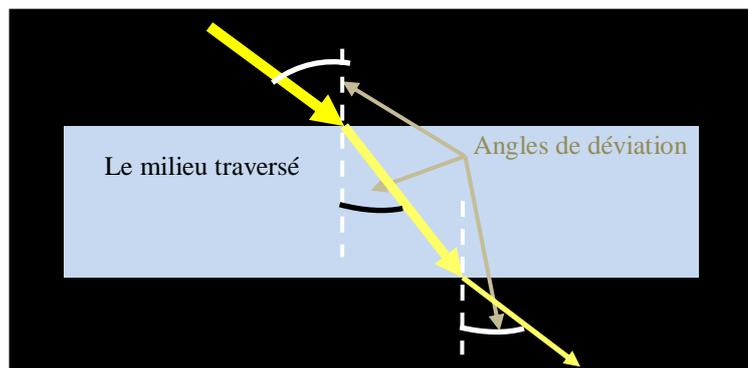


Figure 18 : La réfraction (Source: Auteur)

II. 3. 1. 3. La diffraction

On donne le nom de diffraction aux modifications et aux espèces de pénombres qu'éprouve la lumière lorsqu'elle passe auprès des extrémités des corps. Elle a lieu lorsque la lumière passe par des fentes étroites ou à côté de lames pointues, et qui dévie de la direction rectiligne et se tord. Les phénomènes de diffraction ne se produisent que lorsque la lumière rencontre des trous ou des obstacles dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde; le phénomène peut être interprété par la diffusion d'une onde par les points de l'objet.

II. 3. 1. 4. La diffusion

La diffusion est le phénomène par lequel un rayonnement, comme la lumière est dévié dans de multiples directions par une interaction avec d'autres objets. La diffusion peut être également répartie dans toutes les directions (isotrope) ou obéir à un patron de réémission bien particulier selon le milieu traversé (anisotrope). La diffusion peut avoir lieu à la

rencontre d'une interface entre deux milieux (dioptre), ou à la traversée d'un milieu. Lorsqu'un milieu transparent, comme l'air contient de petites particules de poussières, de fumée ou de fines gouttelettes d'eau, un rayon de lumière est diffusé par chacune de ces particules. L'œil d'un observateur qui ne reçoit pas directement ce rayon, reçoit une partie de la lumière diffusée par ces particules. Si le contraste est suffisant il verra l'ensemble de ces particules, qui sembleront former le faisceau de lumière, en réalité, l'ensemble des particules éclairées.

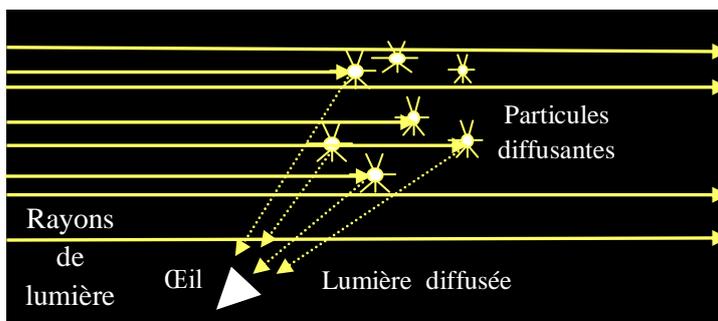


Figure 19 : La diffusion de la lumière par des particules diffusantes (Source: Auteur)

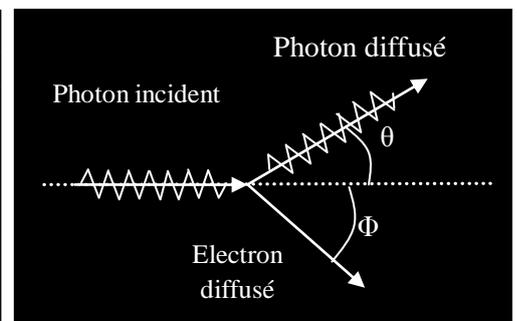


Figure 20 : Diffusion Compton (Source: Auteur)

II. 3. 1. 5. La dispersion

Suivant sa fréquence, le rayonnement électromagnétique interagit différemment avec la matière. Un des aspects de ce phénomène est la dispersion, c'est-à-dire la variation de l'indice de réfraction de la substance en fonction de la longueur d'onde. L'observation des faisceaux colorés émergeant d'un prisme éclairé en lumière blanche s'interprète en admettant cette loi de variation. Lorsqu'un rayon lumineux monochromatique traverse deux milieux d'indice de réfraction différents, sa trajectoire sera déviée suivant la loi de Snell-Descartes. Chacune des couleurs qui composent la lumière blanche sera déviée suivant son indice de réfraction. Il en résulte la dispersion des couleurs du rayon lumineux incident dans l'ordre de réfrangibilité, le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orange et le rouge.

II. 3. 1. 6. La polarisation

La polarisation est définie par l'orientation des vibrations selon une direction privilégiée, elle peut être causée par la réflexion ou la réfraction. Pour obtenir une onde polarisée dans un état donné on utilise des polariseurs de différents types dont les linéaires sont les plus utilisés, qui permettent de transformer la lumière incidente en lumière polarisée rectilignement, qui agissent

soit sur la lumière naturelle soit sur la lumière dans un état de polarisation. Les phénomènes lumineux peuvent, selon la théorie électromagnétique être considérés comme liés à la propagation simultanée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B , constamment perpendiculaires entre eux ainsi qu'à la direction de propagation, et dont les valeurs sont des fonctions sinusoïdales du temps. Lorsqu'on parle de lumière naturelle la polarisation n'est pas stationnaire, la lumière est émet en même temps sous forme des ondes lumineuses qui sont distribuées autour de l'axe de propagation avec une probabilité égale. Quand la lumière traverse un polariseur, le champ électrique ne peut plus vibrer que dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation, et la lumière sera polarisée rectilignement.

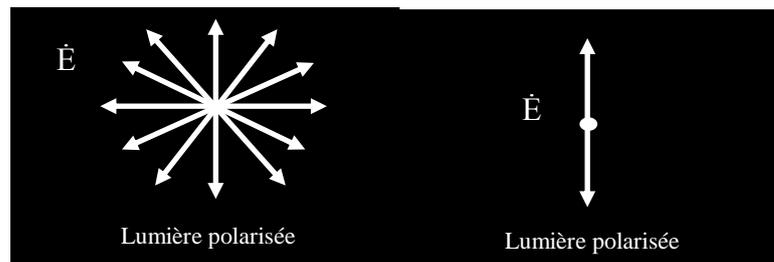


Figure 21 : La polarisation (Source: Auteur)

Cependant, on peut obtenir trois états de polarisation totale, la polarisation rectiligne dont l'extrémité du champ électrique E en un point donné de l'espace décrit un segment de droite, la polarisation circulaire qui décrit un cercle et la polarisation elliptique qui décrit une ellipse.

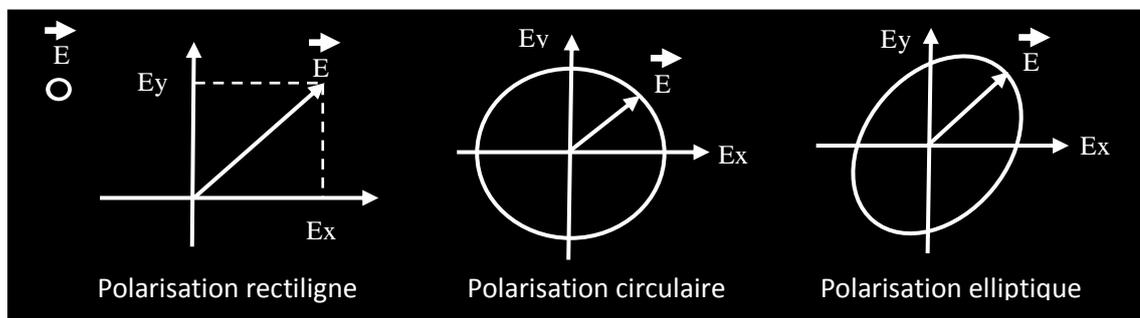


Figure 22: Les types de la polarisation (Source: Auteur)

II. 3. 1. 7. L'absorption

La lumière est porteuse de l'énergie qui peut être absorbée sur des objets matériels. Certains corps absorbent juste quelques fréquences du spectre électromagnétique. Les couleurs qu'on

voit ne sont pas contenues dans les objets mais dans la lumière à l'aide de laquelle on les voit. Une feuille verte est verte parce qu'elle absorbe toutes les couleurs sauf la verte qu'elle réfléchit. Les corps qui absorbent de petites quantités de lumière visible sont dits transparents. L'absorption constitue le phénomène par lequel tout matériau atténue toute onde électromagnétique le traversant, l'énergie absorbée est alors convertie en chaleur (Effet Joule).

II. 3. 1. 8. La transmission

La lumière traversant un corps translucide peut être partiellement absorbée par celui-ci et partiellement ou totalement transmise par cette matière. Dans un milieu homogène, la lumière se transmet en ligne droite. Si le milieu n'était pas homogène, et si la lumière le traversait dans une direction oblique aux surfaces de séparation des parties homogènes, nous verrons bientôt que le rayon changerait de direction à chaque passage d'une partie homogène dans la suivante, et que, s'il y avait continuité dans les changements de densité, la lumière parcourrait une ligne courbée. Il existe trois modes de transmission: la transmission directionnelle ou la lumière est transmise selon un angle égal à l'angle d'incidence du rayon lumineux, la transmission diffuse parfaite ou la lumière est distribuée dans toutes les directions ou transmission diffuse quelconque ou la lumière se répartit de manière aléatoire. Le dernier mode est la transmission mixte, dans ce type, la lumière est transmise de manière diffuse mais privilégie quand même une direction précise. Du point de vue de la transmission de la lumière, les corps se regroupent en trois catégories selon qu'ils sont transparents, translucides ou opaques à la lumière. La transmission lumineuse est aussi une propriété variable en fonction de l'épaisseur d'un matériau. Le coefficient de transmission lumineuse (Tl) est le pourcentage de rayonnement solaire visible transmis au travers d'une paroi.

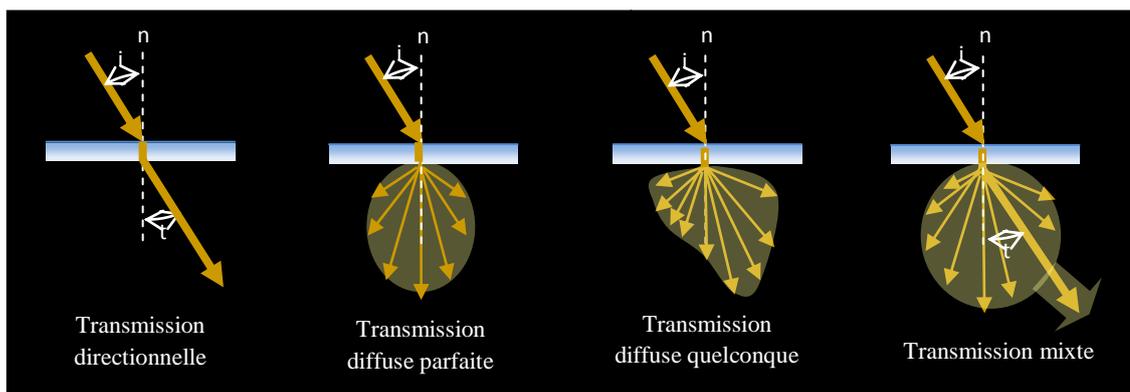


Figure 23 : Les types de la transmission (Source: Auteur)

III. Les grandeurs photométriques

III. 1. La photométrie

La photométrie, ou la mesure de la lumière et des phénomènes lumineux, est une des bases essentielles de l'éclairage. Le but de la photométrie est de quantifier les grandeurs relatives au rayonnement en fonction de l'impression visuelle produite. La photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la perception par l'œil humain. La plupart des appareils de mesure en photométrie, qui ne font pas intervenir directement l'œil en tant qu'élément sensible, sont étalonnés en fonction de la courbe de sensibilité relative de l'œil humain qui a été établie par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) à partir d'un grand nombre d'individus. Elle montre que la sensibilité maximale de l'œil humain en vision de jour se produit pour une longueur d'onde de 555 nanomètres. Cette courbe prend des valeurs non nulles pour des longueurs d'onde allant de 400 nanomètres à 700 nanomètres. En dehors de cette plage toutes les grandeurs photométriques seront nulles. La photométrie permet d'évaluer quantitativement les performances d'un éclairage ; elle est un domaine de la physique appliquée, dédié à la mesure du rayonnement visible. Les unités utilisées en photométrie sont dérivées des unités utilisées en physique. La base de ces unités est la courbe de sensibilité spectrale de « l'observateur de référence CIE ».

Il est difficile de parler objectivement de l'éclairage sans rappeler les quatre notions de base de la photométrie qui sont : l'intensité, le flux lumineux, l'éclairement et la luminance.

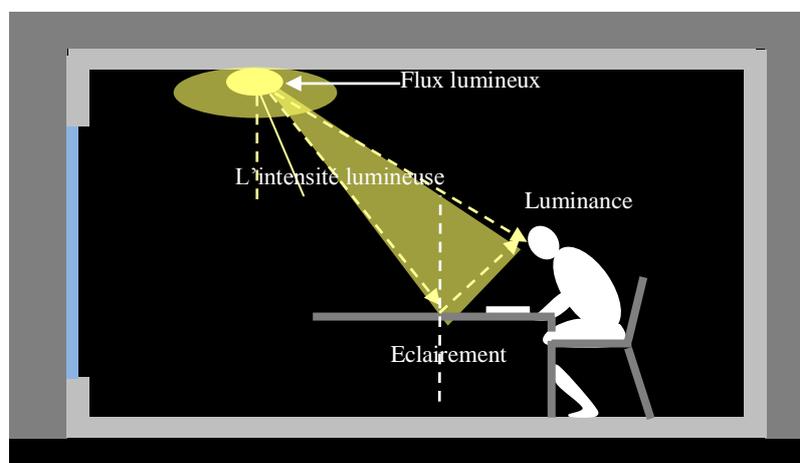


Figure 24: Les quatre notions de la photométrie
(Source: Auteur)

Ces quatre facteurs sont liés entre eux comme ceci : Une source d'éclairage naturelle ou artificielle rayonne dans toutes les directions de l'espace un flux lumineux dont l'unité est le lumen (lm). Ce flux, dans une direction donnée, a une certaine intensité exprimée en candelas (cd) ; une surface, placée à une distance donnée de la source, reçoit un éclairage qui s'exprime en lux (lx). Enfin, cette surface éclairée renvoie une partie de l'éclairage reçu en direction de l'observateur : c'est la luminance exprimée en candelas par mètre carré (cd/m²).

III. 1.1. Le flux lumineux

Le flux lumineux d'une source est l'évaluation, selon la sensibilité de l'œil, de la quantité globale de lumière rayonné dans toutes les directions de l'espace par cette source. Il s'exprime en lumen (lm). Le flux lumineux décrit la puissance lumineuse totale fournie par une source lumineuse. Cette puissance peut être systématiquement saisie dans l'unité Watt comme énergie fournie. L'effet optique d'une source lumineuse n'est cependant pas décrit correctement de cette manière, car le rayonnement fourni est saisi sans faire de différence dans l'ensemble de la plage de fréquence, et que la sensibilité spectrale différente de l'œil n'est ainsi pas prise en compte. En considérant la sensibilité spectrale de l'œil, on obtient la valeur Lumen. Un flux de rayonnement de 1 W fourni au maximum de la sensibilité spectrale de l'œil (diurne, 555 nm) produit un flux lumineux de 683 lm. Par contre, le même flux de rayonnement dans des plages de fréquence de moindre sensibilité produit des flux lumineux plus petits. Le flux énergétique visible est la puissance qu'une source émet sous forme de rayonnement visible. Ce flux énergétique visible est quantifié par l'œil sous forme de flux lumineux. Et par la connaissance de la valeur de ce flux énergétique, nous pouvons calculer son flux lumineux pour les longueurs d'ondes est déduire le flux totale rayonné.

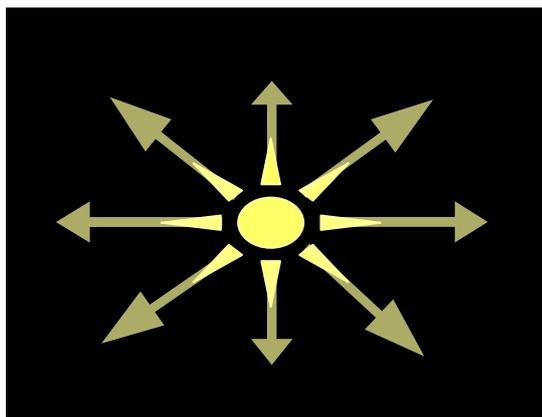


Figure 25 : Le flux lumineux (Source: Auteur)

III. 1.2. L'intensité lumineuse

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par unité d'angle solide dans une direction donnée. Elle se mesure en candela (cd). En photométrie, l'intensité lumineuse est une mesure de l'éclat perçu par l'œil humain d'une source lumineuse. Une source lumineuse ayant la même intensité lumineuse dans toutes les directions est dite à répartition isotrope. Son intensité lumineuse peut donc être calculée avec exactitude.

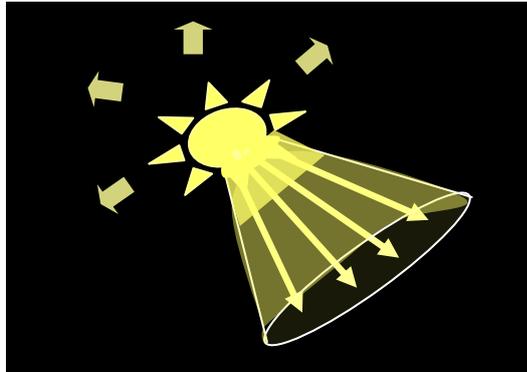


Figure 26 : L'intensité lumineuse (Source: Auteur)

III. 1.3. L'éclairement

L'éclairement d'une surface est le rapport du flux lumineux reçu à l'aire de cette surface. Son unité est le lux, équivalent à 1 lm/m^2 , il correspond à un flux lumineux de 1 lumen (lm) couvrant uniformément une surface de 1 mètre carré (m^2). L'éclairement dépend de l'intensité de la source lumineuse, de la distance entre la source et la surface éclairée et de son inclinaison par rapport aux rayons lumineux. L'éclairement caractérise donc la quantité de lumière reçue par une surface. L'échelle des niveaux d'éclairement disponibles naturellement est très étendue : elle varie de 0,2 à 100 000 lx. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs d'éclairement d'une surface horizontale extérieure.

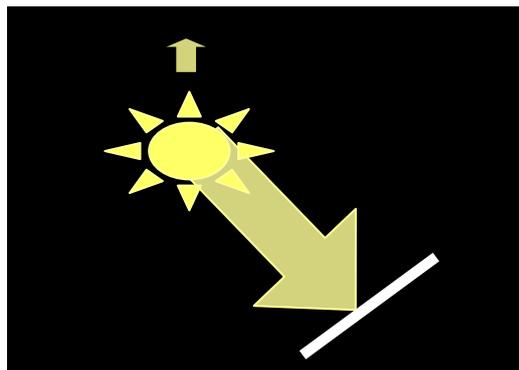


Figure 27 : L'éclairement (Source: Auteur)

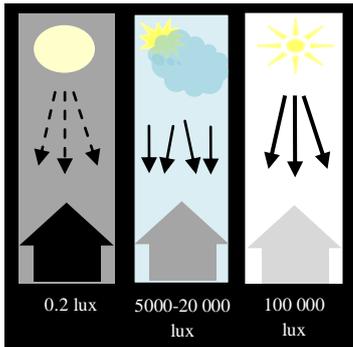


Figure 28 : L'éclairage
(Source: Auteur)

Source lumineuse	Eclairage (Ix)
Plein lune	0.2
Ciel couvert	5000 à 20 000
Ciel clair sans soleil	7000 à 24 000
Plein soleil d'été	100 000

Tableau 5 : L'éclairage des sources lumineuses
(Source: Sigrid Reiter et al.)

III. 1.4. La luminance

La luminance est la grandeur de photométrie la plus connue du grand public, c'est celle qui correspond le mieux à nos sensations visuelles. Elle exprime le niveau de luminosité qui est une donnée sensorielle sans tenir compte du débit de lumière. La luminance d'une source est le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans une direction et la surface apparente de la source lumineuse dans la direction considérée. Elle permet de quantifier l'impression lumineuse perçue par un observateur qui regarde une source de lumière. Elle s'exprime en cd / m^2 . Elle traduit la sensation visuelle de luminosité créée par une source lumineuse principale ou par une source secondaire. La luminance est la seule grandeur photométrique réellement perçue par l'œil humain. Elle dépend de l'éclairage de cette surface, de son coefficient de réflexion et de sa brillance. La luminance n'est pas liée à la taille de la surface lumineuse et n'importe quel rayon unique et très fin transporte toute la luminance.

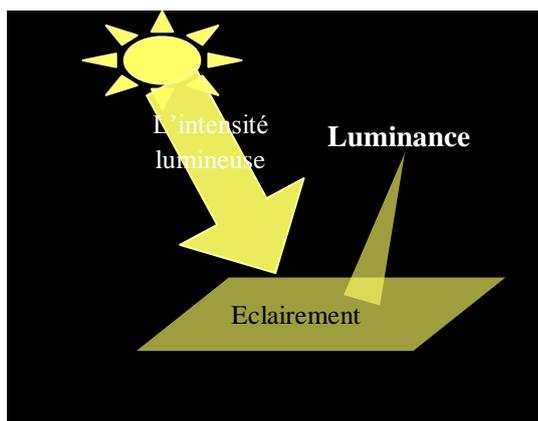


Figure 29 : La luminance (Source: Auteur)

La luminance est tout simplement la sensation visuelle qu'on a de la lumière. Il y a plusieurs facteurs qui influencent le niveau de luminance. En premier est l'intensité lumineuse de la source de lumière. Ensuite lorsque la luminance est renvoyée par une surface éclairée, tous les paramètres géométriques qui pondèrent plus ou moins la luminance. Et enfin, la coloration de la source lumineuse influence aussi le niveau de luminance.

III. 1.5. Le facteur de lumière du jour (FLJ)

En éclairage naturel, la notion d'éclairement est parfois remplacée par la notion de facteur de lumière du jour (FLJ). Le FLJ est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point d'un plan de référence (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé, par ciel couvert. Il s'exprime en %. Ces deux valeurs d'éclairement sont dues à la lumière reçue d'un même ciel dont la répartition des luminances est supposée ou connue, la lumière solaire directe étant exclut :

$$[\text{FLJ} = E \text{ intérieur} / E \text{ extérieur}] \quad (\%).$$

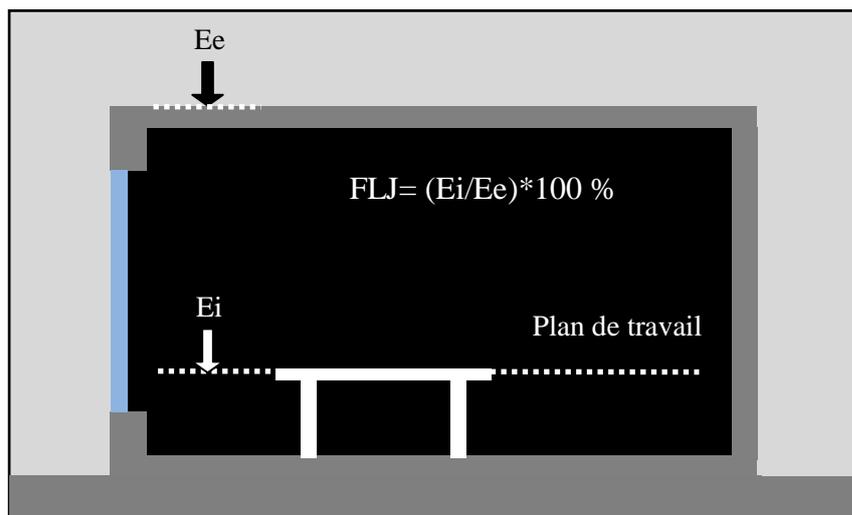


Figure 30 : Le facteur de lumière du jour (FLJ) (Source: Auteur)

Sous les conditions du ciel couvert (ciel normalisé par la Commission Internationale de l'Éclairage), les valeurs du FLJ sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison, de l'heure et de jour. Elles donnent ainsi une mesure objective et facilement

comparable de la qualité de l'éclairage à l'intérieur d'un bâtiment. Le tableau ci-dessous donne les différentes valeurs de FLJ :

FLJ	- de 1 %	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très élevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance environ 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			A proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

Tableau 6 : Ambiance et FLJ (Source: Dr. Magali Bodart)

Plus le facteur de lumière du jour est élevé, plus le temps d'utilisation des locaux avec la lumière naturelle est élevé, limitant ainsi la consommation d'éclairage artificiel.

• **Première estimation du Facteur de Lumière du Jour moyen**

A défaut de simulation informatique, il existe des formules approchées pour estimer le Facteur de Lumière du Jour moyen d'un local. Nous reprenons ci-dessous celle proposée par le BRE :

$$[\text{FLJ moyen} = \text{SF} \times \text{TL} \times a / (\text{St} \times (1 - \text{R} \times \text{R}))] \quad [1.8] \text{ [BRE]}$$

- Sf = surface nette de vitrage (= ouverture de baies moins 10% pour les châssis)
- TL = facteur de transmission lumineuse du vitrage, dont on déduit 10 % pour saleté.
- a = angle du ciel visible depuis la fenêtre, exprimé en degrés. Par exemple, il vaut 90° si aucun masque n'est créé par des bâtiments ou l'environnement en face de la fenêtre. Il vaut 60° si un bâtiment crée un ombrage entre le sol et les 30 premiers degrés (cas 2 ci-dessous).
- St = surface totale de toutes les parois du local, y compris celle des vitrages
- R = facteur de réflexion moyen des parois du local (prendre 0,5 par défaut).

II. 2. Les instruments de mesure

Dans la technique d'éclairage, on utilise une série de valeurs afin de pouvoir représenter quantitativement les propriétés des sources lumineuses ou leurs effets d'éclairage. Comme l'œil ne perçoit que des luminances, la meilleure évaluation de l'éclairage est la mesure des luminances, cependant, difficiles à évaluer. En pratique, les valeurs de référence recommandées pour l'éclairage sont celles de l'éclairement. L'instrument de mesure de l'éclairement en un point donné est le luxmètre. C'est l'appareil de mesure le plus utilisé en éclairage. Voici quelques appareils de mesure de l'éclairage :

III.2.1. Mesure de flux lumineux : On le mesure grâce au lumen mètre ou par une sphère intégratrice.

III.2.2. Mesure de l'intensité lumineuse : se fait par les récepteurs photométriques.

III.2.3. Le spectrophotomètre : qui détermine la distribution spectrale d'une source de lumière. Cet instrument permet également de découvrir les facteurs de réflexion ou de transmission spectrale des matériaux.

III.2.4. Mesure de l'éclairement : L'éclairement se mesure avec un luxmètre. C'est un appareil muni d'une cellule photoélectrique qui convertit l'énergie lumineuse en signal électrique, qui est ensuite amplifié et offre une lecture facile sur une échelle étalonnés de lux. Cet appareil se compose d'une tête de faibles dimensions qui délivre une tension électrique en fonction de la quantité de lumière reçue. Les têtes sont reliées par câble au système d'acquisition qui donne la valeur de l'éclairement mesuré. Il permettant de mesurer simplement et rapidement l'intensité lumineuse sur les lieux de travail, les postes de dessin, les bureaux, ateliers, halls d'exposition, stades etc. Le luxmètre permet de vérifier au plan de travail le niveau d'éclairement. On place la cellule de mesure au niveau des détails et des objets qui doivent être vus pour que la tâche puisse être exécutée, le travailleur étant à son poste dans sa position habituelle. Il permet aussi de déterminer l'éclairement moyen général dans le local, qui correspond à la moyenne des éclairements relevés en un certain nombre de points significatifs du local.



Figure 31 : Le luxmètre (Source: Auteur)

III.2.5. Mesure de la luminance : Un luminance mètres se présente comme une caméra. Cet appareil utilise un viseur, qui au moyen d'un jeu de miroirs (pour la visée) et d'un photomultiplicateur (pour la mesure) permet de mesurer en continu les valeurs de luminance en tout point. Le luminancemètre est placé à la hauteur des yeux des travailleurs et orienté dans la direction de la source lumineuse, du reflet ou de la surface concernée, pour mesurer la luminance.



Figure 32 : La luminance mètre
(Source: Dr. Magali Bodart)

IV. La stratégie de la lumière naturelle

IV. 1. La lumière naturelle et le bâtiment

La lumière naturelle joue un rôle essentiel sur la qualité du rapport entre le bâtiment et son environnement. L'occupant est au centre de cette interaction. La stratégie de la lumière naturelle a pour but de répondre aux exigences de confort des occupants. L'utilisation intelligente de la lumière naturelle dans le bâtiment permet, en outre, de réduire la consommation électrique consacrée à l'éclairage. La lumière naturelle reçue à l'intérieur d'un bâtiment est la résultante de trois composantes : la lumière directe due au ciel et éventuellement au soleil, déterminée par la partie de ciel visible à travers les ouvertures, la composante lumineuse due aux réflexions de la lumière sur les surfaces extérieures et, enfin, celle due aux réflexions à l'intérieur du local. La stratégie de la lumière naturelle doit tenir compte de ces trois composantes.

La lumière reçue dans un local = lumière directe+réflexions intérieures+réflexions extérieures.

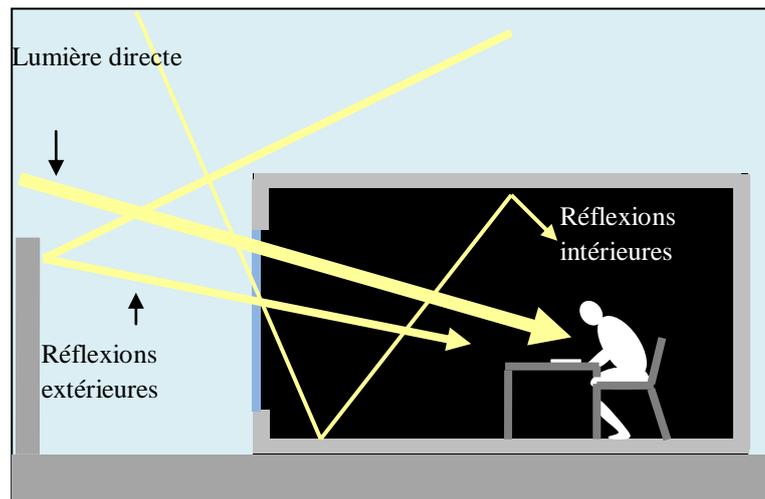


Figure 33 : Les trois composantes de la lumière naturelle
(Source: Auteur)

IV. 2. La stratégie de la lumière naturelle

La stratégie de l'éclairage naturel vise à mieux capter et faire pénétrer la lumière naturelle, puis à mieux la répartir et la focaliser. On veillera aussi à contrôler la lumière pour éviter l'inconfort visuel. L'utilisation intelligente de la lumière naturelle permet de réduire la

consommation électrique consacrée à l'éclairage. Choisir des teintes claires pour la décoration des murs et plafonds,... Créer des puits de lumière (coupoles, fenêtres de toit...) qui apportent un gain considérable de lumière naturelle,... La stratégie de la lumière naturelle est aussi l'étude de la relation entre la lumière naturelle et le bâtiment selon cinq concepts destinés à favoriser la meilleure utilisation possible de la lumière naturelle. Les cinq concepts qui permettent une meilleure stratégie de la lumière dans le bâtiment : 1- Capter, 2- transmettre, 3- distribuer, 4- se protéger, 5- contrôler :

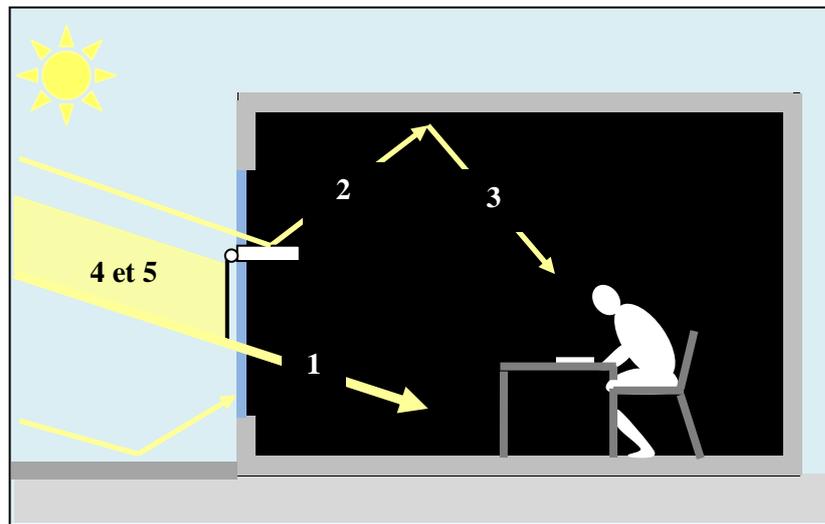


Figure 34 : La stratégie de la lumière naturelle (Source: Auteur)

IV.2.1. Capter: capter la lumière du jour consiste à la recueillir dans le but d'éclairer naturellement un bâtiment, ce qui nécessite de tenir compte de l'influence du type de ciel, du moment de l'année, de l'heure, de l'orientation et de l'inclinaison de l'ouverture ainsi que l'environnement physique de l'édifice (bâtiments voisins, type de sol, végétation...).



Figure 35 : Capter la lumière (Source: Auteur)

Dans un premier temps, une partie de la lumière du jour est transmise par les vitrages des portes et fenêtres à l'intérieur du bâtiment. La quantité de lumière captée dans un local dépend de la nature et du type de paroi vitrée, de sa rugosité, de son épaisseur et de son état de propreté. L'aménagement des abords peut aussi créer une barrière à la pénétration rasante du rayonnement d'hiver ou d'été, tout en laissant une large ouverture à la lumière du ciel. Inversement, des surfaces réfléchissantes au sol (dallage, plan d'eau...etc.) peuvent contribuer à capter la lumière.

IV.2.1.1. L'influence du type de ciel : La lumière naturelle traduit les fluctuations de l'état du ciel. Elle est composée de la lumière directe du soleil et de la lumière diffuse du ciel. Les stratégies à mettre en place pour accroître la luminosité intérieure d'un espace doivent tenir compte de cette différence. La lumière solaire directe dispense un flux considérable qui s'avère facile à capter et à diriger. Elle présente une dynamique intéressante et peut être utilisée en tant qu'énergie thermique. Par contre, le rayonnement solaire direct est souvent une source d'éblouissement et parfois de surchauffe du bâtiment. De plus, sa disponibilité est épisodique et dépend de l'orientation des ouvertures. La lumière diffuse de ciel est disponible dans toutes les directions. Elle suscite peu d'éblouissement et ne provoque pas de surchauffe mais elle peut être considérée comme insuffisante dans de nombreux cas. En outre, elle crée peu d'ombre et de très faibles contrastes.

IV.2.1.2. L'influence du moment de l'année : De l'été à l'hiver, le rayonnement solaire direct pénètre plus en profondeur dans le local mais le niveau d'éclairage à proximité de la fenêtre diminue progressivement.

IV.2.1.3. L'influence de l'heure : Par ciel avec soleil, la répartition lumineuse varie fortement d'une heure à l'autre et d'un point à l'autre du local. La lumière disponible augmente jusqu'à la mi-journée, puis diminue. Le rayonnement solaire direct induit une tache de lumière qui évolue, au cours de la journée, depuis le mur ouest du local vers le mur est.

IV.2.1.4. L'influence de l'orientation de l'ouverture : L'organisation spatiale d'un bâtiment devrait toujours être pensée en fonction du moment d'occupation des locaux, de l'activité qui s'y déroule et de la course du soleil. Il est préférable de placer les fenêtres de telle façon que le soleil puisse pénétrer à l'intérieur d'un local au moment où il est le plus utilisé. Ainsi, les

locaux essentiellement occupés le matin devrait toujours être orientés à l'est, ceux occupés dans le courant de la journée, au sud et ceux où l'on se tient en soirée, à l'ouest. Dans l'hémisphère nord, l'apport de la lumière naturelle est maximum sur la façade sud en hiver et en entre-saison. Par contre, en été, le rayonnement solaire est plus important à l'est pendant la matinée et à l'ouest durant l'après-midi. Les ouvertures orientées au sud offrent donc la meilleure situation puisqu'elles captent un maximum de rayons solaires en hiver et durant l'entre-saison qu'en été, il est plus facile de se protéger du soleil au sud puisqu'il est plus haut dans le ciel. La façade sud apparaît donc comme l'orientation privilégiée pour capter au maximum la lumière naturelle. Une orientation adaptée aux contraintes du bâtiment permet de réduire la consommation de chauffage et d'éclairage de ce dernier. Le bilan thermique d'une fenêtre classique peut en général être considéré comme un capteur de chaleur au sud et une surface déperditive au nord. Il est donc important de tenir attentivement compte de l'orientation d'un bâtiment pour déterminer la surface des percements des différentes façades. Lorsque le ciel est couvert, le rayonnement lumineux est diffusé dans toutes les directions. Les baies vitrées verticales captent donc la lumière naturelle de manière similaire, indépendamment de leur orientation. Par contre, lorsque le ciel est clair, l'orientation de la baie vitrée influence directement la quantité de lumière captée. Ainsi, une baie vitrée perpendiculaire aux rayons solaires captera beaucoup plus de lumière que les autres orientations.

IV.2.1.5. L'influence de l'inclinaison de l'ouverture : La surface à prendre en compte pour étudier la lumière disponible est le plan dans lequel s'inscrivent les limites de la fenêtre. Pour capter le maximum de rayonnement solaire direct, une ouverture doit être la plus perpendiculaire possible aux rayons solaires. En revanche, par ciel couvert, les performances d'une fenêtre sont avant tout liées à la portion de ciel visible depuis l'ouverture. Ainsi, une ouverture horizontale couvre une partie de ciel plus importante qu'une fenêtre verticale et apporte donc une plus grande part de lumière naturelle diffuse dans le local qu'elle éclaire. De même, une fenêtre oblique tournée vers le ciel offre déjà un flux lumineux diffus plus important que la fenêtre verticale. Les fenêtres de façade et les ouvertures zénithales ont un comportement radicalement divergent en ce qui concerne la sélection des pénétrations solaires. La lumière pénètre latéralement dans les locaux, ce qui peut créer des situations de contre-jour ou d'éblouissement à proximité des fenêtres. Cependant, les fenêtres latérales en façade sud transmettent un maximum de rayons solaires en hiver, ce qui favorise l'utilisation

des gains solaires, tout en limitant les pénétrations estivales et les surchauffe qu'elles induisent.

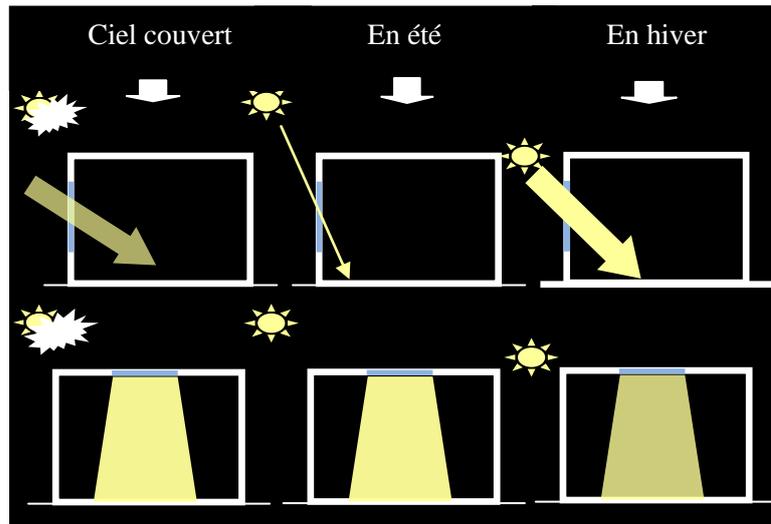


Figure 36 : Le rôle des ouvertures latérales (Source: Auteur)

Les ouvertures zénithales s'ouvrent sur la totalité de la voûte céleste; elles induisent une large pénétration de lumière diffuse. De plus, la lumière entre dans les locaux par le plafond, ce qui limite à priori les phénomènes d'éblouissement. Par contre, par ciel serein, les ouvertures zénithales captent mal les rayons solaires d'hiver alors qu'elles laissent largement pénétrer le soleil d'été, ce qui implique un mauvais comportement thermique.

IV.2.1.6. L'influence de l'environnement : Chaque lieu spécifique développe sa propre identité vis-à-vis de sa région et de son climat général. La topographie, la végétation, la nature du sol et l'urbanisme influencent entre autres les données météorologiques d'un lieu : chaque site est caractérisé par un microclimat. Dès lors, travailler l'architecture d'un bâtiment en faisant abstraction de son environnement paraît impensable. La lumière disponible dépend de l'environnement direct du bâtiment par le jeu de différents paramètres : le relief du terrain, les constructions voisines, le coefficient de réflexion du sol, la végétation, etc. Lors de la conception d'un bâtiment, il est donc important de mesurer l'impact de l'environnement existant sur le nouvel édifice afin de profiter au mieux des possibilités offertes par le terrain pour capter la lumière. Le relief du terrain peut provoquer de l'ombre sur un bâtiment ou au contraire favoriser son ensoleillement. Il faut prendre en compte les caractéristiques naturelles du site et tirer profil et profil du terrain, que l'on pourra au besoin remanier localement.

On appelle masque solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface que l'on désire ensoleiller. En ville, en hiver, il est parfois difficile de capter quelques rayons solaires à cause des bâtiments voisins qui leur font écran. La quantité d'énergie solaire reçue en un endroit dépend souvent de l'ombrage des bâtiments avoisinants.

Pour profiter au maximum de la lumière naturelle, il importe de ne pas négliger le facteur de réflexion des surfaces extérieures environnant le bâtiment. En effet, des surfaces claires et réfléchissantes augmentent la quantité de lumière qui peut pénétrer dans le bâtiment. Des surfaces réfléchissantes placées au sol telles qu'un dallage brillant ou un plan d'eau peuvent contribuer à capter davantage de lumière. Ainsi, l'eau, en réfléchissant le ciel et l'environnement, intensifie l'impression lumineuse d'un lieu. Des éléments liés au bâtiment lui-même, tels que des murs de refonds, des surplombs, des light shelves,...peuvent aussi provoquer un ombrage en fonction de leur taille, de leur réflectivité et de leur orientation. La mise en place d'auvent ou de surplombs fixes destinés à réduire les problèmes d'éblouissement et de surchauffe pénaliseront bien sur la quantité de lumière captée par le bâtiment. 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. Elle se contente de filtrer la lumière plutôt que de l'arrêter.



Figure 37 : Le rôle de végétation
(Source: Auteur)



Figure 38 : Le système light shelf.
(Source: ENERGY EFFICIENCY MANUAL,
CONTROL AND USE OF SUNLIGHT)

IV.2.2. Transmettre : Transmettre la lumière du jour consiste à favoriser sa pénétration à l'intérieur d'un local. La pénétration de la lumière dans un espace peut être influencée par les caractéristiques de l'ouverture telles que ses dimensions, sa forme sa position et le matériau de transmission utilisé ainsi que par les dimensions du local et son aménagement intérieur.



Figure 39 : Transmettre la lumière (Source: Auteur)

La pénétration de la lumière dans un bâtiment produit des effets de lumière très différents non seulement suivant les conditions extérieures (type de ciel, saison, heure du jour et dégagement du site) mais aussi en fonction de l'emplacement, l'orientation, l'inclinaison, la taille et le type des vitrages. L'éclairage latéral fournit une lumière dirigée, qui souligne généralement le relief, mais limitée en profondeur, contrairement à l'éclairage zénithal qui est plus uniforme.

IV.2.2.1. Les caractéristiques de la fenêtre : Les fenêtres sont amenées à jouer un rôle majeur dans le confort visuel et l'équilibre thermique des bâtiments. L'ouverture en façade est de loin le composant le plus employé pour transmettre la lumière naturelle dans les édifices. Il ne faut donc pas perdre de vue que les performances lumineuses d'un bâtiment sont principalement induites par les caractéristiques de ces fenêtres latérales. Leurs dimensions, leur forme et leur matériau dont elles sont constituées se révèlent donc des éléments essentiels pour la quantification et la qualification de la pénétration de la lumière dans un édifice.

IV.2.2.2. Les dimensions de l'ouverture : La taille des ouvertures est un élément déterminant de la quantité de lumière extérieure qui parvient à l'intérieur des locaux. Pour maximiser les apports de lumière naturelle, on peut augmenter la prise de contact avec l'extérieur en créant des décrochements, des subdivisions, ...etc.

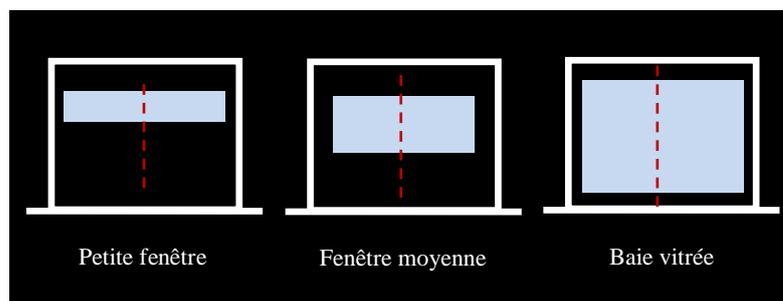


Figure 40 : Les dimensions de l'ouverture (Source: Auteur)

Les huit configurations présentées dans la figure suivantes sont classées en fonction de leur capacité à transmettre la lumière naturelle dans un local. On constate que la première configuration (S1) correspond à la meilleure situation du point de vue de la transmission lumineuse. La quantité de lumière reçue au centre de l'espace est d'autant moins bonne que la façade se trouve loin dans cette sélection.

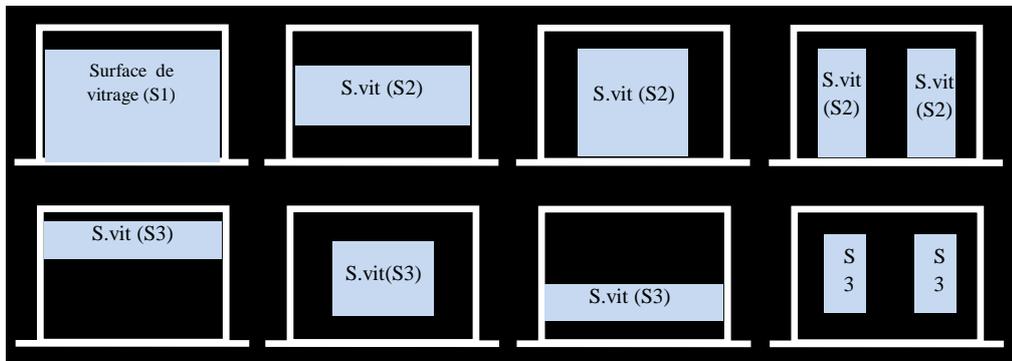


Figure 41 : Les dimensions de l'ouverture (Source: Auteur)

IV.2.2.3. La forme de l'ouverture : Nous pouvons étudier l'influence de la forme de la fenêtre en comparant la répartition lumineuse fournie par une série de fenêtres de proportion différentes, pour une surface vitrée identique et une hauteur de l'allège constante.

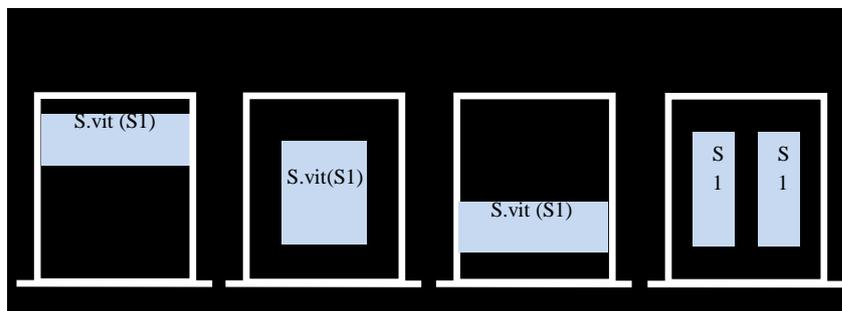


Figure 42 :L'influence de la forme de l'ouverture (Source: Auteur)

Lorsque la largeur de la fenêtre diminue, la répartition devient moins uniforme, bien que l'éclairage moyen soit pratiquement le même dans les tous les cas étudiés. Par contre, l'éclairage du fond du local augmente avec la hauteur de fenêtre. Pour une même surface vitrée, une fenêtre haute éclaire mieux en profondeur. L'idéal réside donc dans une fenêtre horizontale et élevé.

IV.2.3. Distribuer/Répartir: La difficulté d'utilisation de la lumière naturelle par rapport à la lumière artificielle réside dans la grande inhomogénéité des éclairagements qu'elle induit en général. La répartition de la lumière représente un facteur clé pour assurer un bon éclairage. La distribution de la lumière naturelle vise, selon les cas, la répartition uniforme de cette lumière dans le local (grâce à la géométrie du local, à la couleur claire des parois, à la largeur des baies vitrées) ou, au contraire, la focalisation de la lumière en un point particulier, en jouant sur le type de distribution lumineuse, la répartition des ouvertures, l'agencement des parois intérieures, le matériau des surfaces du local, les zones et les systèmes de distribution lumineuse .



Figure 43 : Distribuer/répartir (Source: Auteur)

La lumière se réfléchit d'autant mieux sur l'ensemble des surfaces intérieures des locaux que le rayonnement ne rencontre pas d'obstacles dus à la géométrie du local ou au mobilier, et que les revêtements des surfaces sont mats et clairs. Elle peut également être diffusée par le type même du vitrage utilisé (translucide) ou par des systèmes de réflecteurs, qui permettent à la lumière de gagner le fond du local. Distribuer la lumière naturelle consiste donc à diriger et à transporter les rayons lumineux de manière à créer une bonne répartition de la lumière naturelle dans le bâtiment.

Cette répartition peut être favorisée par différentes approches basées sur :

- Le type de distribution lumineuse (direct, indirecte),
- La répartition des ouvertures,
- L'agencement des parois intérieures,

- Le matériau des surfaces du local
- Les zones de distribution lumineuse
- Les systèmes de distribution lumineuse

IV.2.4. Se protéger : Pour atteindre le confort visuel, il est essentiel de se protéger dans certains cas de la lumière naturelle surtout si elle constitue une source d'éblouissement. Cette protection sert à arrêter partiellement ou totalement le rayonnement lumineux lorsqu'il présente une source d'inconfort visuel pour les occupants et gêne les utilisations à l'intérieur d'un local. On se protège de la lumière naturelle par l'utilisation des protections solaire telles que la végétation, les auvents, les écrans mobiles ou les vitrages spéciaux. Une protection solaire est tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée. Pour que cette protection soit efficace il faut bien étudier leurs choix et leurs emplacements. Son fonctionnement est basé sur des phénomènes physiques tels que l'absorption (surplombs, mur de refends, ...), la réflexion (light shelves, bright shelf, conduits de lumière ...), la réfraction (prismes, vitrages directionnel...) et la diffraction (éléments holographiques, ...).

De nombreux types de protections solaires existent, elles sont classées de deux manières différentes, soit en fonction de leur position par rapport au vitrage (intérieure, en interface ou extérieure), soit de leur mobilité ; on distingue alors, les protections permanentes (vitrages spéciaux, films autocollants), fixes (auvents, avancées architecturales), mobiles (stores extérieurs, volets). Le choix d'une protection solaire doit se faire en fonction de l'orientation de la fenêtre. Si possible, elle maintiendra la possibilité de bénéficier d'une lumière naturelle suffisante.

IV.2.5. Contrôler : Pour éviter la pénétration excessive de lumière naturelle dans le bâtiment qui peut être une cause de gêne visuelle (éblouissement, fatigue) il faut qu'elle soit contrôlé par la construction d'éléments architecturaux fixes (surplombs, bandeaux lumineux ou light shelves, débords de toiture, etc.) associés ou non à des écrans mobiles (volets, persiennes ou stores) ou par des méthodes et des systèmes de gestion de l'éclairage qui fonctionnent de manière automatique ce qui permet une gestion intelligente de l'éclairage dans le bâtiment.



Figure 44 : Contrôler la lumière (Source: Auteur)

Le contrôle de la lumière naturelle consiste à gérer la quantité et la distribution de la lumière dans un espace en fonction de la variation des conditions climatiques et des besoins des occupants. La gestion de l'éclairage dans le bâtiment permet, d'une part, de répondre à la variation continue de la lumière naturelle et, d'autre part, d'adapter l'ambiance lumineuse d'un local pour correspondre au mieux aux besoins de ses utilisateurs. On peut diviser les solutions de contrôle de l'éclairage naturel en trois catégories: soit par l'utilisation de systèmes d'éclairage naturel adaptables, tels que des éléments de contrôle amovibles, soit par le zonage de l'installation d'éclairage artificiel en fonction de la lumière naturelle disponible ou bien par la régulation du flux des lampes en fonction de la présence de lumière naturelle. De plus, des économies d'énergie appréciables peuvent être réalisées grâce à la diminution de l'éclairage artificiel, par la prise en compte de la disponibilité de l'éclairage naturel, en adaptant le temps durant lequel l'éclairage artificiel est utilisé et leurs flux lumineux aux besoins d'éclairage d'un local.

IV.2.6. Focaliser : Il est parfois nécessaire de focaliser l'apport de lumière naturelle pour mettre en valeur un lieu ou un objet particulier. Un éclairage zénithal - ou latéral haut - crée un contraste lumineux important avec l'éclairage d'ambiance, moins puissant. Un atrium au centre d'un bâtiment permet aussi à la lumière du jour de mieux pénétrer dans le bâtiment tout en créant un espace de circulation et de repos attrayant. Des bâtiments hauts et profonds peuvent ainsi recevoir la lumière naturelle en leur cœur par le biais de conduits lumineux.

Conclusion

L'histoire de l'architecture accorde une place prépondérante à la lumière dans l'architecture. La lumière est l'élément essentiel qui nous permet de percevoir les objets architecturaux, de l'extérieur comme de l'intérieur, jour et nuit, ..., Elle peut être considérée comme une quatrième dimension avec le temps car elle peut générer des changements qui aboutissent à plusieurs lectures. Ces changements peuvent transformer le bâtiment de l'extérieur et ceci va à son tour influencer la quantité de lumière reçue à l'intérieur de l'espace. Cette quatrième dimension, temps et lumière, permet au projet architectural de gagner plus d'identité et d'avoir des intérêts positifs. La lumière est indissociable de l'architecture. Elle définit chaque espace dans son rapport avec l'extérieur, depuis sa source et par les ouvertures. L'architecture continue d'évoluer avec la lumière. La lumière révèle les formes, les volumes, les textures, les couleurs, les matières, et permet aux bâtiments de s'intégrer pleinement dans leur site. L'étude de tous ses aspects est prépondérante dans les phases d'esquisse et de recherche et lors de la conception d'un bâtiment. La relation entre la lumière et l'architecture permet d'approcher des notions de choix de matériaux et de techniques de construction, d'implantation et de rapport à l'environnement, d'ambiances, de symbolismes ou de préoccupations très actuelles comme les économies d'énergie et le développement durable. Le travail de l'architecte sur la lumière est très important : il doit garantir le confort visuel des occupants ainsi qu'une bonne qualité de l'espace. Pour cela, la lumière est devenue un élément de conception architecturale.

Donc, la lumière du jour constitue une ressource naturelle et inépuisable qui peut, lorsqu'elle est utilisée de manière intelligente et appropriée, assurer le confort visuel, accroître le facteur de productivité d'un espace, améliorer considérablement son esthétisme et réduire de beaucoup les coûts énergétiques. A l'inverse, une mauvaise utilisation de cette lumière peut avoir des effets inverses et amener les occupants à vouloir exclure la lumière du jour de diverses manières, à savoir, par des rideaux ou l'élimination des ouvertures tout en recourant à l'énergie électrique, chose qui annule les bienfaits qu'elle offre. Actuellement, il existe plusieurs techniques et logiciels qui vont l'aider pour concevoir un bon éclairage qui s'adapte avec les besoins quantitatifs et qualitatifs de la lumière afin de maintenir les occupants dans un état de confort visuel et d'ambiance lumineuse agréable.

Chapitre II

Le confort visuel et l'ambiance lumineuse dans l'espace architectural

Introduction

L'éclairage a un effet profond sur la vie des êtres humains. Il facilite la vision qui est notre source d'informations la plus importante sur le monde et il affecte notre fonctionnement biologique. La plupart des renseignements que nous obtenons grâce à nos sens, nous les obtenons par la vue, soit près de 80%. C'est l'homme et sa perception qui décident si un éclairage est efficace ou non. Indépendamment de son efficacité technique, une lumière qui éblouit, entamant la capacité visuelle et le bien-être, représente toujours une perte d'énergie. Par rapport à ces sources de lumière aveuglantes, même les zones fortement éclairées apparaissent alors relativement sombres. Une lumière confortable, non éblouissante, offre au contraire des conditions de perception optimales et un confort pour l'œil humain. Elle permet de recourir à des éclairages plus faibles et de créer des contrastes subtils, tout en faisant d'énormes économies d'énergie. La lumière du jour restant sans égal, il est important de choisir la configuration des pièces, l'emplacement et les dimensions des ouvertures de sorte que l'éclairage électrique ne soit utilisé qu'en appoint de l'éclairage naturel. La lumière naturelle peut éclairer un espace de manière directe ou indirecte, latérale ou zénithale. Elle peut également être contrôlée ou filtrée. Elle permet aussi d'assurer le confort visuel et de réaliser une ambiance lumineuse agréable. Elle contribue grandement à l'effet que produit un espace sur les personnes qui l'occupent, comme la sensation de gaieté ou de tristesse qui dépendent du niveau d'éclairage. Les niveaux élevés d'éclairage sont considérés comme gais et capables de stimuler la vigilance et l'activité des personnes. Les faibles niveaux d'éclairage tendent à créer une atmosphère de détente et de repos. Il peut être ressenti comme doux ou dur, comme une lumière douce ou diffuse qui atténue les ombres portées et crée un environnement visuel reposant. Une lumière dure ou directionnelle peut produire des réflexions et des ombres qui accentuent le relief et la forme des objets. Donc, l'éclairage doit assurer à la fois la visibilité des objets et des obstacles, la bonne exécution des tâches sans fatigue visuelle exagérée et une ambiance lumineuse agréable qui correspond aux exigences de l'espace.

I. La perception de la lumière

I. 1. La lumière et la vision

L'importance de la vision pour l'être humain est énorme puisque son absence ne lui permet plus d'appréhender le monde qui l'entoure. Plusieurs philosophes ont souligné que la perception visuelle est la manière à la fois la plus directe et la plus immédiate pour accéder à la réalité [Talmenssour, 2007:143]. Plus que tout autre sens, la vision semble dominer notre vie mentale [Thuan, 2007:21] et la lumière qui y sert de support incontournable est aussi une constante existentielle et expérientielle de l'homme. Ce rôle exceptionnel renforce énormément l'illusion de l'universalité. La lumière est une source d'énergie inépuisable qui produit des effets visuels et influence de manière considérable l'humeur et l'esprit des êtres humains. Les variations horaires et saisonnières de l'intensité et de la couleur de la lumière du jour sont un élément dynamique stimulant. La luminosité et la vue donnent une impression d'espace. Plus les espaces sont éclairés naturellement, plus ils permettent des usages multiples et assurent à nos yeux un certain degré de confort visuel. Par ailleurs, un mauvais éclairage naturel peut provoquer de la fatigue, des douleurs oculaires, des maux de tête, des mauvaises postures. D'autre part, la lumière désigne les ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain qui ne perçoit qu'une infime partie du spectre émis par le soleil. L'œil est notre récepteur de la lumière même si son fonctionnement est spécifique. La vue est un élément essentiel dans la vie de l'être humain. Elle lui permet de percevoir en permanence le monde extérieur. C'est aussi le moyen privilégié de la connaissance et de l'éducation puisque les quatre cinquième (80%) de ce que nous mémorisons dépendent de ce que nous voyons. Le schéma suivant montre les composantes de l'œil humain:

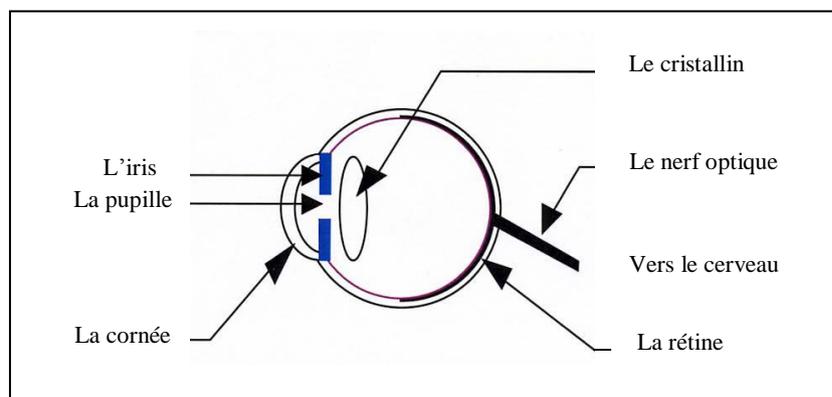


Figure 45 : coupe sur l'œil humain (Source : Le périscope. Centre de développement pédagogique périscope)

L'œil humain est composé d'un ensemble de composants optiques comprenant la cornée, l'iris, la pupille, les humeurs aqueuses et vitreuses, le cristallin et la rétine. Ces éléments travaillent pour former les images des objets qui se situent dans le champ visuel de la personne.

I. 2. Le mécanisme de la vision

La vision est le sens dédié à la perception de la lumière, autrement dit, la partie dite visible du rayonnement électromagnétique soit, pour l'œil humain, les longueurs d'onde comprises entre 350 et 750 nm. La vision fait intervenir de nombreux éléments, aussi bien des yeux que du cerveau. Le mécanisme de la vision est complexe et se fait en deux étapes : la perception des rayons lumineux puis leur interprétation par le cerveau qui reçoit les images, les analyse et les identifie. Ce mécanisme met en jeu plusieurs phénomènes physiques (formation de l'image sur la rétine), physiologiques (transmission de l'image formée en signaux codés transmis au cerveau) et psychophysiologiques (transformation des signaux codés en perception visuelle qui fait appel à différents types de mémoires (vue, toucher, goût, odorat...)).

L'œil perçoit les ondes émises par une source lumineuse. La vue commence lorsque la lumière réfléctée d'un élément extérieur entre dans l'œil. La cornée oriente ces rayons lumineux vers le centre de l'œil et les fait pénétrer par la pupille. Son ouverture est grande de façon à laisser pénétrer plus de lumière. La lumière traverse le cristallin, une lentille biologique, qui nous assure d'avoir une image nette au fond de l'œil. L'iris, en se rétrécissant ou s'agrandissant, contrôle la quantité de lumière reçue : moins il y a de lumière, plus la pupille, l'orifice central qui le perce, sera dilatée. Puis après, l'image se forme sur la rétine au fond de l'œil qui focalise la lumière et transforme les rayons lumineux en stimulations physiologiques le long du nerf optique. La rétine, membrane multicouche, contient des millions de cellules sensibles à la lumière (cônes et bâtonnets). Des bâtonnets, pour distinguer les lumières de faible intensité (voire nocturnes), des cônes, pour percevoir les lumières vives et différencier les couleurs primaires qui permettent la vision des détails, des couleurs et des contrastes. La rétine agit comme un numériseur et transforme l'image en influx nerveux. L'image est ensuite transmise au cerveau par le nerf optique. Le cerveau l'interprète et nous permet de voir.

Le schéma suivant illustre le phénomène de la vision qui fait intervenir les différents composants de l'œil humain :

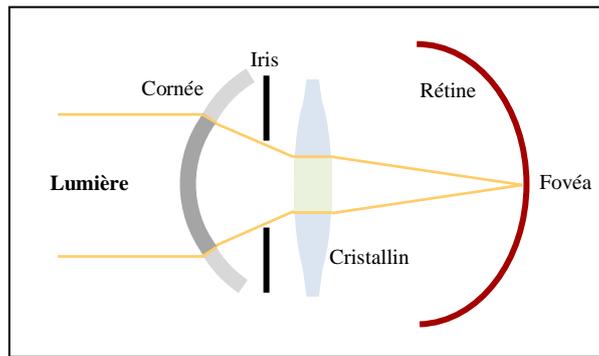


Figure 46 : Le mécanisme de la vision (Source : Auteur)

Trois facteurs commandent l'excitation de la rétine :

- La longueur d'onde : c'est la partie du spectre visible par l'œil humain (entre 380 et 780 nm).
- L'intensité : pour qu'une lumière soit perçue, il faut que son intensité lumineuse soit supérieure à un certain seuil limite.
- La durée : pour qu'un éclat lumineux soit perçu, il faut que sa durée soit au minimum de un millionième de seconde.

La sensibilité de l'œil n'est pas constante selon la longueur d'onde de la radiation perçue. Cette sensibilité a une forme de cloche avec un maximum de sensibilité dans le vert-jaune à 555 nm et deux minima dans le bleu et le rouge. Lorsque l'intensité de l'éclairage diminue, la sensibilité de l'œil se décale vers le bleu. La figure ci-dessous donne la courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain. Elle montre bien, qu'en vision diurne, l'œil humain présente une sensibilité maximale aux environ de 555 nm.

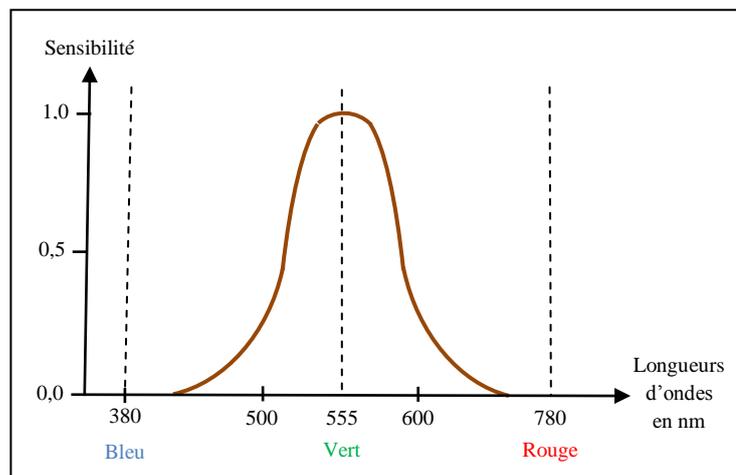


Figure 47 : Courbe de sensibilité de l'œil normalisé par la CIE (Source : CIE)

I. 3. La perception de la lumière

La vision humaine est un processus très complexe qui n'est pas encore totalement compris aujourd'hui malgré des centaines d'années d'études et de modélisation. Le processus de la vision implique l'interaction quasi-simultanée des deux yeux et du cerveau au travers d'un réseau de neurones, de récepteurs et d'autres cellules spécialisées. La première étape de ce processus est la stimulation des récepteurs de lumière situés dans les yeux, la conversion du stimulus lumineux ou des images en signaux et la transmission de ces signaux électriques contenant l'information de la vision depuis chaque œil vers le nerf optique. Cette information est traitée en plusieurs étapes pour atteindre finalement le cortex visuel du cerveau. La perception visuelle, c'est l'excitation de la matière rétinienne qui met en jeu une réaction photochimique où le couplage se fait par une interaction électrique entre l'onde électromagnétique et le récepteur.

I. 3. 1. Le champ visuel

On ne peut pas parler de la perception visuelle sans parler du champ visuel qui est la capacité de l'œil à saisir une information visuelle qui dépend de sa position relative dans le champ visuel. Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'œil, sans bouger la tête. Sachant que le champ visuel est légèrement différent pour chaque individu, la portée verticale des yeux couvre un angle d'environ 130°; elle est limitée vers le haut par les arcades sourcilières et vers le bas par les joues. Le champ horizontal total des yeux est d'environ 180° lorsqu'ils sont dirigés vers un objet fixe.

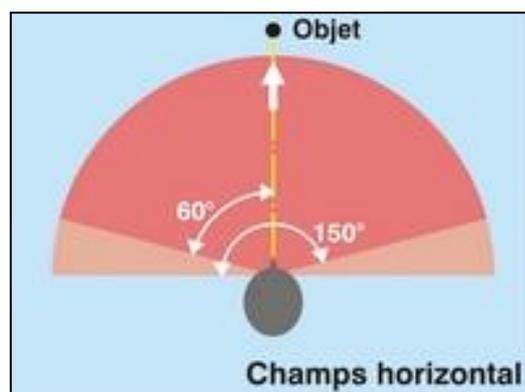


Figure 48 : Le champ visuel
(Source : Magali Bodart et al.)

Chaque œil a un angle de vision d'environ 150°. A l'endroit où les champs visuels se recouvrent, l'homme a une vision binoculaire; ils se superposent dans la zone médiane où un même objet est vu simultanément par les deux yeux mais sous un angle différent. La capacité de l'œil à saisir une information visuelle dépend de sa position relative dans le champ visuel.

Le graphe suivant montre en bleu le champ visuel perçu simultanément par les deux yeux et en rose clair le domaine vu par chaque œil séparément. Les cercles concentriques délimitent la fovéa, l'ergorama et le panorama. La fovéa est un champ visuel assez restreint de 2° qui nous permet de percevoir les détails et plus nous nous éloignons de ce champ central, plus les détails sont difficilement perceptibles. L'ergorama est un champ visuel de 30° par rapport à l'axe de vue et il nous permet de distinguer les formes. Alors que le panorama est un champ visuel de 60° par rapport à l'axe de vue qui nous permet de distinguer les mouvements.

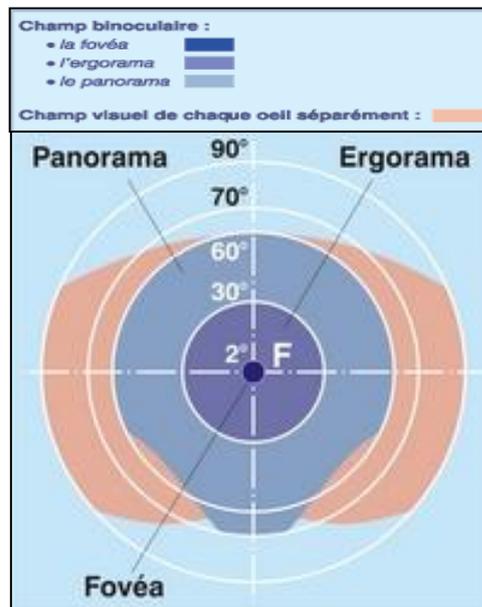


Figure 49 : Le champ visuel
(Source : Magali Bodart et al.)

I.3.2. La perception des couleurs

La couleur apporte une dimension supplémentaire à l'éclairage. Les comportements humains sont en effet influencés par les réponses émotionnelles à l'environnement et la couleur est l'un des facteurs principaux de sa perception. La couleur d'un objet dépend de la lumière qui l'éclaire : la couleur bleu est une couleur froide (riche en radiations bleues) tandis la couleur

rouge est une couleur chaude (riche en radiations rouges). En outre, il faut savoir qu'une pièce est d'autant plus éclairée que les surfaces qui réfléchissent la lumière sont claires. Pour l'œil humain, la couleur est une sensation. Les récepteurs de l'œil servent à décomposer les informations lumineuses en signaux électriques qui seront envoyés au nerf optique puis au cerveau. Le système récepteur de l'œil (la rétine) est formé d'un ensemble de cônes et de bâtonnets : les premiers étant très sensibles à la lumière sont responsables de la perception des couleurs (bleu, vert, rouge). Les seconds, 100 à 500 fois plus sensibles que les cônes, nous permettent de voir dans des conditions de faible éclairage. L'œil voit les couleurs de façon différenciée. A chaque couleur est associée une longueur d'onde que nous percevons plus ou moins bien. Ainsi, nous sommes très sensibles au jaune et voyons mal les bleus et les rouges. Le schémas suivant montre la perception des couleurs par l'œil humain :

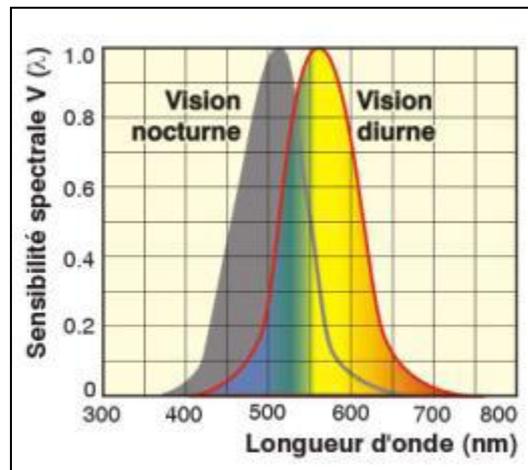


Figure 50 : La perception des couleurs par l'œil humain (Source : Magali Bodart)

La lumière est caractérisée par un facteur de réflexion qui varie d'une couleur à l'autre. Ce facteur est le rapport entre la quantité de lumière L , tombant sur une surface et la lumière l , réfléchiée par cette surface. Il s'exprime en %. Le tableau suivant donne les différents facteurs de réflexion pour des couleurs :

COULEUR								FACTEUR DE RÉFLEXION EN %	
PAPIER BLANC 84%	CRÈME CLAIR 73%	CRÈME FONCÉ 70%	JAUNE CITRON 70%	JAUNE D'OR 62%	CHAMOIS CLAIR 60%	CIMENT 55%	PIERRE (MOYENNE) 40%	BLEU CIEL 48%	
GRIS TRIANON 45%	BEIGE 43%	ROSE SAUMON 42%	VERT D'EAU 38%	HAVANE 32%	BLEU TURQUOISE 27%	ROUGE CLAIR 21%	VERT PRAIRIE 19%	NOIR 0%	

Tableau 7 : facteur de réflexion des couleurs (Source : Éclairage et confort visuel)

La nature de la lumière rend les couleurs visibles et elle est décrite par deux mesures : l'indice de rendu des couleurs *IRC*, exprimé en pourcentage, qui représente la capacité d'une source à rendre fidèlement les couleurs d'un objet (un *IRC* de 100 indique que la lumière considérée contient 100 % des couleurs existantes) et la température de couleur, mesurée en degrés Kelvin qui désigne la teinte de la lumière émise par un corps en fonction de sa température (plus elle est élevée, plus la lumière considérée contient de grandes quantités de couleurs).

I.3.3. La performance visuelle

La performance visuelle est un taux d'évaluation du système visuel utilisé pour quantifier les aptitudes d'une personne à détecter, identifier et analyser les détails entrant dans son champ de vision en se fondant sur la vitesse, la précision et la qualité de sa perception. La performance visuelle dépend entre autre des caractéristiques propres de la tâche à accomplir, de l'acuité visuelle de l'observateur, de la nature de l'arrière-plan, des conditions d'éclairage,...etc. La visibilité de la tâche est utilisée pour relier la performance visuelle aux paramètres de l'éclairage sans tenir compte de l'attitude de l'observateur à l'égard de la tâche. La visibilité qui caractérise une tâche est déterminée par la visibilité du détail critique. D'une manière générale, la visibilité du détail dépend de sa dimension angulaire et de sa forme, sa luminance et sa couleur, son contraste par rapport au fond immédiat, sa position dans le panorama visuel, la luminance d'adaptation, l'âge de l'observateur, le temps d'observation, etc...

II. Le confort visuel

II. 1. Définitions

Le confort visuel a une forte influence sur l'individu tant au niveau physiologique que psychologique. Le confort visuel a plusieurs définitions : c'est une relation visuelle satisfaisante avec l'extérieur ou bien un éclairage naturel optimal en termes de confort et de dépenses énergétiques ; il peut être aussi un éclairage artificiel satisfaisant et un appoint à l'éclairage naturel. De façon générale, le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la qualité et à la distribution de la lumière et représente sa satisfaction devant l'environnement visuel qui nous procure une sensation de confort quand nous pouvons voir

les objets nettement et sans fatigue, dans une ambiance colorée agréable. L'obtention d'un environnement visuel confortable dans un local favorise le bien-être de ses occupants. Par contre, un éclairage trop faible ou trop fort, mal réparti dans l'espace ou dont le spectre lumineux est mal adapté à la sensibilité de l'œil ou à la vision des couleurs, provoque à plus ou moins longue échéance une fatigue, voire même des troubles visuels, accompagnés d'une sensation d'inconfort et d'une performance visuelle réduite. Une bonne visibilité n'est pas une condition suffisante pour assurer le confort visuel, compris comme l'appréciation subjective d'un environnement lumineux agréable. L'uniformité de l'éclairement et l'équilibre des luminances dans un espace contribuent au confort. Le meilleur éclairage est assuré par la lumière du jour, lumière blanche parfaite. Un environnement lumineux non confortable, sortant des normes fondées sur les grandeurs photométriques, peut être parfois considéré comme satisfaisant, la satisfaction visuelle restant déterminée par des préférences individuelles. La sensation de confort diffère d'une personne à une autre ; on trouve des personnes qui préfèrent un éclairage naturel, même inconfortable, à certains éclairages artificiels assurés par des sources ayant une caractéristique spectrale qui ne correspond pas à celle de la lumière blanche. La température de couleur est un élément d'appréciation du confort visuel dû à la qualité de l'éclairage. Le diagramme de Kruithof établit les conditions du confort perçu pour différentes combinaisons d'éclairement et de température de couleur. Il montre que dans une ambiance peu éclairée (zone A), le confort est associé à une lumière chaude alors que dans une ambiance fortement éclairée (zone C), le confort est associé à une lumière trop froide. La zone intermédiaire (zone B) est celle du confort.

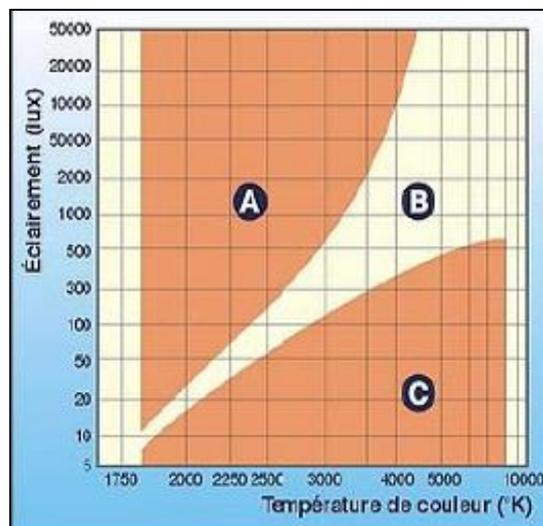


Figure 51 : Le diagramme de Kruithof
(Source : Suzel Balez)

II. 2. Les critères du confort visuel

Le confort visuel est une sensation totalement subjective. Les facteurs significatifs sont, entre autres, l'âge et l'acuité visuelle. Cette sensation de confort dépend également de l'objet à percevoir, de sa taille, de son aspect, de sa couleur. Le confort visuel doit assurer à la fois la visibilité des objets et des obstacles, la bonne exécution des tâches sans fatigue visuelle et une ambiance lumineuse agréable. Il est inséparable de la quantité, de la distribution et de la qualité de lumière disponible dans une pièce. Le confort visuel peut néanmoins se mesurer à travers des critères objectifs qui doivent être bien étudiés pour atteindre le seuil du confort :

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

II. 3. Les paramètres du confort visuel

Le confort visuel dépend d'une combinaison de paramètres physiques : l'éclairement, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps disponible pour la vision. Le confort visuel relève, en outre, de facteurs physiologiques et psychologiques liés à l'individu, tels que son âge, son acuité visuelle ou la possibilité de regarder à l'extérieur. Un environnement visuel confortable sera obtenu par la détermination des paramètres suivants :

- un bon niveau d'éclairement nécessaire à une vision claire et sans fatigue,
- Un rendu des couleurs correct et une lumière agréable,

- Une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace,
- Les rapports de luminance présents dans le local (bonnes conditions de contraste),
- L'absence d'ombres gênantes,
- La relation au monde extérieur,
- L'éblouissement.

II. 3.1. Un bon niveau d'éclairage

Chaque activité nécessite un certain niveau d'éclairage dans la zone où se déroule l'activité. En général, plus la difficulté pour la perception visuelle est importante, plus le niveau moyen d'éclairage devrait être élevé. Un niveau d'éclairage minimum est nécessaire pour une vision claire et sans fatigue. Toutefois, un éclairage trop abondant peut être inconfortable. L'éclairage moyen recommandé est généralement fixé selon la fonctionnalité du local et la précision de la tâche visuelle qui doit y être exercée. Les recommandations sont souvent données en termes d'éclairage plutôt que de luminance pour faciliter sa mesure. Comme la sensation de luminosité est mieux représentée par la luminance, il faut tenir compte du coefficient de réflexion dans le choix de l'éclairage d'une surface. Plus il est faible et sa couleur est foncée, plus la vision s'avère difficile et plus le niveau d'éclairage doit être élevé. De plus, les niveaux d'éclairage conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond. Un bon niveau d'éclairage permet une bonne productivité avec une baisse des erreurs et une moindre fatigue visuelle. L'éclairage a une corrélation directe avec l'accommodation à la distance et la profondeur du champ est meilleure lorsque l'éclairage est élevé. Si l'on est amené à changer de distance de vision, il est souhaitable que l'éclairage soit uniforme et élevé sur les deux surfaces. L'acuité visuelle est la capacité de l'œil à discriminer des détails spatiaux proches. Elle est mauvaise lors du passage de la lumière à l'obscurité (1% de l'acuité diurne) et s'améliore en 10 minutes pour atteindre 10% qui seront faiblement dépassés pour un temps supérieur (accommodation ou adaptation à la vision nocturne). L'acuité est optimale lorsque l'éclairage est élevé sans être éblouissant et lorsque la luminance de la zone étudiée et celle de l'entourage sont proches. De plus, la fatigue visuelle qui est liée à des facteurs multiples comme une luminance insuffisante obligeant à des accommodations successives, un excès de

luminance des surfaces de travail, un fort contraste entre deux zones de travail créant un éblouissement périphérique...etc. Une bonne visibilité de la tâche visuelle et de son environnement est particulièrement nécessaire et fortement influencée par les caractéristiques de l'éclairage. Les valeurs de l'éclairage E (lux) recommandées dans le tableau ci-dessous sont fondées sur les expériences réalisées dans la pratique et sont valables d'une manière générale. Les valeurs pour les tâches et les activités spécifiques sont définies dans les directives de l'Union Suisse pour la Lumière (L'USL) [La CUSSTR].

Valeurs de l'éclairage requises pour un éclairage nominal dans les locaux de travail.

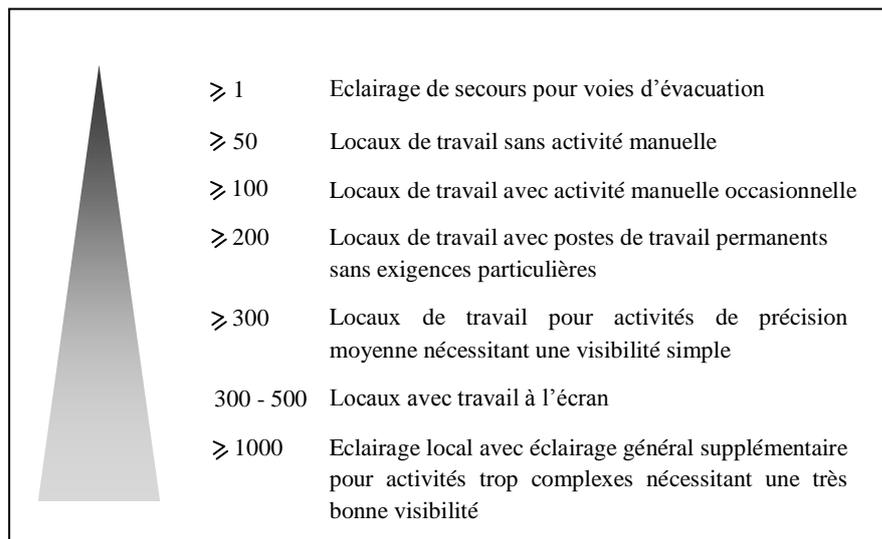


Figure 52 : Valeurs de l'éclairage requises pour un éclairage nominal dans les locaux de travail (Source : La CUSSTR)

II. 3.2. Un rendu des couleurs correct et une lumière agréable

Toute source lumineuse, qu'elle soit naturelle ou artificielle, présente un spectre lumineux qui lui est particulier. La lumière naturelle provenant du rayonnement du soleil et du ciel présente un spectre visible de forme continue. Le mélange des diverses radiations qui constituent ce spectre forme, par définition, la lumière dite blanche : c'est la seule qui permette à l'œil d'apprécier avec la plus grande exactitude la couleur des objets et les plus délicates de leurs nuances. Les différentes radiations colorées composant la lumière naturelle apparaissent aisément lors de leur réfraction et réflexion par des gouttes d'eau. Étant donné que l'œil est conçu pour la lumière du jour, la lumière émise par les sources artificielles devrait avoir la même composition spectrale que celle du soleil et du ciel : c'est le seul moyen

pour que ne soit pas altérée la vision des couleurs. En effet, un corps coloré réfléchit sélectivement les radiations colorées qu'il reçoit. Le système visuel regroupe les différentes radiations réfléchies et donne une sensation de couleur. La couleur perçue est intimement dépendante du spectre lumineux émis. Les objets qui ont des couleurs chaudes comme le rouge et l'orange sont plus agréables lorsqu'elles sont éclairées par une lumière chaude plutôt que par une lumière froide, mais par contre, la lumière chaude tend à noircir les couleurs froides (bleu, violet). En effet, Les couleurs chaudes seront de préférence utilisées dans des locaux de dimensions importantes tandis que les couleurs froides seront choisies pour les petits locaux. Les couleurs donc, peuvent contribuer dans une large mesure à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes.



Figure 53 : Un rendu des couleurs correct (Source : Auteur)

II. 3.3. Une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace

Pour permettre à la lumière naturelle de se distribuer le mieux possible dans le local, il est essentiel de placer le mobilier de telle sorte qu'il ne fasse pas écran et de disposer les zones d'activité judicieusement. Les plans de travail seront situés préférentiellement près des ouvertures où la lumière naturelle est bien reçue. Si le niveau d'éclairage et la luminance varient dans le champ visuel, une adaptation de l'œil est nécessaire lorsque le regard se déplace. Durant ce moment, l'acuité visuelle est diminuée, entraînant des fatigues inutiles. Selon la norme EN 12464-1 [CEN/TC169/WG2, 2002], la répartition lumineuse ou l'uniformité des niveaux d'éclairage caractérise les variations du niveau d'éclairage et est définie comme étant le rapport entre l'éclairage minimum et l'éclairage moyen observé dans la zone de travail.

En ce qui concerne l'uniformité de la luminance, la distribution de la lumière dans un espace dépend de la répartition des sources lumineuses et de la réflexion des parois. Elle est d'autant meilleure que les réflexions de chaque paroi sont élevées et uniformément réparties. De plus, il faut une certaine uniformité de luminance, d'une part, entre le champ visuel en position de travail (le plan de travail) et au repos (les murs) et d'autre part, entre les différentes surfaces de référence (éclairage de la zone de travail et de la zone voisine). Une bonne répartition de la lumière dans un espace permet l'affectation des tâches de manière confortable et sans fatigue visuelle.



Figure 54 : Une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace (Source : Auteur)

II. 3.4. Les rapports de luminance présents dans le local

La distribution lumineuse d'un espace doit être étudiée de telle façon que les différences excessives de luminance soient évitées pour permettre aux occupants de voir correctement. Des zones extrêmement sombres ou brillantes doivent être exclues car elles donnent naissance à l'inconfort visuel et surtout le contraste. Le contraste est la différence de luminosité entre un objet et son environnement ou entre les différentes parties d'un objet, faisant ressortir l'un et l'autre. L'équilibre des contrastes est un élément déterminant du confort et de la perception des détails. Lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel, l'œil doit s'adapter au changement de la direction du regard. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée. Pour éviter cette sensation d'inconfort, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel. Cependant, si les différences entre les niveaux de luminance sont trop faibles, on crée dans le local une impression de

monotonie très désagréable. La perception des détails d'une tâche visuelle est facilitée par les contrastes de luminance et de couleur entre ces détails et l'arrière-fond. De plus, un contraste suffisant devrait être appliqué pour favoriser la perception du relief des objets. Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces exigences.



Figure 55 : Les rapports de luminance présents dans le local
(Source : Auteur)

La sensibilité aux contrastes est l'aptitude à distinguer des différences de luminance. Dans des conditions de faible éclairement, il peut être impossible de distinguer de faibles contrastes. Bien que l'œil s'adapte à la luminosité d'ambiance de son champ visuel, il est plus impressionné par la luminance des zones situées dans sa vision fovéale. La présence de deux niveaux de luminance très différents, adjacents dans le champ visuel, est une source d'inconfort et diminue l'acuité visuelle. Nous sommes sensibles aux contrastes de luminance: en un point, notre cerveau compare l'intensité lumineuse à celle qui existait antérieurement ainsi qu'à celles des régions voisines. Pour garantir une répartition harmonieuse des luminances, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel ou les surfaces de référence. Les valeurs maximales recommandées pour les rapports de luminances sont les suivantes :

- Arrière-fond de la tâche visuelle/entourage, 1/3.
- Arrière-fond de la tâche visuelle/champ visuel (180°), 1/10.
- Sources lumineuses/surfaces contiguës, 1/20.
- Pour l'ensemble de l'espace intérieur, 1/40.

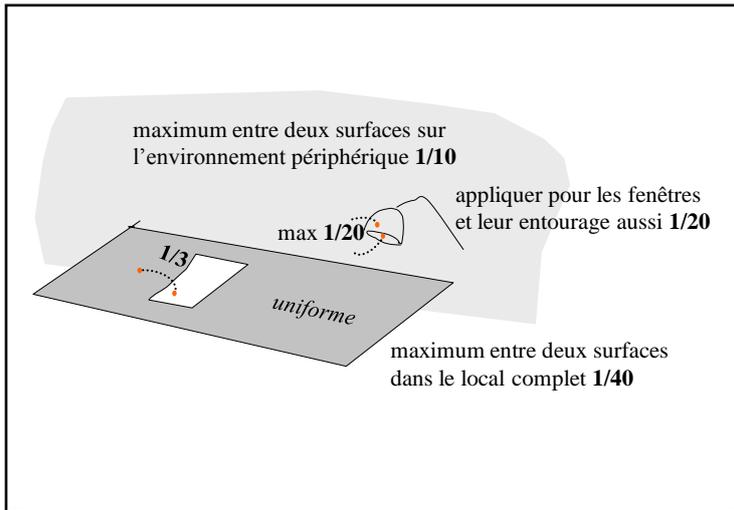


Figure 56 : Les valeurs recommandées pour le contraste
(Source : Ljubica MUDRI)

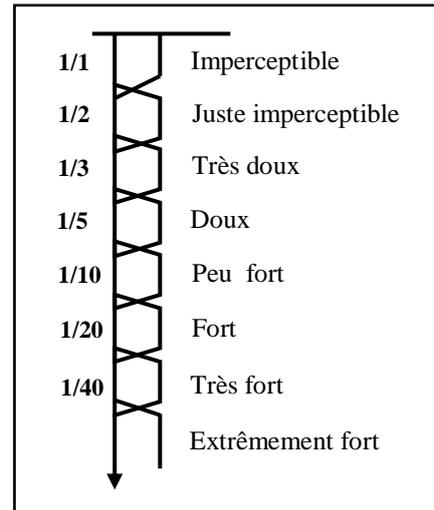


Figure 57 : Les sensations relatives aux différents niveaux de contraste
(Source : Ljubica MUDRI)

II. 3. 5. L'absence d'ombres gênantes

Lorsqu'un objet opaque est éclairé par une source de lumière, certaines zones situées derrière l'objet, ne reçoivent pas de lumière et constituent l'ombre de l'objet. On dit également que l'ombre se produit quand un élément se trouve entre la tâche visuelle et la source lumineuse. L'ombre portée sur un objet éclairé prend deux zones : la première zone est située à l'opposé de la source lumineuse et elle ne reçoit pas de lumière ; ceci s'appelle l'ombre propre. La deuxième zone est la région d'un écran, d'un mur, etc..., placé derrière l'objet éclairé, qui ne reçoit pas de rayon lumineux (c'est la zone non éclairée de l'écran) ; elle s'appelle l'ombre portée.

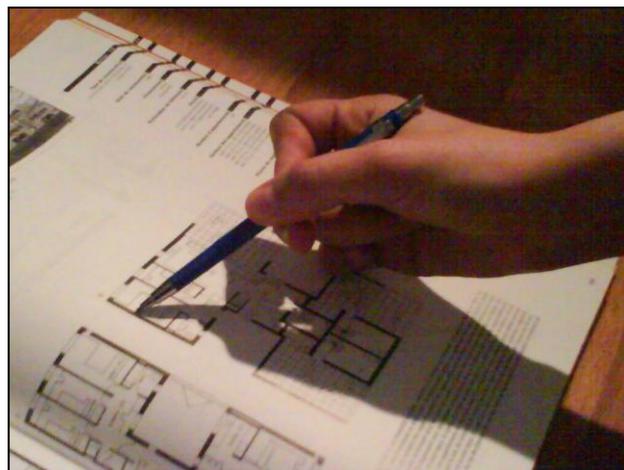


Figure 58 : L'absence d'ombres gênantes (Source : Auteur)

La visibilité de l'objet change selon la source lumineuse ; si l'arrivée de la lumière est directionnelle, cela va permettre l'apparition d'ombres sur l'objet observé ce qui conduit à une sensation de fatigue et d'inconfort visuel. D'autre part, si l'arrivée de la lumière est non directionnelle, elle rendra difficile la perception des détails de cet l'objet, alors qu'une pénétration latérale permettra la perception tridimensionnelle du relief et des détails des objets ainsi que leur couleur. La pénétration latérale de la lumière est la meilleure.

II. 3. 6. La relation au monde extérieur

La lumière naturelle est l'un des éléments dont l'homme a toujours besoin et qui a un grand impact sur ses activités. Elle influence le bien-être des occupants d'un local. Dans un espace architectural, la fenêtre est un moyen de communication, un lien visuel qui permet à l'homme de rester en relation permanente avec le monde extérieur. La variabilité de la lumière naturelle permet d'établir une harmonie avec le monde extérieur et crée une ambiance intérieure plus chaleureuse. Les baies vitrées, par lesquelles la lumière pénètre, offrent le double avantage d'une communication visuelle vers l'extérieur et d'une vue au loin nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée. Elles jouent aussi un rôle esthétique indéniable car elles font participer les paysages extérieurs à l'ambiance visuelle d'un espace déterminé.



Figure 59 : La relation au monde extérieur (Source : Auteur)

Les recherches montrent que la relation de l'espace avec le monde extérieur augmente la productivité de travail dans cet espace. La mesure de la productivité constitue encore une donnée difficilement quantifiable car elle est grandement affectée par des aspects hautement

subjectifs. De manière générale, les efforts déployés dans la conception des bâtiments verts favorisent l'atteinte de certains objectifs sur le plan du confort physiologique des employés. Toutefois, la plupart des critères d'un projet *LEED* ne correspondent que partiellement aux critères de confort psychologique permettant d'optimiser le bien-être des individus. Cette réalité est étroitement liée aux stratégies durables de la conception architecturale. Selon McLennan, les six principaux critères de design d'une architecture adoptant les principes de la biophilie (le terme biophilie, proposé par le biologiste EDWARD O. WILSON [HARVARD UNIVERSITY PRESS, 1984.], désigne l'affinité innée de l'homme pour le vivant et les systèmes naturels), sont les suivants :

- Permettre la perception des variations cycliques saisonnières et journalières des conditions lumineuses et thermiques,
- Relier les individus aux conditions extérieures en offrant un accès aux vues et à l'éclairage naturel,
- Redonner à l'occupant le contrôle de la gestion de son confort thermique, de la ventilation et de la lumière naturelle,
- Utiliser la lumière naturelle comme principale source d'éclairage
- Employer des matériaux sains et durables qui ne requièrent que peu d'entretien,
- Adopter des stratégies passives de ventilation naturelle et de chauffage.

De plus, l'enquête en question qui a été menée par Les Services Kelly [www.kellyservices.com], chef de file mondial en solutions de main d'œuvre canadien, indique que 76 pour cent des répondants ont affirmé que la possibilité de travailler à l'extérieur du bureau tout en restant en contact a été un développement positif et a augmenté la productivité du travail, même si environ le tiers d'entre eux travaille de longues heures. Donc, ce sont l'éclairage naturel et l'accès aux vues qui constituent les aspects les plus importants dans l'atteinte de la satisfaction d'un employé par rapport à son espace de travail. La lumière de jour est un élément indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu où nous évoluons. Elle est préférée à l'éclairage artificiel pour sa variabilité et ses nuances. De plus, la qualité spectrale de la lumière naturelle assure la meilleure vision possible des objets et des couleurs. Si on compare la répartition spectrale de la lumière

naturelle à la courbe de sensibilité de l'œil, il apparaît que l'œil humain est naturellement adapté à la lumière naturelle. L'éclairage naturel est le plus approprié tant au niveau physiologique que psychologique mais sa variabilité nécessite un apport complémentaire d'éclairage artificiel ou, à d'autres moments, l'utilisation d'occultations temporaires.

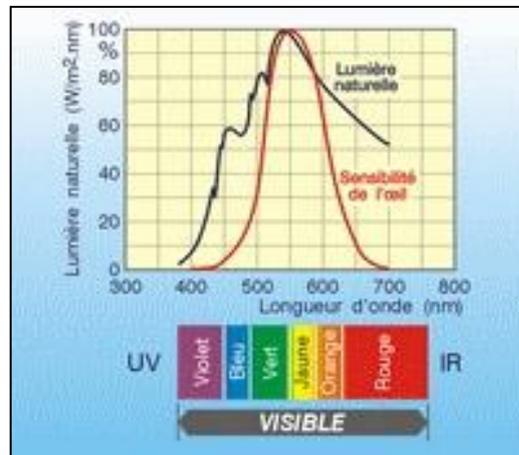


Figure 60 : Courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain superposée à la courbe de distribution spectrale de la lumière naturelle (Source : Architecture et Climat)

II. 3.7. L'éblouissement

L'éblouissement est un problème d'éclairage commun. L'éblouissement est une sensation de gêne et d'inconfort qui peut même diminuer la capacité visuelle d'une personne. L'éblouissement résulte de conditions de vision dans lesquelles l'individu est moins apte à percevoir les objets suite à des luminances ou à des contrastes de luminance excessifs dans l'espace et dans le temps. L'éblouissement se produit quand une source brillante de lumière est présente dans le champ visuel ; le résultat est une diminution de la capacité de distinguer les objets et cela conduit à la fatigue visuelle. Il place l'individu dans des situations de grand inconfort visuel.

En éclairage naturel, l'éblouissement peut être provoqué par la vue directe du soleil, par une luminance excessive du ciel vu par les fenêtres ou par des parois réfléchissant trop fortement le rayonnement solaire et provoquant des contrastes trop élevés par rapport aux surfaces voisines. Il est intéressant de noter qu'une plus grande ouverture à la lumière naturelle cause moins d'éblouissement qu'une petite car elle augmente le niveau d'adaptation

des yeux et diminue le contraste de luminance. En éclairage artificiel, l'éblouissement peut être provoqué par la vue directe d'une lampe ou par sa réflexion sur les parois polies des luminaires, sur les surfaces du local ou sur les objets.



Figure 61 : L'éblouissement (Source : Auteur)

Le schéma suivant montre les différents angles pour lesquels les problèmes liés à la vision se produisent. Plus l'angle α augmente, plus la sensation d'éblouissement commence.

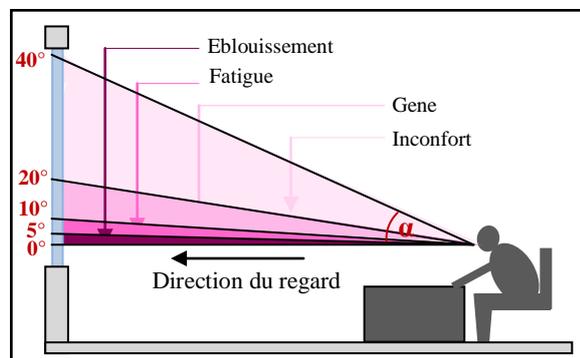


Figure 62 : Angle d'éblouissement (Source : Auteur)

Les facteurs impliqués dans l'éblouissement sont :

1-La hauteur de l'installation du système d'éclairage : plus l'installation est élevée, plus on aura moins de risque d'être ébloui.

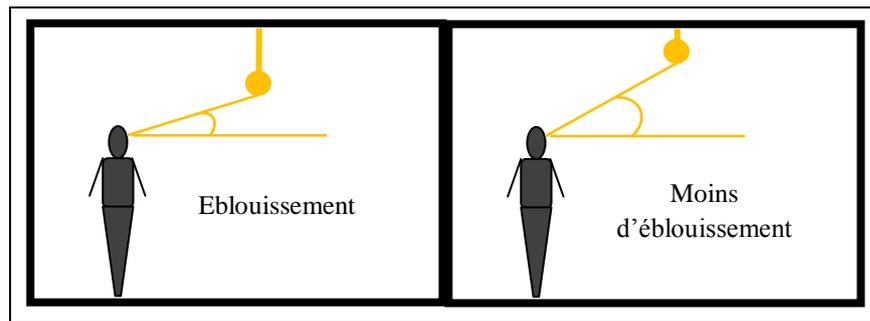


Figure 63 : L'effet de la hauteur du système d'éclairage (Source : Auteur)

2- Les dimensions de la pièce : plus la pièce devient grande, plus on aura besoin de plusieurs installations d'éclairage pour l'éclairer ; cela va contribuer à l'éblouissement. Ce risque sera diminué si les dimensions de la pièce sont réduites.

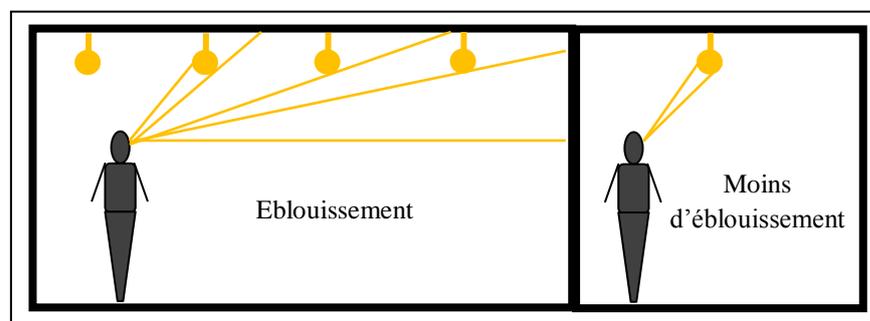


Figure 64 : L'effet des dimensions de la pièce (Source : Auteur)

Suivant l'origine de l'éblouissement, on peut distinguer :

-L'éblouissement direct : il est causé par la présence d'une source lumineuse intense située dans la même direction que l'objet regardé ou dans une direction voisine, mesuré en candela/m^2 . On peut distinguer deux types d'éblouissement direct ; d'une part, l'éblouissement d'inconfort qui résulte de la vue en permanence de sources lumineuses de luminances relativement élevées. Cet éblouissement peut créer de l'inconfort sans pour autant empêcher la vue de certains objets ou détails. Ce type se rencontrera dans des locaux où l'axe du regard est toujours relativement proche de l'horizontale. D'autre part, l'éblouissement invalidant qui est provoqué par la vue d'une luminance très élevée pendant un temps très court. Celui-ci peut, juste après l'éblouissement, empêcher la vision de certains objets sans pour autant créer de l'inconfort.



Figure 65 : Eblouissement direct (Source : Auteur)

-L'éblouissement indirect provient d'une réflexion perturbatrice des sources lumineuses sur des surfaces spéculaires ou brillantes, telles que le papier, une table ou un écran d'ordinateur. L'éblouissement indirect se présente sous deux formes: l'éblouissement par réflexion et l'éblouissement par effet de voile. L'éblouissement réfléchi est produit par la réflexion sur des surfaces brillantes ou spéculaires, de l'image d'une source de lumière vers l'œil de l'observateur. L'éblouissement de voile apparaît lorsque des petites surfaces de la tâche visuelle réfléchissent la lumière provenant d'une source lumineuse et réduisent ainsi le contraste entre la tâche visuelle et son environnement immédiat.

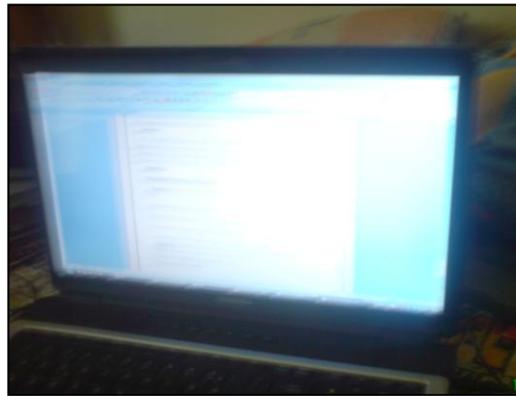


Figure 66 : Eblouissement par réflexion (Source : Auteur)

-L'éblouissement perturbateur : il se produit quand la luminance atteint des valeurs extrêmes ou quand le contraste devient trop important ; il entraîne une perte momentanée de la vision.

-L'éblouissement inconfortable : il entraîne une diminution de la performance visuelle sans atteindre le seuil de la douleur. Cet éblouissement est généré par le contraste. Plus le contraste est faible, plus l'éclairage doit être important.

III. La théorie des ambiances

La polysémie (*c'est la propriété d'un mot à posséder plusieurs sens*) de la notion d'ambiance provient non seulement de la complexité de chacun des registres pris à part mais aussi de leur interaction au sein d'une ambiance – simultanément lumineuses, thermiques, aérauliques, sonores – à l'heure de l'émergence de notions comme le paysage sonore ou le milieu olfactif. La recherche sur les ambiances contribue à la réhabilitation des dimensions tactiles, olfactives ou sonores de l'architecture et de la ville, réhabilitation préalable à l'invention d'espaces architecturaux ou urbains plurisensoriels.

Cet élargissement des différents champs disciplinaires exige évidemment l'invention de nouvelles méthodes et démarches. Il suffit d'ailleurs de quitter le registre du visuel pour que les procédures traditionnelles de recherche, de conception et de pratiques professionnelles perdent leur pertinence. Les recherches ont dérivé pour chaque registre de la notion de la nuisance vers celle de la maîtrise, puis vers la qualité environnementale. En investissant la dimension sensible des ambiances dans ses aspects culturel et artistique, les approches qualitatives ont fait appel aux sciences humaines et à la philosophie de l'esthétique. En considérant la pluralité des sens, elles font référence aux modèles intégrateurs et aux approches multicritères. L'intégration d'ambiances plurielles – thermique, lumineuse, sonore, olfactive- donne naissance à l'ambiance singulière et globale. Une ambiance équivaldrait donc à l'intégration de données distinctes et disparates qui invoquerait comme éléments unificateurs l'emploi des mêmes techniques pour maîtriser des modes ambiants distincts. Cette affirmation relève, au stade actuel des différentes recherches, de la simple hypothèse. Entre chercheurs et praticiens, beaucoup de démarches se profilent, allant de la recherche fondamentale qui aborde la complexité des démarches conceptuelles posées à la pratique professionnelle (qui souffre du divorce entre une vision passéiste de la maîtrise d'œuvre architecturale) et l'intégration de nouveaux savoirs ouverts et interdisciplinaires sur les ambiances, en passant par une recherche appliquée qui évolue à coups de modélisations informatiques, de simulations et de simulations inverses.

Si l'architecte demeure le maître d'œuvre du projet, il lui est nécessaire de collaborer avec les éclairagistes dont la compétence et les soucis complètent les siens. Cette pluridisciplinarité se pose d'abord en termes de prise en charge des problèmes des ambiances lumineuses dès la phase de conception architecturale. Ceci rend possible la prise en compte des exigences des

ambiances lumineuses en termes de matériaux, de sols et de perception et donc de conception de l'espace lui-même. La source lumineuse, caractérisée par sa directionnalité, son intensité, sa température de couleur... produit des effets élémentaires tels que le filtrage, la découpe, le cadrage, le reflet... :

-Le filtrage : la lumière provenant d'une source lumineuse traverse toujours un milieu avant d'atteindre l'œil. Elle peut être réfléchie, diffusée, à travers un dispositif naturel (atmosphérique, brouillard, végétal...) ou construit (parois translucides ou transparentes, moucharabieh...). Le filtrage se produit lorsqu'un dispositif s'interpose entre deux milieux; sans interdire le passage de l'un à l'autre, un filtre sépare des unités distinctes tel un tamis. Il est nécessaire de traverser ce dispositif pour s'infiltrer; la lumière et le regard sont tous deux transformés. Cette notion touche particulièrement les formes d'articulation spatiale : les dispositifs filtrants structurent l'espace et agissent sur des délimitations virtuelles. Mais passer un filtre suppose quelques transformations, une modification sensible des données perceptibles par rapport à une référence.



Figure 67: Filtrage de lumière
(Source : <http://cedricchone.voila.net/>)

-La découpe est provoquée par un rapport figure/fond particulièrement contrasté produisant une distinction nette entre différents plans ou éléments visuels juxtaposés. Le contre-jour produit ce type de motif visuel : la lumière éclaire un objet du côté opposé à celui par lequel on regarde [*CHE & THI. 1992*].

-Le cadrage déparage en fragments le champ de vision, instaurant ainsi un au-delà et un en deçà du cadre. Le cadrage n'affecte pas seulement la vue du paysage, il a valeur de limite symbolique et en cela, joue un rôle dans l'accessibilité réelle ou symbolique aux espaces et aux individus qui constituent le domaine public. [CHE & THI. 1992]. Le cadrage constitue ainsi un phénomène permettant de discriminer des scènes, de les gérer visuellement dans le temps et demande en retour un accord et un respect des règles relatives à l'orientation et à la durée du regard.

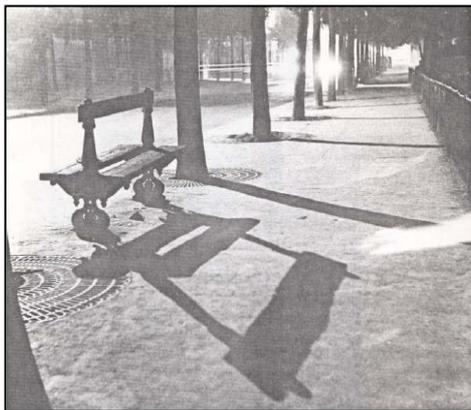


Figure 68: Effet de la découpe de lumière
(Source : GUENADEZ ZINEDDINE)

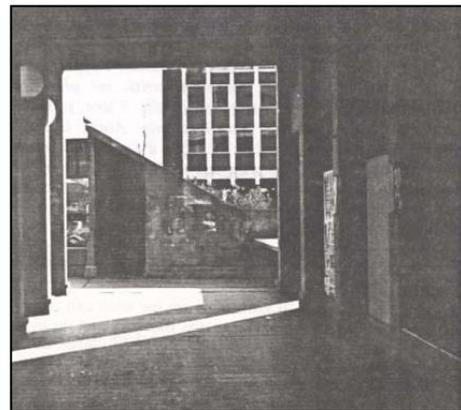


Figure 69: Effet de cadrage
(Source : GUENADEZ ZINEDDINE)

IV. L'ambiance lumineuse

IV.1. Définitions

La lumière est un élément essentiel dans notre vie ; elle nous permet de percevoir et de sentir le monde qui nous entoure. Elle est caractérisée par trois facteurs : l'éclairement, la luminance et le contraste. Quand ils se regroupent dans un espace architectural avec la présence d'une activité, ils donnent une ambiance à cet espace. L'ambiance est un phénomène subjectif car nous ne pouvons pas le calculer et il dépend de la sensation de chaque individu. Il n'existe pas une définition universelle pour l'ambiance lumineuse. En architecture par exemple, pour la définir, nous devons combiner plusieurs dimensions pour qu'elle couvre le champ sémantique du concept. Pour Augoyard [Amphoux et al. 2004] « Un ensemble de phénomènes localisés peut exister comme ambiance lorsqu'il répond à quatre conditions : Les signaux physiques de la situation sont repérables et décomposables; ces signaux interagissent avec la perception, les émotions et l'action des sujets et les

représentations sociales et culturelles; ces phénomènes composent une organisation spatiale construite et enfin le complexe signaux- percepts - représentations est exprimable. On retrouve aussi une définition proche chez Narboni [Narboni, 2006] pour qui une ambiance lumineuse est définie comme étant « le résultat d'une interaction entre une ou des lumières, un individu, un espace et un usage ». Cette interaction influence la perception et le ressenti de l'espace illuminé. De façon générale, l'ambiance lumineuse est l'interaction de phénomènes physiques avec un environnement spatial, perçue par l'occupant de cet espace qui est mise en avant. Une ambiance lumineuse est un phénomène qui relève de points de vue multiples. Elle renvoie à des phénomènes physiques (la propagation d'une onde, la réflexion et l'absorption de la lumière par une matière...etc), à des phénomènes socio-humains (citons la capacité oculaire, le besoin de lumière lié aux usages...etc), ou encore à des phénomènes sensibles et esthétiques comme les sensations liées à la lumière, les émotions ressenties ...etc.

L'ambiance lumineuse est le résultat d'une interaction entre un individu, un usage, une lumière naturelle et un espace. Lorsque ses éléments sont réunis, on parle d'une ambiance lumineuse représentée. Cette ambiance est le résultat de trois interactions : la première se fait entre la lumière naturelle et un usage quelconque et concerne la qualité et la quantité de la lumière. La deuxième concerne les effets de la lumière qui résulte d'une interaction entre la lumière naturelle et un espace. La troisième concerne les dispositifs lumineux : les configurations formelles et spatiales qui sont une interaction entre un espace et un usage. Comme toute ambiance physique, il faut considérer l'ambiance lumineuse sous deux approches. L'approche spatiale tout d'abord qui peut établir des variations lors des déplacements. Ensuite, une approche temporelle en s'assurant de la reproductibilité des mesures. Ainsi, l'ambiance lumineuse peut être influencée par les cycles journaliers ou saisonniers. L'ambiance d'un lieu et l'atmosphère qui s'en dégage renvoient à des sensations subjectives et immédiates. La perception de cette atmosphère nous donne la sensation de cet espace ; par exemple, si nous comparons deux pièces ayant les mêmes caractéristiques géométriques mais se différenciant par le niveau d'éclairage, nous allons remarquer que la pièce la plus éclairée semble être plus large que l'autre. Ces perceptions et ces représentations s'appuient sur l'expérience ordinaire des lieux où nous avons habité. C'est la lumière qui donne le sens de l'ambiance lumineuse dans le projet architectural, ce dernier peut avoir plusieurs lectures qui diffèrent selon la configuration de l'espace et la quantité de lumière reçue. Le projet du musée juif de Berlin de l'architecte Daniel LEBESKIND est vu comme

« une star de cinéma » qui change de nom dans chaque film et attire l'attention de tout le monde autour de lui au moment de sa présence. Mais ici, il ne s'agit pas d'un objet cinématographique mais d'un vrai projet architectural. Il peut avoir des ambiances lumineuses différentes dont chacune apporte aux visiteurs un sentiment particulier. Dans les figures suivantes, nous constatons que chaque espace donne une ambiance lumineuse particulière et un sens différent par rapport à l'autre. L'escalier, la structure apparente, la texture et l'éclairage qui se dégrade vers le sous sol, donnent aux visiteurs le sentiment de voyager à travers l'histoire. Alors que l'obscurité de l'autre espace crée le sentiment de la peur.

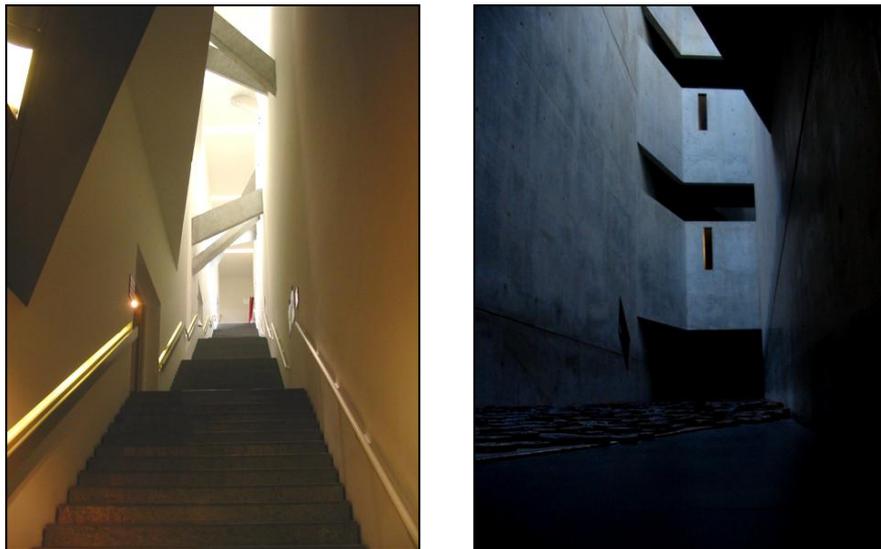


Figure 70 : Le musée juif (Source : <http://skildy.blog.lemonde.fr>)

IV.2. Les type d'ambiance lumineuse

La lumière est un facteur prépondérant qui permet à l'être humain de sentir le confort visuel et son bien être et génère des impressions psychologiques et des sensations qui nous permettent de qualifier l'espace ou nous vivons et que nous traversons chaque jour. L'ambiance lumineuse d'un espace ne se produit pas par la présence de la lumière seulement car elle engendre toujours l'un ou l'autre type d'ambiance thermique, sonore, olfactive...etc, même lorsqu'elle n'est pas volontaire, elle n'est jamais neutre. Et donc, il est indispensable de tenir compte des implications sensorielles, symboliques et psychologiques de la lumière. On peut distinguer trois catégories fondamentales d'ambiance lumineuse. Cette classification est faite selon le degré de la luminosité d'un espace :

Catégorie 1 : La pénombre, qui représente le dialogue entre l'ombre et une lumière "solide" qui la transperce par endroits. Depuis quelques décennies, la pénombre en architecture semble être devenue un langage de séduction que de prestation technologique et environnementale. Les variantes imposées au contenant produisent ainsi une éducation à des paysages lumineux intermédiaires capables de moduler de nouveaux gradients d'ombre et de lumière.



Figure 71: La pénombre en architecture (Source : Anna Barbara)

Catégorie 2 : L'ambiance lumineuse ou la clarté ambiante, omniprésence d'une lumière qui tend à disparaître parce qu'elle est partout.

Catégorie 3 : L'ambiance inondée qui est l'exaltation de la lumière qui embrase tout l'espace, trop plein d'une lumière envahissante et parfois écrasante, toutefois, chacun de ces types d'ambiances recouvre une grande variété de manière d'admettre la lumière et une multitude de qualités de lumière.



Figure 72: Ambiance lumineuse
(Source : Sigrid Reiter et al.)



Figure 73: Ambiance inondée
(Source : Sigrid Reiter et al.)

IV. 3. La sensation d'une ambiance lumineuse

L'ambiance lumineuse est une sensation subjective qui résulte de l'interaction de quatre paramètres qui sont : un espace, une lumière, un usage et un individu. La sensation d'espace n'est ni liée aux dimensions du lieu, au rapport de ses proportions (longueur, largeur, hauteur) ni au traitement de son enveloppe (matériaux, textures, couleurs...etc). L'absence ou l'abondance de lumière, le choix et la position des sources lumineuses, jouent un rôle dans la perception d'un lieu. Après la sensation de l'espace, nous recherchons la sensation de confort avec un éclairage qui doit permettre de réaliser une tâche déterminée sans entraîner de gêne pour les yeux. Les paramètres suivants : un bon niveau d'éclairage nécessaire à une vision claire et sans fatigue, un bon rendu des couleurs, une répartition harmonieuse de la lumière, l'absence d'ombres gênantes et d'éblouissement dû à une luminosité trop intense ou à un contraste lumineux trop important participent à l'assurance du confort visuel. La vue à travers une fenêtre permet de se situer par rapport à l'extérieur. Le cadrage des vues consiste à orienter les ouvertures vers l'environnement extérieur présentant un certain intérêt visuel. La possibilité de regarder à travers une fenêtre évite le sentiment d'enfermement et de confinement et apporte une sensation de clarté. La perception de la lumière n'est pas seulement liée à l'importance de l'intensité de sa source, ni à la quantité de lumière diffusée. On peut en effet obtenir une sensation de clarté tout aussi importante en jouant sur le contraste clarté-obscurité : dans un volume où règne la pénombre, la forme, la répartition et l'emplacement des ouvertures, ou le choix de vitres teintées, auront une influence sur la perception de l'espace, sur l'esthétique du lieu.



Figure 74: Eglise de la lumière, Osaka, Japan
(Source :<http://www.andotadao.org/aka1.htm>)

IV.4. L'ambiance lumineuse et l'espace architectural

IV.4. 1. A l'intérieur de l'espace architectural

L'évaluation de l'ambiance lumineuse ressentie à l'intérieur d'un espace architectural reste toujours subjective car elle dépend de plusieurs paramètres comme la géométrie et la dimension du local, la couleur des parois ainsi que le plafond et le sol, la quantité et la qualité de lumière reçue à l'intérieur, l'aménagement intérieur, les matériaux utilisés...etc. Par exemple, si nous comparons deux pièces ayant les mêmes caractéristiques (la géométrie, le niveau d'éclairage,...etc) mais en changeant la couleur des parois, on met dans la première une couleur chaude et dans la deuxième une couleur froide. L'œil ne voit pas la même chose et donc, chaque espace apporte une ambiance lumineuse particulière



Figure 75: Espace éclairé à 300 lux avec une lumière chaude, (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/>)



Figure 76: Espace éclairé à 300 lux avec une lumière froide, (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/>)

IV.4. 2. L'espace architectural lui même

La lumière permet de donner à un bâtiment une image nocturne particulière. L'éclairage artificiel offre la possibilité d'illuminer des bâtiments la nuit. Cet éclairage se fait en contre-plongée, du bas vers le haut. La lumière artificielle est l'éclairage qui est produit artificiellement à l'aide de lampes et de projecteurs. Un objet architectural peut être éclairé de l'intérieur comme la tour Eiffel dont l'éclairage est positionné à l'intérieur de la structure métallique, ou, au contraire, de l'extérieur, ou le bâtiment est illuminée depuis les façades alentours. Des ambiances peuvent être créées artificiellement on utilisant des techniques simples ou complexes ; citons par exemple : les tubes fluorescents de couleur à l'intérieur des baies vitrées ou entre les peaux de la façade de verre; écrans lumineux géants...etc, ou par

L'utilisation des images lumineuses projetées sur les façades d'un bâtiment. Les édifices deviennent alors lumineux ou porteurs de signes lumineux. Ainsi, La prédominance des surfaces vitrées dans le bâtiment offre de nombreuses possibilités de composer avec l'éclairage intérieur et sa perception depuis l'extérieur. L'éclairage artificiel a pour avantage de pouvoir être créé, maîtrisé, contrôlé.



Figure 77 : La tour Eiffel
(Source : Michaël Menot)

Il existe plusieurs projets où les architectes ont composé avec l'éclairage naturel et artificiel pour donner une lecture nocturne à leurs projets. Prenons l'exemple du dôme du Reichstag, qui a été réalisé par l'architecte Norman Foster en 1993 à Berlin en Allemagne et qui abrite à nouveau le parlement allemand. C'est un bâtiment d'acier et de verre dont l'idée principale est la transparence qui reflète la démocratie de la nation et la lumière est un élément fondamental pour concrétiser cette idée. En fait, le nouveau dôme, ou coupole du Reichstag, avec son vaste cylindre central en verre conçu pour refléter la lumière naturelle dans la salle des séances qui se trouve au sous-sol du cône, compte parmi les éléments les plus impressionnants visuellement et architecturalement. Il fournit de la lumière grâce à un système de miroirs qui orientent la lumière vers la salle des séances durant la journée et la restitue à l'inverse la nuit. D'autre part, artificiellement, pendant la nuit, le projet est pratiquement éclairé de l'extérieur grâce à sa structure apparente qui devient porteuse de lumière, ce qui la rend perceptible de loin.



Figure 78 : Vue intérieure sur le cône lumineux du dôme Reichstag
(Source : <http://www.galinsky.com>)



Figure 79: Vue intérieure sur le cône lumineux du dôme Reichstag (Source : <http://www.albert-videt.eu/photographie>)



Figure 80 : Vue extérieure du dôme Reichstag pendant le jour et pendant la nuit
(Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Reichstag_dome)

IV.5. Les paramètres influençant une ambiance lumineuse

Dans cette partie, on va présenter une analyse de l'influence de la lumière sur l'espace architectural selon ses rapports à l'espace, aux formes, aux structures, aux matériaux et aux couleurs afin d'aider les concepteurs à concevoir ou à qualifier une ambiance lumineuse.

IV.5.1. Le rapport avec l'espace

Selon Luis Lozoya « L'éclairage est le seul aspect intangible de l'architecture », « Les autres éléments sont matériels, on peut les toucher, les sentir. La lumière est intangible et pourtant il s'agit de l'élément architectural qui modifie la perception des espaces, leur donne une dimension plus petite, plus grande, plus chaude, plus froide. Cette capacité à modifier

l'espace, ou à modifier la perception qu'on en a, c'est ce qui fait à mes yeux l'attrait de l'éclairage.» [Luis Lozoya]. Donc, la lumière est intangible. La sensation de l'espace dépend de la manière dont la lumière révèle ses limites. Si nous comparons une pièce avec des murs très réfléchissants et éclairée par la lumière du jour avec la même pièce mais cette fois éclairée de nuit, notre perception et notre sensation de l'espace vont changer. La pièce éclairée naturellement apparaît ouverte et plus spacieuse alors que l'autre paraît obscure, car les coins et les limites de la pièce disparaissent dans l'obscurité. Dans le domaine de l'éclairage naturel, la définition d'un espace architectural implique tout d'abord l'étude des différentes parois qui le délimitent ainsi que le traitement des bords de l'enveloppe et des interfaces lumineuses.

La lumière peut relier différentes pièces ou les séparer ; cela dépend du traitement des surfaces de rencontre entre l'intérieur et l'extérieur qui permet de mettre en évidence leur relation ou leur séparation. La lumière constitue aussi un moyen pour valoriser les proportions d'une pièce ou en transformer leur perception, comme elle se révèle un instrument utile pour promouvoir une orientation dans un bâtiment en accentuant une direction, en développant une hiérarchie ou en suggérant un mouvement. L'idée de la lumière séparant ou reliant l'intérieur et l'extérieur diffère dans sa signification et dans son interprétation, selon les époques et les cultures, les matériaux locaux de construction, les méthodes de construction utilisées et les conditions climatiques influencent le nombre, la taille et le type de contacts entre intérieur et extérieur. Une forte différence de qualité ou de quantité de la lumière naturelle des espaces adjacents peut être un moyen qui les sépare, car elle attribue des caractères différents aux deux faces d'une même paroi. Au contraire, dans le cas où la lumière s'étend facilement dans les pièces, elle peut également jouer un rôle dans l'accentuation de l'unité d'un local.

La lumière fait aussi partie des éléments qui nous permettent de différencier l'intérieur de l'extérieur. L'intérieur est l'espace qui nous protège physiquement des conditions de l'extérieur et qui crée une forme distincte ainsi qu'un environnement adapté à l'activité prévue à cet espace. Dans le bâtiment, les ouvertures constituent le moyen principal qui fait la relation de l'intérieur à l'extérieur. Elles développent des axes, des cadrages et des intensités de perception. La définition précise des dimensions des ouvertures, de leurs rôles et de leur répartition dans le mur est un moyen de composition qui se base sur le jeu des vides et des pleins, aussi bien pour l'espace intérieur que pour l'extérieur, ce qui nous donne le sens de la

séparation ou de la relation visuelle avec l'extérieur ainsi que le type de transition entre l'intérieur de la pièce et l'extérieur. La fenêtre est une forme d'ouverture qui constitue le rapport spatial entre intérieur et extérieur. La transparence de la façade nous projette visuellement vers l'extérieur qui entretient une relation puissante avec le paysage et joue les rôles de limites entre dedans et dehors, en même temps qu'elle soumet l'intérieur aux variations permanentes de la lumière et du temps. Par exemple, une paroi totalement vitrée accentue la relation entre intérieur et extérieur qu'un mur avec des trous qui permet d'augmenter l'intériorisation de l'espace.

IV.5.2. Le rapport avec la forme et la dimension de la pièce

La qualité de la lumière est liée, évidemment, à la structure de l'espace. Elle est nette et directe dans l'espace clos, beaucoup plus diffuse dans l'espace ouvert. Le Corbusier a été l'un des seuls architectes à traiter explicitement la question de la lumière dans l'architecture religieuse surtout dans son projet de la Chapelle de Ronchamp (France). Si nous éclairons légèrement les murs, nous rendons perceptible l'échelle et la géométrie du local. L'espace devient délimité par les murs qui sont éclairés. En revanche, dans l'obscurité ou le noir, les limites des espaces et des volumes disparaissent par absence de réflexion lumineuse. En effet, une surface éclairée paraît plus grande qu'une surface sombre et la perspective fait croire qu'une surface plus grande est plus proche qu'une surface plus petite. La lumière influence aussi les proportions d'un espace et les réflexions spéculaires de la lumière peuvent être utilisées pour élargir visuellement un espace. La perception des proportions de cette pièce est modifiée par les jeux de la lumière sur ses parois.

IV.5.3. Le rapport avec la structure

La structure influence de manière déterminante le caractère d'une ambiance lumineuse. Lorsque nous choisissons la structure d'un édifice, nous décidons en même temps de sa lumière. La relation entre toute structure et la lumière peut paraître évidente. Mais tantôt la lumière révèle l'importance d'une structure, tantôt elle la dissimule ou semble même se substituer à elle. Plusieurs projets ont été conçus et l'idée principale était de considérer la structure comme un élément d'éclairage naturel. L'église protestante, qui a été conçue par l'architecte japonais Tadao Ando, reflète cette idée. Le voile de béton incliné de 15 degrés

transperce l'espace en définissant l'entrée. On accède à l'église du côté où le mur en béton est découpé de fentes formant la croix lumineuse qui donne son nom à l'église et l'on suit le mur en biais. Le bandeau lumineux crée est une source de lumière supplémentaire pour l'intérieur. L'ambiance dépouillée de l'intérieur est définie par la lumière. Les fentes lumineuses de la croix dans le mur sont volontairement étroites et renforcent l'intensité du contraste entre l'ombre et la clarté. La lumière qui vient de l'extérieur éclaire la croix dont les réflexions dans l'espace varient en fonction des saisons et des heures du jour.



Figure 81: Vue intérieure de l'église de la lumière
(Source : <http://www.andotadao.org/chlight6.htm>)

IV.5.4. Effet des matériaux

La perception d'un matériau se révèle parfois différente en fonction de l'orientation de la lumière ou de la position de l'observateur par rapport à l'objet analysé. La lumière et la matière dépendent l'une de l'autre. La lumière n'est pas seulement ce qui nous rend les choses visibles mais elle en est la substance même. C'est ce qui fait dire à Khan « la lumière est la révolution de l'esprit de la matière ». En architecture, la lumière est considérée comme un des plus beaux matériaux ; en revanche, les matériaux sont des clés pour comprendre le comportement de la lumière car ils affectent directement sa quantité et sa qualité. Les matériaux présentent deux caractéristiques pour l'étude de la lumière : leur finition et leur couleur. Cependant, l'importance et le rôle de ces éléments dans une composition varie selon le choix de la couleur, de la texture et du type d'éclairage. Enfin, la lumière naturelle joue un rôle capital dans la mise en valeur d'une matière. C'est elle qui, selon son intensité, son angle d'incidence, sa qualité et sa couleur va mettre en évidence la texture et la couleur de la matière.

IV.5.5. Effet des couleurs

Les couleurs ont un effet considérable sur la sensation de l'espace et sur l'ambiance lumineuse. Les radiations colorées émises par les objets et l'environnement peuvent aussi produire certains effets psycho-physiologiques sur le système nerveux. C'est ainsi que les couleurs de grandes longueurs d'onde (rouge et orange) ont un effet stimulant tandis que celles de courtes longueurs d'onde (bleu et violet) ont un effet calmant. Les couleurs intermédiaires jaune et vert ont, de même que le blanc, un effet tonique, favorable à la concentration. Les couleurs foncées et le gris ont par contre une action déprimante. Enfin, les couleurs peuvent contribuer dans une large mesure à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes. La couleur de la lumière artificielle a une action directe sur la sensation de confort de l'ambiance lumineuse d'un espace. Une lumière de couleur chaude est composée majoritairement de radiations rouges et oranges. Les tubes fluorescents standards génèrent une lumière froide composée principalement de radiations violettes et bleues. De plus, les couleurs chaudes des objets sont plus agréables lorsqu'elles sont éclairées par une lumière chaude plutôt que par une lumière froide, mais par contre, la lumière chaude tend à noircir les couleurs froides. L'ambiance lumineuse ressentie par les occupants dépend de deux paramètres indépendants de l'indice de rendu des couleurs IRC ou Ra qui est la capacité d'une lampe à restituer correctement les couleurs présentes dans l'environnement. L'IRC est compris entre 0 et 100, 100 étant l'IRC de la lumière naturelle et 0 étant l'absence de couleur reconnaissable. Le deuxième paramètre est celui de la température de couleur exprimée en Kelvins, qui représente la couleur de la lumière émise par une lampe. On parlera généralement de teinte chaude (température de couleur < 3000 K) ou froide (température de couleur > 3000 K).

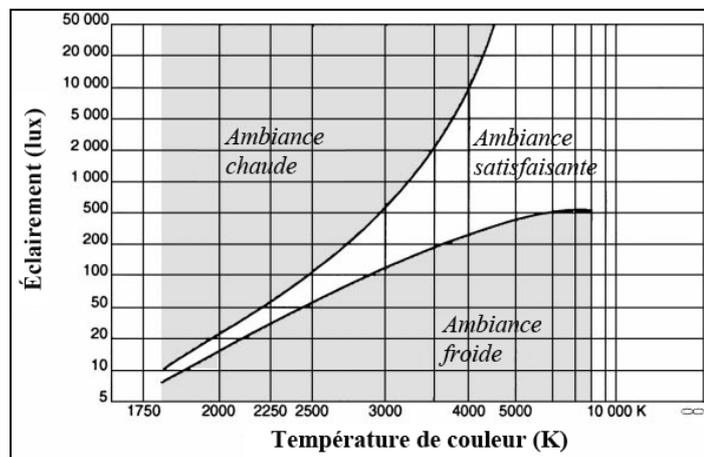


Figure 82 : Le diagramme de Kruithof (Source : Nathalie Pineault)

Conclusion

Il est certain que la forme et l'espace architectural ne peuvent seuls influencer la sensation de l'ambiance sans l'introduction de la lumière. Selon le changement du temps, la lumière peut donner un ou plusieurs sens à l'espace. Ce sens apporte une ambiance dont la sensation reste subjective qui peut être une sensation d'ouverture, de grandeur, de gaieté, de tristesse, ...etc. L'architecture met en jeu les ambiances. La lumière révèle les formes, les volumes et les textures des matériaux. L'architecture a la capacité de modeler et moduler les qualités de lumière et d'ombre. Souvent liée à la nature du lieu, la lumière joue un rôle fonctionnel car elle doit répondre à un sentiment de confort et à des usages multiples. Elle participe aussi plus largement au sens donné à l'espace et au bâtiment, à sa symbolique, à ses connotations. Donc, la lumière va partager son rôle avec l'espace pour créer des ambiances lumineuses différentes.

La lumière et la couleur ont un impact sur la productivité et le psycho-physiologique de l'occupant. C'est pour cette raison que les physiologistes et les ergonomes devraient étudier et déterminer les conditions favorables de la lumière et de la couleur à chaque espace. La combinaison de l'éclairage, le contraste de luminance, la couleur de la lumière, la reproduction des couleurs ou leur choix sont les éléments qui déterminent la couleur du climat et le confort visuel. La négligence de l'un ou de plusieurs éléments de cet ensemble peut conduire à l'inconfort visuel qui se présente sous forme de fort contraste ou d'éblouissement. Ce dernier se produit par la pénétration directe de la lumière du soleil dans l'espace ; cette pénétration permet à la fenêtre de devenir une source lumineuse éblouissante. Dans certains cas, elle peut être la bienvenue, comme de petites fentes lumineuses utilisées pour transmettre une atmosphère d'élégance ou le projet lui-même (dans le projet Guggenheim de Frank Gehry). Mais, généralement, l'éblouissement est à éviter puisqu'il provoque une véritable gêne pour l'utilisateur de l'espace et réduit son confort visuel. Au-delà, les architectes concepteurs ont essayé de résoudre ce problème sans réduire le niveau d'éclairement qui est fourni par la lumière du jour par la création de nouveaux systèmes et techniques d'éclairage. Ces systèmes sont connus sous le nom de conduits de lumière, de puits de lumière et des light shelves qui permettent de maintenir un éclairage uniforme dans tout l'espace et de réduire l'effet d'éblouissement.

Chapitre III

Le système light shelf

Introduction

Dans la conception traditionnelle, Les fenêtres reçoivent une grande quantité d'énergie provenant du soleil. Il est important de noter que l'intensité de la lumière est très forte à proximité de la fenêtre, provoquant des problèmes d'éblouissement et de surchauffe à cause de l'ensoleillement direct, sans avoir une uniformité de l'éclairage dans tout l'espace. A quelques mètres de la fenêtre, le niveau d'éclairage est souvent trop faible. Toutefois, l'utilisation de fenêtres plus grandes avec des vitrages de grande transmission de lumière pour en fournir un niveau suffisant à une distance plus éloignée de la fenêtre s'est avérée inefficace. La distribution non uniforme de l'éclairage sur le plan de travail ainsi que le gradient de la luminance au sein de l'espace peut générer un environnement lumineux inconfortable.

Pour obtenir un éclairage uniforme et bien réparti dans tout le local, il faut se concentrer sur la façon dont la lumière du jour peut être distribuée et transmise. Pour atteindre cet objectif, il faut recourir aux nouvelles techniques d'éclairage naturel. Actuellement, il existe de nouveaux systèmes qui permettent d'éclairer et de contrôler la lumière du jour. Parmi ces systèmes, nous trouvons les puits de lumière, les light shelves, les conduits de lumière, les vitrages spéciaux, les persiennes, etc... Ces systèmes permettent à la fois d'éclairer naturellement les espaces et de réduire l'utilisation de l'éclairage électrique pendant le jour.

Dans ce chapitre, on va étudier l'un des systèmes de contrôle d'éclairage naturel le plus utilisé en architecture qui est le système light shelf. Ce système est conçu pour fournir des niveaux d'éclairage plus élevés et plus profonds dans l'espace pendant les heures d'exploitation optimale de la lumière du jour durant toute l'année. Ainsi, il permet d'obtenir un bon facteur de lumière du jour et d'atteindre le confort visuel par la réduction des effets d'éblouissement et de contrastes. Ce système sera présenté en détail, ainsi que son fonctionnement, son rôle pour réduire la consommation d'énergie ainsi que le rapport du climat avec sa conception.

I. Les systèmes de modélisation de la lumière naturelle

Les systèmes de modélisation de l'éclairage naturel sont conçus pour régler les problèmes de la répartition inégale de la lumière naturelle dans un espace en réduisant les niveaux excessifs de clarté près des fenêtres et en les augmentant dans les zones qui en sont éloignées, donnant ainsi naissance à une lumière plus équilibrée et une distribution harmonieuse dans l'espace. L'ajout des nouveaux systèmes à la fenêtre, tels que les light shelves, les light pipes, les systèmes prismatiques ou les persiennes propose une stratégie d'éclairage naturel viable en raison de la capacité de ces dispositifs à dévier et introduire la lumière naturelle vers le fond de l'espace.

I.1. Système de puits de lumière

Le puits de lumière est un nouvel outil d'éclairage naturel ; il permet d'apporter de la lumière naturelle dans des pièces qui ne possèdent pas d'ouvertures sur l'extérieur ou en complément d'une ouverture existante. Il peut être installé dans les bureaux de grande profondeur, salle d'exposition, salle d'opération aveugle, atelier ou garage en sous sol...etc. Il est constitué de trois composants : une coupole qui capte la lumière de l'extérieur, un conduit de lumière qui se présente sous la forme d'un tube recouvert d'un film réfléchissant permettant de guider la lumière par réflexion et enfin, un diffuseur, qui répartit la lumière dans la pièce à éclairer. Ce nouveau système d'éclairage zénithal permet d'éclairer naturellement les espaces sombres et de réduire considérablement la consommation énergétique de la pièce pendant le jour. Cette quantité de lumière fournie par le système varie au cours de l'année.

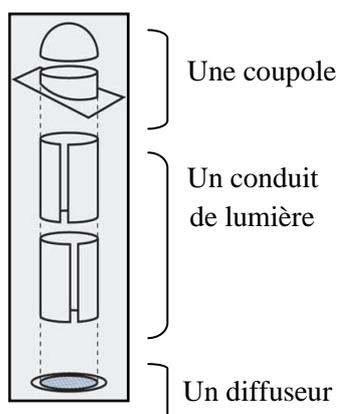


Figure 83 : Les composants de conduit de lumière (Source : Guide de dimensionnement des conduits de lumière naturelle)



Figure 84 : Vue intérieure d'un puits de lumière. (Source: <http://www.natureetconfort.fr>)



Figure 85 : Coupe sur un puits de lumière. (Source : Dr Anne Rialhe)

I. 2. Les plafonds anidoliques

Le plafond anidolique est un système de distribution intensif de la lumière naturelle adapté au ciel couvert. Il s'agit en fait d'un conduit lumineux intégré dans un plafond suspendu au milieu de la pièce. Le plafond anidolique est un système d'éclairage zénithal composé de deux miroirs de forme parabolique jouant le rôle de concentrateurs qui captent le flux lumineux entrant et le redistribuent sur une zone plus large. Les éléments anidoliques sont placés aux deux extrémités du conduit lumineux : à l'extérieur pour collecter la lumière du ciel et à l'intérieur pour contrôler la direction de la lumière émise dans le local.



Figure 86 : Le plafond anidolique.
(Source : J.-L. Scartezzini et al.)

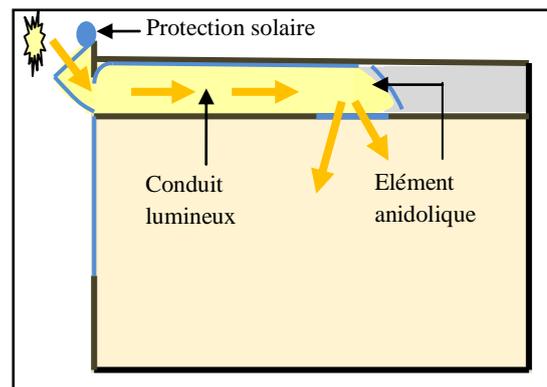


Figure 87: Le fonctionnement du plafond anidolique (Source : Auteur)

Ce système est conçu pour augmenter les niveaux de lumière en profondeur et créer une distribution plus équilibrée dans tout l'espace, tout en occupant l'espace réduit du faux plafond. Ainsi, il conduit à faire des économies importantes d'énergie par la réduction de l'utilisation des lampes dans les espaces ayant une grande profondeur.

I.3. Les étagères de lumière (light shelf)

Un light shelf est un dispositif conçu pour capter la lumière du jour et la réorienter vers le fond de l'espace par réflexion au niveau du plafond et cette stratégie va entraîner une répartition plus uniforme de la lumière. Le light shelf divise la fenêtre en une partie inférieure, qui sert à fournir une vue vers l'extérieur et une partie supérieure très réfléchissante qui sert à rediriger la lumière du jour vers le fond de l'espace. Ce système peut prendre différentes

configurations : horizontales ou inclinées, droites ou incurvées, situées à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la fenêtre, comme il peut être combiné. Il permet aussi de contrôler la lumière directe en réduisant le phénomène de l'éblouissement. Ce système est plus performant dans les conditions de ciel clair. Le système light shelf fonctionne comme suit : la surface supérieure du système va capter la lumière du jour et la rediriger vers le plafond en protégeant l'occupant des pénétrations directes du soleil. Le plafond à son tour va diffuser la lumière profondément dans la pièce. Ce système permet d'apporter la lumière du jour au fond de l'espace et, par conséquent, assure le confort visuel par l'obtention d'un niveau d'éclairage uniforme et la réduction de la consommation d'électricité.



Figure 88 : Vue intérieure d'une étagère de lumière (Source : David. B. Floyd et al.)

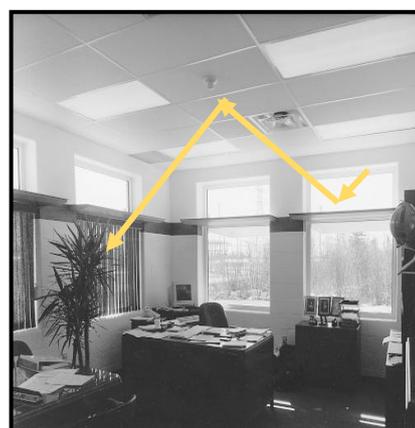


Figure 89: Le fonctionnement du système (Source: ENERGY EFFICIENCY MANUAL, CONTROL AND USE OF SUNLIGHT,)

I. 4. Les conduits de lumière (light pipe)

Le conduit de lumière est une stratégie visant à apporter la lumière du jour au fond d'un espace ou aux étages inférieurs d'un immeuble. Il est composé de : un capteur solaire qui rassemble la lumière du soleil (il peut être un simple miroir fixe ou un système informatisé sophistiqué (Héliodon) qui suit les mouvements du soleil), un concentrateur qui regroupe l'énergie solaire sur une petite surface (il est fait d'un miroir de concentration ou de lentille qui concentre l'énergie captée à partir d'un collecteur de grande taille sur une surface plus petite de sorte qu'il peut être transporté efficacement), un système de transport (il peut être une simple ouverture à travers les différents étages d'un bâtiment comme il peut être un prisme) et enfin, un système de distribution. La lumière est ensuite transportée vers l'intérieur.



Figure 90: Le système Light pipe (Source : Bartenbach L'chtLabor)

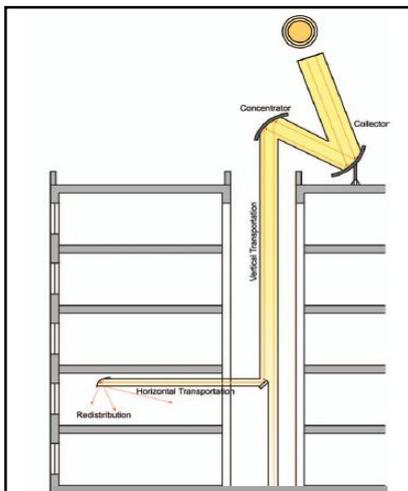


Figure 91: Les composants du système (source : Bartenbach L'chtLabor)

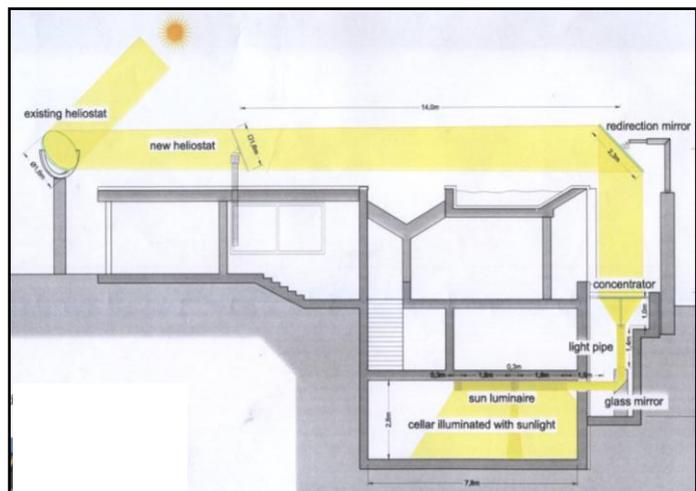


Figure 92 : Le fonctionnement du système (source : Bartenbach L'chtLabor)

La technique de conduit de lumière a pour but d'éclairer par la lumière du jour des espaces qui n'ont pas un contact direct vers l'extérieur, comme des sous sols, par exemple. Ce système permet aussi de rendre les luminaires électriques offrant une lumière propre dont la source initiale est la lumière naturelle (figure 92).

I.5. Les stores réfléchissants (les persiennes)

Les stores réfléchissants actuels ou les persiennes ont une double fonction : la première est de réduire l'effet de l'éblouissement causé par la fenêtre qui provient de la pénétration directe du rayonnement solaire dans un espace, la deuxième, consiste à rediriger la lumière naturelle

vers le fond du local, augmentant ainsi le niveau de la lumière du jour, ce qui permet d'obtenir une répartition uniforme de la lumière sur toute la surface de l'espace. Comme le système light shelf, le système lamelle fonctionne de façon optimale dans des conditions de ciel clair avec soleil. Les persiennes peuvent être conçues pour être statiques ou dynamiques. Dans le dernier cas, elles sont contrôlées automatiquement de manière qu'elles puissent suivre le mouvement du soleil. Sur une fréquence quotidienne et saisonnière, les persiennes automatiques donnent généralement de meilleurs résultats que ceux statiques, mais nécessitent une calibration et des algorithmes qui ont besoin d'ajustement en fonction des besoins de l'éclairage du bâtiment.

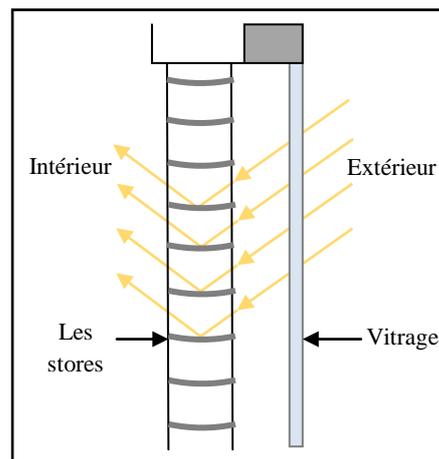


Figure 93: Les stores réfléchissants
(Source : Auteur)

I.6. Les vitrages spéciaux

I.6.1. Les vitrages directionnels

Ce type de vitrage sert à rediriger très efficacement les rayons solaires directs vers le fond d'une pièce. Ils peuvent aussi être employés pour rediriger la lumière zénithale vers le bas d'un atrium ou vers une salle en sous-sol. Les panneaux de vitrages directionnels peuvent être utilisés en configurations fixes et mobiles.

I.6.2. Les Holo-lux

Le holo-lux est un type de vitrage qui consiste à guider la lumière venant de l'extérieur vers l'intérieur du local, de manière à éclairer une grande surface et à obtenir un éclairage plus profond. Il peut être installé au niveau de la façade ou en toiture (cas d'éclairage zénithal). Le holo-lux peut aussi être combiné avec une protection solaire dans une façade à double peau.

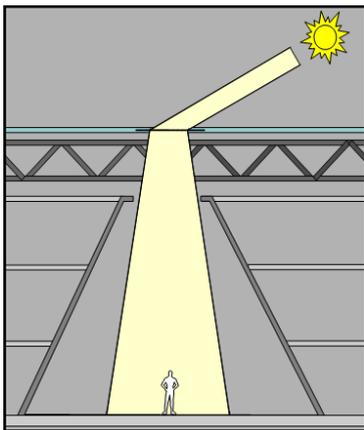


Figure 94 : Principe de fonctionnement de holo-lux. (Source : GLB)



Figure 95 : L'intégration de holo-lux dans le plafond de bibliothèque de l'académie Mont Cenis, Herne. (Source : GLB)

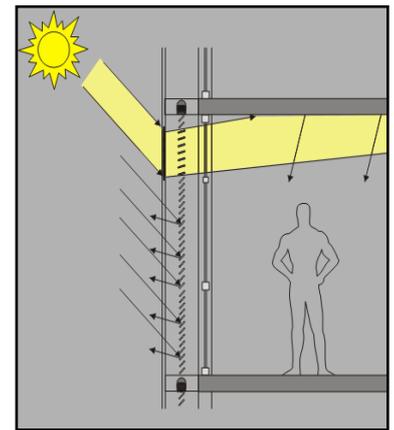


Figure 96 : Holo-lux combiné avec une protection solaire en double peau. (Source : GLB)

I.6.2. Les vitrages prismatiques

Le vitrage prismatique est conçu pour changer la direction de la lumière et la réorienter au moyen de la réfraction et réflexion. Le principe de fonctionnement des vitrages prismatiques est le suivant : quand un rayon de lumière frappe le prisme, sa direction est modifiée en raison de la réfraction. Une partie de celui-ci est alors réfléchi vers le plafond et au-delà, vers l'arrière de la salle. En principe, le panneau prismatique peut être placé dans la partie supérieure d'une fenêtre latérale. Les vitrages prismatiques peuvent, soit rediriger la lumière naturelle plus profondément dans le bâtiment, soit exclure la lumière d'un espace. Bien qu'ils soient habituellement transparents, ils obscurcissent la vue vers l'extérieur. Il vaut donc mieux les utiliser pour la partie supérieure d'une fenêtre afin de ne pas couper la vue des occupants.

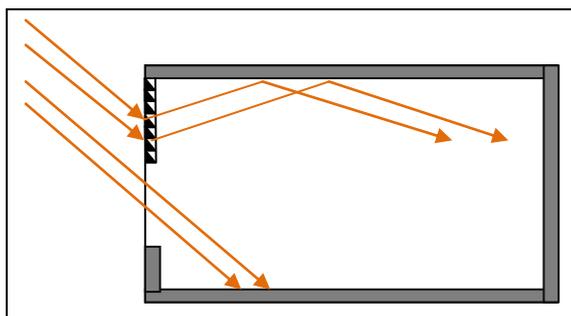


Figure 97 : Le système de vitrage prismatique (Source : Auteur)

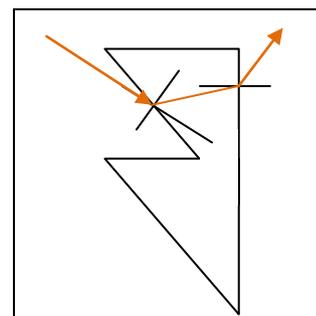


Figure 98 : La réfraction de la lumière par le prisme. (Source : Auteur)

II. Les caractéristiques du système light shelf

II. 1. Description et définitions

Un light shelf est un auvent dont la surface supérieure est réfléchissante qui se situe au niveau de la fenêtre, utilisé aussi bien pour canaliser passivement l'éclairage naturel dans un espace et pour fournir de l'ombre. La lumière du soleil est réfléchiée par la surface supérieure du light shelf vers l'intérieur de local et en particulier vers le plafond qui fournit une lumière diffuse supplémentaire qui donne un éclairage uniforme et permet également la pénétration de la lumière profondément, ce qui réduit le besoin d'éclairage artificiel.

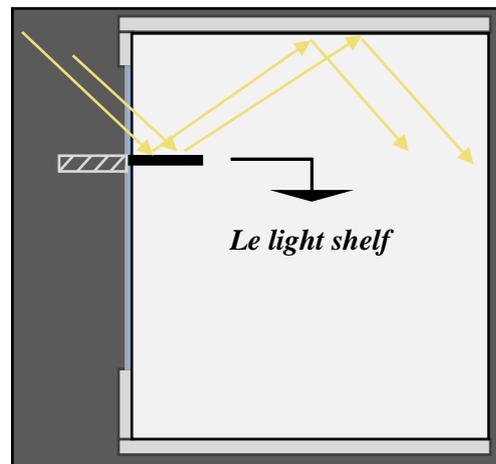


Figure 99: Le système light shelf
(Source : Auteur)

Le light shelf est un dispositif simple qui doit être combiné avec d'autres dispositifs pour éviter les problèmes d'éblouissement qui sont dus à la pénétration directe de la lumière dans la partie inférieure de la fenêtre. La caractéristique principale du light shelf est la réflexion au niveau de sa face supérieure. Il est équipé d'un bord pour la sécurité. Les principales propriétés d'un light shelf sont de faire pénétrer la lumière profondément dans la pièce, de contrôler la lumière directe du soleil en réduisant l'éblouissement tout en admettant la lumière du ciel et les rayons solaires réfléchis. Il permet également de réduire les charges de refroidissement en diminuant partiellement les gains solaires pendant les périodes estivales, d'atteindre le confort visuel et d'apporter l'ombre près des fenêtres. Cet élément architectural peut être intégré dès le début de la conception du bâtiment ou ajouté par la suite pour augmenter son efficacité énergétique. Le système light shelf fournit un éclairage naturel d'une zone qui s'étend profondément.

La largeur de cette zone dépend de la hauteur de la partie supérieure de la fenêtre, de son orientation, de la latitude du site, de l'heure du jour et de la clarté du ciel.

II.1.1. Effet de la hauteur de la partie supérieure de la fenêtre

Pour que l'étagère de lumière fonctionne efficacement, il doit être installé au moins à 2 m au sol. Si le light shelf se trouve en haut et si la hauteur de la partie supérieure de la fenêtre est grande, le light shelf peut fournir une pénétration plus profonde de la lumière naturelle dans le local tout en ombrant la fenêtre. Ceci est parce que le système peut jeter tout les rayons directs du soleil vers l'intérieur du local. Ainsi, grâce à ce système, la profondeur de la zone intérieure peut s'étendre sur une distance de 3 mètres à 7 mètres de la fenêtre. La figure 2 montre que la lumière naturelle captée par le light shelf se distribue plus profondément dans le local dans le cas où le light shelf est placé le plus haut possible dans la fenêtre.

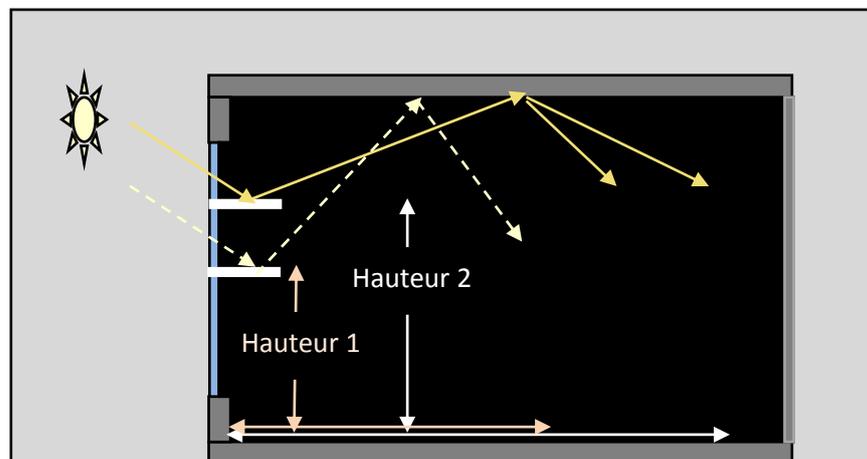


Figure 100: La hauteur du light shelf

(Source : Auteur)

II.1.2. L'effet de l'orientation de la fenêtre

L'orientation de la fenêtre joue aussi un rôle très important : si la fenêtre se trouve en face du soleil, elle va recevoir une énorme quantité d'énergie qui pourrait être utilisée pour éclairer naturellement des locaux. En principe, le côté le plus éclairé de la voute céleste est au nord, mais cette orientation diffère selon le climat de la région. Dans l'hémisphère nord, l'orientation la plus favorable est au sud, car elle peut assurer une bonne stratégie lumineuse et thermique à la fois. Si une fenêtre est orientée entre sud-est et sud-ouest et si elle reçoit la

lumière directement du soleil, chaque unité de surface pourrait éclairer de 20 à 100 unités de surfaces intérieure. Le tableau suivant donne les caractéristiques de chaque orientation :

Orientation	Caractéristiques
Nord	Lumière stable-pas de lumière directe du soleil, que diffuse le ciel, répartition la même, paysage éclairé par le direct du soleil, protection de l'intérieur pour les luminances du ciel blanc, pas de problème de surchauffe en été.
Sud	Lumière changeante-lumière du soleil variable durant la journée, répartition pas la même, protection de l'extérieur et de l'intérieur, problème de surchauffe en été et risque d'éblouissement.
Est	Lumière directe du soleil le matin, protection extérieure souhaitable.
Ouest	Lumière directe du soleil le soir, protection extérieure obligatoire.

Tableau 8: Les caractéristiques de chaque orientation (Source : Auteur)

II.1.3. L'effet de la latitude du site

La latitude du site est l'un des facteurs principaux qu'il faut prendre en considération lors de choix du light shelf car l'angle d'incidence des rayonnements solaires qui vont être captés par le système varie en fonction de la latitude du lieu. La quantité d'énergie reçue est plus importante dans les hautes latitudes. C'est pour cela que certaines configurations du light shelf sont adéquates dans certaines régions alors que dans d'autres, elles donnent des résultats non satisfaisants et créent plusieurs problèmes en termes de confort visuel et thermique.

II.1.4. L'effet de l'heure du jour

Le light shelf fonctionne seulement dans les moments du jour où le soleil brille dans le ciel car son rendement varie en fonction du nombre d'heures pendant lesquelles le système est exposé au soleil. Donc, il faut orienter l'étagère de lumière de telle façon qu'elle puisse capter le maximum de lumière qui est émise dès le lever jusqu'au coucher du soleil, surtout en hiver où le nombre d'heures ensoleillées est réduit. Par ciel clair avec soleil, la répartition lumineuse varie fortement d'une heure à l'autre et d'un point à l'autre du local. La lumière disponible augmente jusqu'à la mi-journée, puis elle diminue.

II.1.5. L'effet de la clarté du ciel

La clarté du ciel est un facteur très important pour que le système light shelf fonctionne de manière parfaite et donne des résultats exacts. Le light shelf fonctionne le plus efficacement dans des conditions du ciel clair avec soleil car il capte le maximum de rayons solaire et les fait pénétrer profondément dans le local. Par contre, dans des conditions d'un ciel couvert, ces étagères de lumière ne peuvent pas augmenter le niveau d'éclairage à l'intérieur de la pièce car le niveau d'éclairage extérieur est faible.

II.2. Les différentes composantes

Le light shelf est une surface horizontale composée de deux parties, la première se trouve à l'intérieur et apparaît comme un plateau éclairé ; la deuxième est à l'extérieur et joue le rôle d'ombrage (cette partie peut être exclue dans certaines régions). Ce système est inséré dans un cadre de fenêtre le divisant en deux parties : supérieure et inférieure. La partie inférieure occupe la plus grande surface vitrée de la fenêtre alors que la partie supérieure est celle qui redirige la lumière et la fait pénétrer à l'intérieur du local par le plafond. Ce système d'éclairage a besoin de quatre composantes essentielles pour qu'il puisse jouer son rôle parfaitement. Ces éléments peuvent être installés à l'intérieur ou à l'extérieur selon le besoin d'éclairage du local. Le schéma suivant montre les principaux composants du light shelf ainsi que le rôle de chacun d'eux :

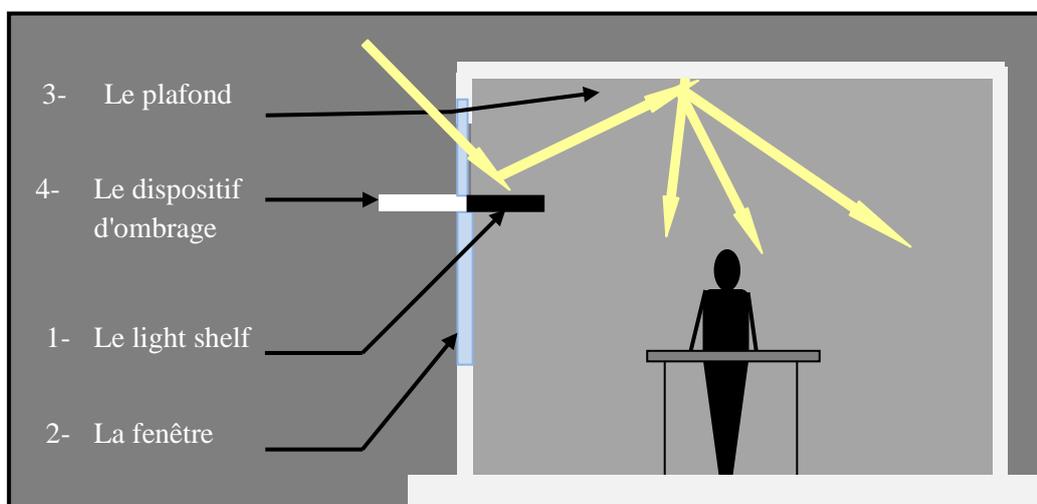


Figure 101 : Les différents composants du système light shelf
(Source : Auteur)

II.2.1. Le light shelf lui-même

Un light shelf est un auvent très réfléchissant qui permet la pénétration du rayonnement solaire par sa partie supérieure dans le local. Il est tout simplement un réflecteur de lumière. La surface du light shelf doit être aussi réfléchissante que possible comme elle peut être mate, brillante ou spéculaire. Une surface spéculaire renvoie théoriquement plus de lumière mais il faut pour cela qu'elle soit nettoyée très régulièrement. En pratique, un light shelf brillant ou semi-spéculaire est le meilleur choix.

II.2.2. La configuration de la fenêtre

Le light shelf divise la fenêtre en deux parties ; il distribue la lumière naturelle seulement par la portion de la fenêtre qui se trouve au dessus du réflecteur. Les fenêtres fonctionnent mieux dans des conditions de ciel clair avec soleil car, les light shelves nécessitent un ensoleillement direct. Elles ne doivent pas être ombragées par des objets à l'intérieur ou même à l'extérieur. Si la fenêtre est munie d'un vitrage teinté ou réfléchissant, il peut réduire considérablement les bénéfices potentiels du light shelf ou les rendre peu importants. Ces types de vitrage généralement bloquent de 70 à 80 % de la lumière solaire incidente. Les rayons de lumière sont très utiles avec les fenêtres qui ont une grande quantité de surface de vitrage à une hauteur supérieure de 2 m.

II.2.3. Effet du plafond

Le plafond est aussi un élément important qui influence les performances des light shelves car il joue le rôle de distributeur de la lumière naturelle qui est redirigée vers l'intérieur par ce dernier. Cette distribution dépend de la hauteur et de l'inclinaison du plafond ainsi que de ses caractéristiques de diffusion qui sont importantes au niveau de ce processus. Ces caractéristiques sont sa finition liée à son degré de specularité, sa couleur et sa pente. Bien qu'un plafond présentant une surface spéculaire réfléchisse plus de lumière dans le local, il faut savoir qu'il augmentera aussi les risques d'éblouissement à proximité du light shelf. La couleur du plafond doit être aussi claire que possible pour augmenter la réflexion de la lumière. Enfin, la pente du plafond a beaucoup d'importance : un plafond incliné vers le fond du local ou de forme arrondie (incurvée vers l'intérieur) de l'espace augmentera fortement la profondeur de la pénétration de la lumière dans le local.

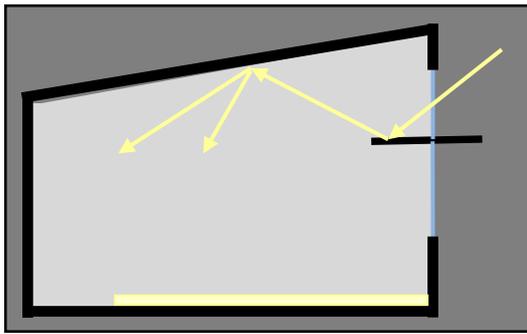


Figure 102: Light shelf avec un plafond incliné
(Source : Auteur)

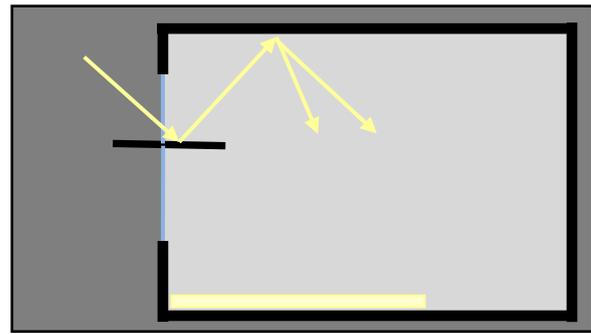


Figure 103: Light shelf avec un plafond droit
(Source : Auteur)

Il est donc important d'introduire le light shelf au début de la phase de conception architecturale et structurelle d'un édifice puisqu'il nécessite un plafond relativement haut pour être efficace et de préférence, qu'il soit combiné avec un plafond incliné vers l'intérieur et teinté par un matériau très réfléchissant.

II.2.4. Le dispositif d'ombrage

Un light shelf est un élément architectural qui peut améliorer la distribution de lumière du jour dans un local seulement éclairé par des fenêtres qui sont exposées directement au soleil. Donc, ce système doit être équipé d'un dispositif d'ombrage pour empêcher l'éblouissement causé par la partie inférieure de la fenêtre. Ces dispositifs d'ombrage peuvent être externes ou internes selon les besoins. Aussi, grâce à ce dispositif, la conservation d'énergie et le confort thermique peuvent être atteints.

II.3. L'emplacement et/ou la position

Le light shelf s'installe au niveau de la fenêtre sur une ou plusieurs façades. Un problème fondamental avec les light shelves est la nécessité de les placer trop élevés. En pratique, le light shelf doit généralement être installé au-dessus du niveau de la tête des gens, au moins à 2m du sol. Cette hauteur permet au système de mieux fonctionner, d'éviter le problème de stockage sur le light shelf et enfin qu'il ne soit pas une gêne pour les occupants de l'espace surtout avec une largeur importante.

Il y a deux raisons pour lesquelles le light shelf doit être installé haut :

-Une des raisons, c'est la sécurité : le light shelf s'étend dans l'espace. Les gens pourraient toucher le dispositif s'il était assez bas. C'est pourquoi il doit être installé au-dessus de la hauteur d'une personne.

-L'autre raison est l'éblouissement. La partie supérieure du light shelf a une surface réfléchissante. Si l'étagère se trouvait sous le niveau de l'œil, elle pourrait refléter la lumière du soleil dans les yeux des gens. Donc, il doit être installé à un niveau inférieur et les gens ne seraient pas en mesure de se rapprocher de la fenêtre. Aussi, la position basse va augmenter la quantité de lumière réfléchie vers le plafond mais elle accroît les risques d'éblouissement.

II.4. La profondeur du système Light shelf

La conception d'un light shelf devrait être intégrée avec le bâtiment et prévue au début des étapes de la conception. Sa taille et sa profondeur dépendent de la fenêtre, les dimensions du local et l'orientation de la façade. Il est aussi large que la fenêtre et dans certaines configurations, il dépasse la largeur de la fenêtre. Sa profondeur est proportionnelle à la hauteur de la partie supérieure de la fenêtre mais le rapport est un compromis. La profondeur requise pour refléter la lumière dépend de l'élévation du soleil. Si le soleil est bas dans le ciel, elle fait face à la fenêtre et dans ce cas, on a besoin d'une étagère très profonde pour refléter la majorité de la lumière du soleil au plafond. Un light shelf à cette profondeur peut être difficile à installer comme il peut paraître inadapté. Pour résoudre tous ces problèmes, ses côtés devraient être conçus pour garder la brillance de la lumière du soleil tout en rendant l'étagère plus large que la fenêtre ou en installant un élément latéral qui s'étende vers le haut de l'étagère. Alors, l'augmentation de la profondeur du light shelf limitera l'éblouissement mais diminuera aussi la pénétration de la lumière et la vue vers l'extérieur. Même si une orientation horizontale est proche de l'optimum, le light shelf ne doit pas être exactement horizontal, ce qui est le cas d'une étagère fixe. De préférence, il faut utiliser un light shelf réglable dont on peut régler l'inclinaison selon l'angle d'incidence du soleil. Cette inclinaison améliorera la faible pénétration de la lumière du jour à de hautes altitudes du soleil et l'incliner légèrement vers le haut, permettra de refléter plus de lumière au coucher du soleil. Cette inclinaison peut être automatisée avec un assez simple capteur optique.

Il existe une autre configuration du light shelf qui est représentée par un store vénitien avec des lames réglées à une position horizontale. Si les étagères de lumière sont assez étroites pour égaler la profondeur du cadre de la fenêtre, elles ne poseraient pas beaucoup de problème de sécurité. En outre, étant horizontales, elles n'auraient pas beaucoup interféré avec la vue. Le principal inconvénient de cette disposition est sa susceptibilité de refléter une image du soleil dans les yeux des occupants qui se tiendraient à proximité et qui regarderaient par la fenêtre.

II.5. Les différents types de système light shelf existants

Un light shelf se situe à environ deux mètres de hauteur du sol, divisant la fenêtre en deux parties. Sa position dépend de la configuration de la pièce (la géométrie), de la hauteur de la personne et de la hauteur sous plafond pour permettre une vue vers l'extérieur et ne pas causer d'éblouissement. Pour que la configuration du light shelf soit efficace et performante durant toute l'année, il faut qu'elle réponde à deux exigences : la première, avoir la capacité de rediriger la lumière naturelle vers le plafond ce qui permettra de faire pénétrer la lumière naturelle profondément dans la pièce tout en répondant aux demandes d'éclairage naturel. La deuxième, assurer les besoins d'ombrage du local, c'est-à-dire, protéger l'occupant des pénétrations directes du soleil qui provoquent l'éblouissement, la gêne visuelle, la surchauffe en été et par conséquent, apportera la sensation d'inconfort.

Il existe plusieurs types de light shelf qui sont classés suivant différents paramètres : selon son inclinaison, sa position à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la fenêtre, sa forme (droite ou incurvée) comme on peut avoir un light shelf combiné.

II.5.1. Les light shelves type incliné

L'inclinaison du système light shelf permet d'optimiser les rayons solaires. Le principe de base peut être amélioré par un système mobile permettant différentes réorientations de la lumière en fonction des saisons. Cette inclinaison dépend de l'angle d'incidence du rayonnement solaire qui varie selon la latitude du lieu. Une petite inclinaison peut améliorer les performances du système qui peut prendre deux formes : soit tourné vers l'intérieur et de cette façon, il va mieux diffuser la lumière au fond de la pièce et mieux l'éclairer. Il introduit également la possibilité de réfléchir la lumière solaire vers les yeux des occupants

car l'angle solaire est faible. Soit tourné vers l'extérieur et dans cette configuration, le light shelf va protéger l'occupant des pénétrations directes du soleil qui provoquent l'éblouissement, créant un grand ombrage, mais il apporte moins de lumière vers le fond de la pièce.

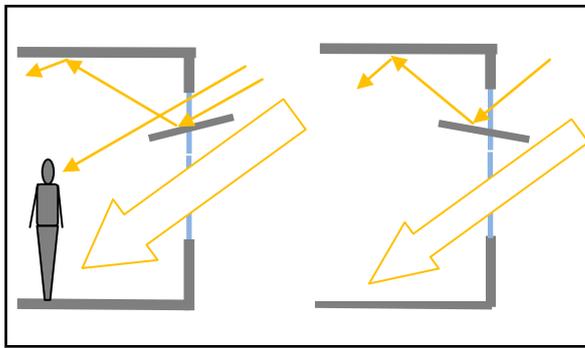


Figure 104 : Light shelves type incliné
(Source : Auteur)

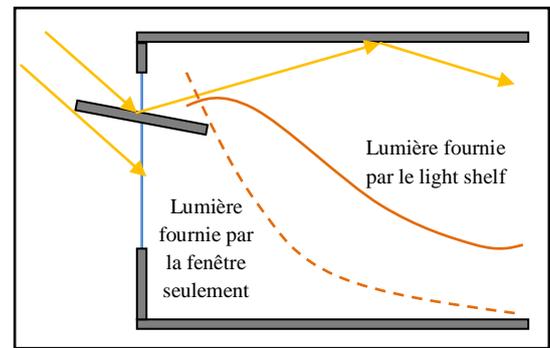


Figure 105 : Le rendement de type incliné
(Source : Auteur)

II.5.2. Les light shelves type droit ou incurvé

Les light shelves droits sont un bon compromis entre une inclinaison du système vers l'intérieur de la pièce ou vers l'extérieur. Ils captent le maximum des rayons solaires par leurs surfaces horizontales, apportent mieux la lumière au fond et projettent l'ombre sur la grande fenêtre, réduisant l'effet de l'éblouissement. Alors que les light shelves incurvés captent plus de lumière surtout lorsqu'ils sont fabriqués avec un matériau très réfléchissant (aluminium par exemple) ; mais ce type ne s'adapte pas aux climats chauds car il contribue à la surchauffe, surtout pendant les mois d'été.

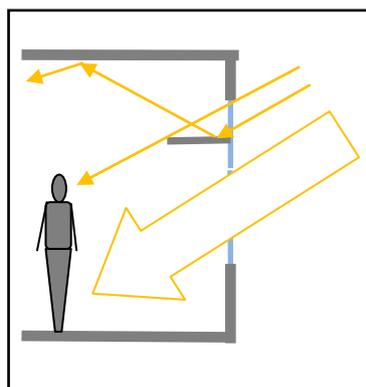


Figure 106 : Light shelves droites
(Source : Auteur)

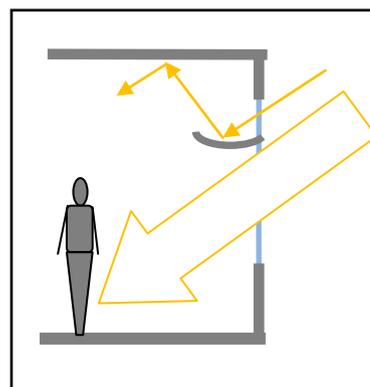


Figure 107 : Light shelves incurvés
(Source : Auteur)

II.5.3. Les light shelves type intérieur, extérieur

Le light shelf qui est placé à l'intérieur offre un ombrage pour la partie vitrée qui se trouve au dessous de l'étagère, augmentant ainsi la pénétration de la lumière dans le local. Par contre, le light shelf extérieur est plus efficace en fournissant de l'ombre à l'intérieur tout en reflétant moins de lumière vers l'arrière de la salle.

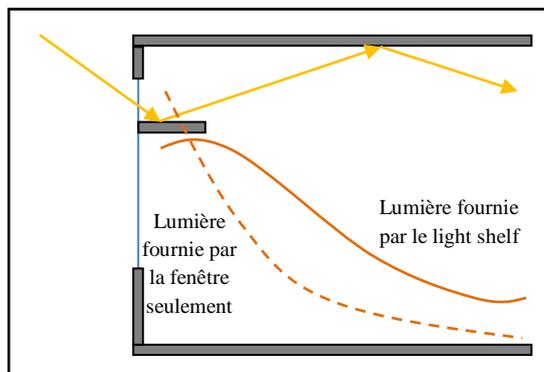


Figure 108 : Light shelf type intérieur
(Source : Auteur)

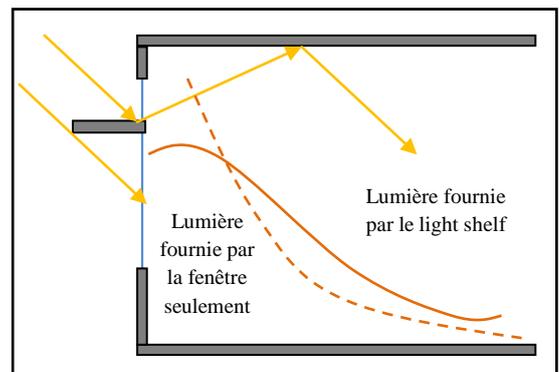


Figure 109 : Light shelf type extérieur
(Source : Auteur)

II.5.4. Les light shelves type: combiné

Selon la latitude et le climat de la région, de multitudes configurations de light shelf sont produites. Le light shelf combiné doit assurer à la fois la distribution lumineuse la plus uniforme dans le local et la plus profonde ainsi qu'une meilleure protection contre le rayonnement solaire direct surtout pendant les saisons chaudes.

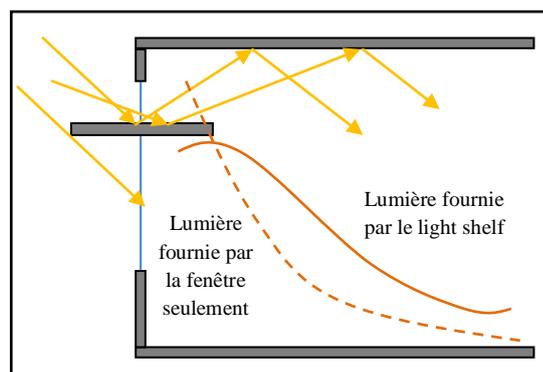


Figure 110 : Le rendement de type combiné
extérieur+intérieur (Source : Auteur)

Les schémas ci-dessous montrent quelques configurations de light shelf combiné:

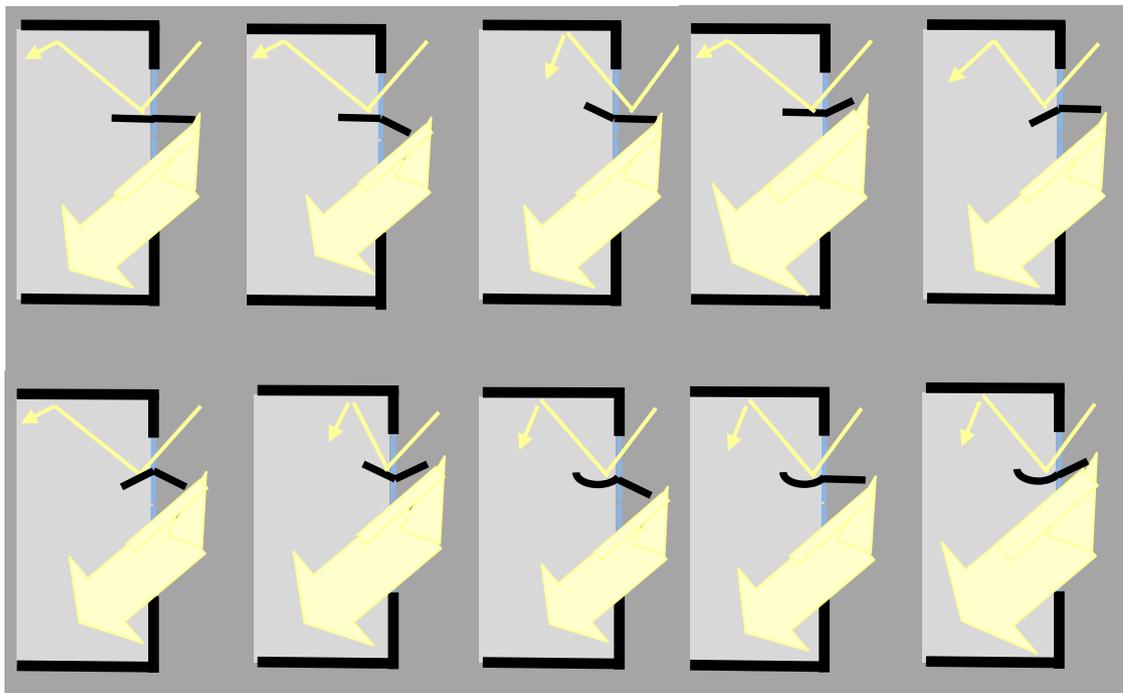


Figure 111 : Light shelves combinés (Source : Auteur)

Afin que les utilisateurs soient en mesure de régler la luminosité de la pièce pour assurer le confort visuel à différents moments de la journée et dans les saisons, des stores peuvent être installés au-dessus et en dessous des light shelves.

II.6. Le fonctionnement du système

Les concepts traditionnels considèrent la fenêtre comme une source d'éclairage principale et son rôle est limité pour éclairer seulement les espaces qui se trouvent à sa proximité, ce qui crée un éclairage non uniforme qui se dégrade vers le fond du local (fig.112) et par conséquent, nous allons rencontrer un grand problème d'éblouissement et de contraste entre la fenêtre et le fond de la pièce. Le light shelf est apparu pour apprivoiser la lumière du soleil qui pénètre par les fenêtres. Il s'agit d'un miroir qui est installé à l'intérieur de la fenêtre et qui fait entrer la lumière du soleil et la réfléchit vers le plafond, puis la distribue profondément dans le local, ce qui permet d'avoir un éclairage plus au moins uniforme et plus profond (fig.113).

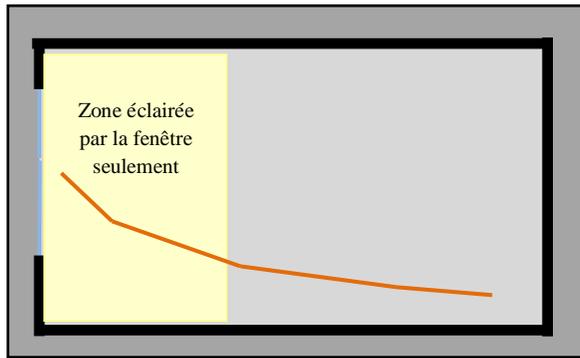


Figure 112: la courbe de l'éclairement dans un local éclairé uniquement par la fenêtre.
(Source : Auteur)

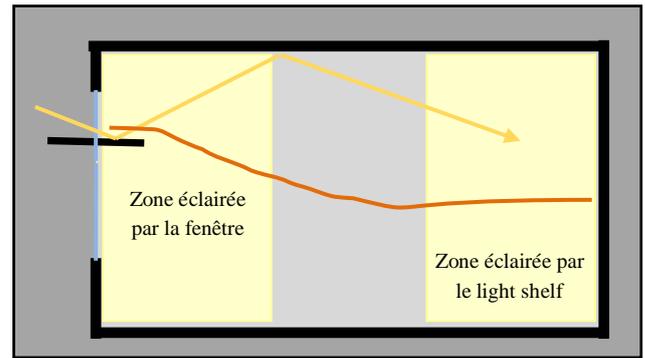


Figure 113: la courbe de l'éclairement dans un local éclairé par une fenêtre munie d'un light shelf.
(Source : Auteur)

Ce système a une profondeur variable et un réflecteur principal et des réflecteurs latéraux pour rediriger la lumière du soleil qui arrive obliquement vers l'arrière de l'espace. Un réflecteur secondaire avec un film spéculaire très réfléchissant (95%) est placé au-dessus du réflecteur principal au niveau du plan du plafond près de la fenêtre pour intercepter et rediriger les faibles angles de soleil en plein hiver sur le réflecteur principal. Pour maximiser la quantité de lumière captée par le réflecteur principal tout en minimisant la profondeur du light shelf, des bi-niveaux et des multi-niveaux de systèmes de réflecteurs ont été développés.

Ces systèmes servent à augmenter l'ouverture de vitrage au niveau du plan de la fenêtre de 0.6 à 0.9 m et d'abaisser la hauteur de la fenêtre de 1,5 à 1,2 m tout en réduisant la profondeur du light shelf de 1.4m à 0.5m.

II.7. L'efficacité du système

Pour qu'un light shelf soit efficace, le plafond et les murs de l'espace équipé de ce système doivent en général être clairs pour bien réfléchir la lumière et pour aider la distribution de la lumière. De plus, la surface supérieure du light shelf doit être enrobée d'un matériau réfléchissant de sorte que lorsque la lumière le frappe, elle va rebondir vers le plafond en poussant la lumière profondément dans la pièce. Aussi, pour augmenter son efficacité, le meilleur emplacement de l'étagère doit être supérieur à 2m car il n'est généralement pas pratique de l'installer si élevé, ni si bas. Pour que les étagères donnent de meilleurs résultats, elles devraient être installées horizontalement. Si la surface de l'étagère est très

réfléchissante, l'angle de la lumière qui est réfléchi sur le plafond sera égal à l'angle d'incidence de la lumière du soleil : $\theta_1 = \theta_2$, comme le montre le schéma ci-contre:

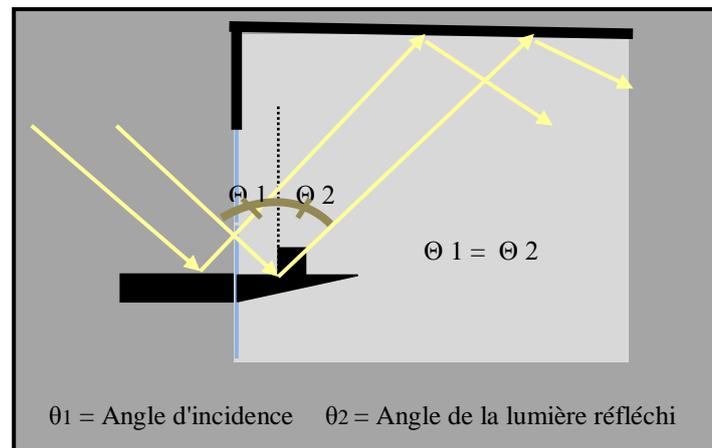


Figure 114: Angle de la réflexion de système light shelf
(Source : Auteur)

Dans une période d'une semaine, assez de poussière peut se déposer sur le light shelf qui dégrade sérieusement son rendement, son performance et son efficacité. Par conséquent, les étagères de lumière doivent être nettoyées avec une fréquence régulière et il faut les garder toujours propres.

II.8. Les avantages et inconvénients du système

Le système light shelf apporte plusieurs avantages dont le principal est de capter le maximum de lumière pour la réfléchir vers le plafond qui va la rediffuser par la suite vers le fond de l'espace. Autre avantage, lorsque le système est équipé d'un dispositif d'ombrage, il protège les occupants des rayons directs du soleil qui produisent l'éblouissement et améliore donc le confort visuel tout en dégradant le fort contraste. De plus, il accroît l'efficacité énergétique du bâtiment par l'élimination du besoin en lumière artificielle durant la journée. Les light shelves peuvent également contribuer à la bonne santé et le bien-être psychologique des personnes qui utilisent les espaces qu'ils illuminent. La lumière naturelle semble être très avantageuse, surtout lorsqu'on la compare avec l'éclairage artificiel et elle peut assurer un espace agréable et confortable pour le travail. La présence de la lumière naturelle en quantité suffisante dans un espace permet selon les physiologistes et les ergonomes d'augmenter la satisfaction des travailleurs ainsi que la qualité du travail à fournir.

Par contre, l'inconvénient majeur du light shelf est qu'il ne fonctionne que dans les jours ensoleillés. Quand le ciel est couvert, le light shelf sera en mesure de disperser un peu de lumière mais pas assez pour faire une différence significative et il sera généralement nécessaire de le compléter avec la lumière artificielle. Ces éléments architecturaux peuvent être conçus pour concorder avec le regard et la sensation d'un bâtiment de sorte qu'ils ne soient pas gênants mais ils seront certainement remarqués. Lorsque les étagères sont installées à l'intérieur, les gens doivent se rappeler qu'il ne faut pas stocker ou afficher dessus des objets car cela peut interrompre le flux de lumière. L'autre problème est celui de l'éblouissement qui peut être causé par l'installation du light shelf dans une hauteur basse. Si cette lumière est concentrée en un seul endroit et si la lumière entrante dans une fenêtre est simplement déviée vers l'intérieur de l'espace, les occupants qui regardent vers la fenêtre seront aveuglés par l'éblouissement alors que l'idéal serait que cette lumière soit de préférence distribuée à toutes les parties de la pièce en quantités égales.

III. Le système light shelf et le climat

La conception des light shelves dépend du climat de la région. Ils sont généralement utilisés dans les pays ayant un climat doux et tempéré alors que leur utilisation dans les climats chauds reste limitée. Si le soleil est trop chaud, les étagères vont aussi chauffer le local ; les light shelves modernes ont réglé ce problème par divers moyens, par l'utilisation de configuration adéquate pour le climat, par la peinture de sa surface supérieure par un matériau moins réfléchissant afin qu'ils réduisent la température d'une pièce en été, etc... La conception du light shelves dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont : l'orientation de la façade, la latitude du site et la longueur de la saison de chauffage et de refroidissement (en hiver et en été).

III. 1. L'influence de l'orientation

L'utilisation des concepts de l'architecture passive, y compris celui relatif à une bonne orientation du bâtiment, permet de profiter de la chaleur qui provient du soleil. Dans l'hémisphère nord, les light shelves sont habituellement déployés le long de la façade sud d'un bâtiment, de sorte qu'ils soient en mesure de capter au maximum la lumière du soleil.

En hiver, la façade Sud est celle qui reçoit le plus d'ensoleillement mais elle nécessite aussi une protection durant les mois d'été (brises soleil). C'est l'inverse dans l'hémisphère sud où les light shelves ont besoin d'être placés sur le côté nord d'un bâtiment afin d'éviter la surchauffe. Dans les deux cas, les rayons de lumière doivent être régulièrement orientés selon les caractéristiques climatiques de la région de façon à s'assurer qu'ils sont aussi réfléchis que possible afin qu'ils continuent d'être efficaces.

III. 2. L'influence de la latitude du lieu

L'inclinaison de l'axe de rotation de 23° de la terre par rapport au plan de l'écliptique fait varier le flux solaire au cours du temps. La quantité d'énergie reçue par unité de surface diffère en fonction de la latitude au cours des 365 jours nécessaires à la révolution autour du soleil. Par exemple, en hiver, la zone qui reçoit le plus d'énergie solaire se trouve dans l'hémisphère sud aux alentours du tropique du Capricorne. En été, c'est l'hémisphère nord et le tropique du Cancer qui reçoivent le plus d'énergie, augmentant ainsi la température en surface dans ces régions. La quantité de lumière reçue au niveau de l'équateur ou la latitude est égale à 0° est plus grande que celle reçue au pôle Nord ou au pôle Sud ou la latitude va augmenter, car les rayons solaires tombent perpendiculairement au niveau de l'équateur.

Donc, L'utilisation du light shelf comme un système d'éclairage naturel doit être bien étudiée pour modifier l'angle d'inclinaison du système selon la latitude du lieu d'implantation, soit droit ou incliné, extérieur ou intérieur, pour capter le maximum de lumière du jour.

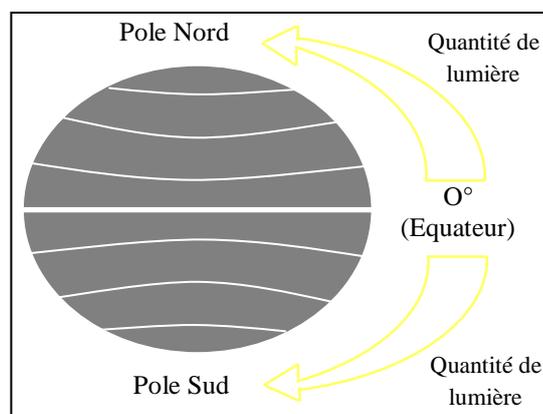


Figure 115 : La variation de quantité de lumière reçue selon la latitude du lieu.

(Source : Auteur)

III. 3. L'influence des saisons

Dans l'hémisphère nord, le bâtiment doit être orienté de sorte que le grand axe du bâtiment s'exécute dans la direction Est vers Ouest et la plus grande quantité de revêtements muraux et les fenêtres doivent être face au sud afin de profiter de la lumière du soleil en hiver. Selon la saison et la position du soleil, un light shelf bien conçu au sud et muni d'un dispositif d'ombrage externe peut protéger les fenêtres orientées vers le Sud des angles hauts de soleil en été, tandis qu'en hiver, il permet à la chaleur du soleil de pénétrer à l'intérieur du local avec un angle faible. Et c'est l'inverse dans l'hémisphère sud.

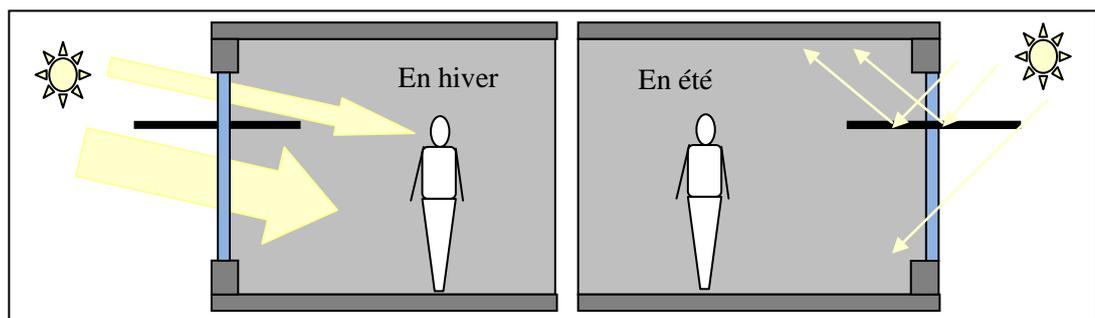


Figure 116 : L'influence des saisons (Source : Auteur)

Le système light shelf permet de partager le local qu'il va l'éclairer en deux zones: La première se trouve loin de la fenêtre (zone intérieure) et elle est éclairée par une lumière qui est dirigée vers le plafond par la petite fenêtre grâce à la surface réfléchissante du light shelf. La deuxième zone se trouve près de la fenêtre (zone extérieure): elle est éclairée par la grande fenêtre en dessous du light shelf. Les limites de ces deux zones suivent le changement de passage du soleil et les conditions du ciel. Elles forment deux zones vers l'intérieur quand le soleil est bas dans le ciel (en été) et elles se déplacent vers l'extérieur lorsque le soleil est haut dans le ciel (en hiver). Notons que ces deux zones se déplacent ensemble.

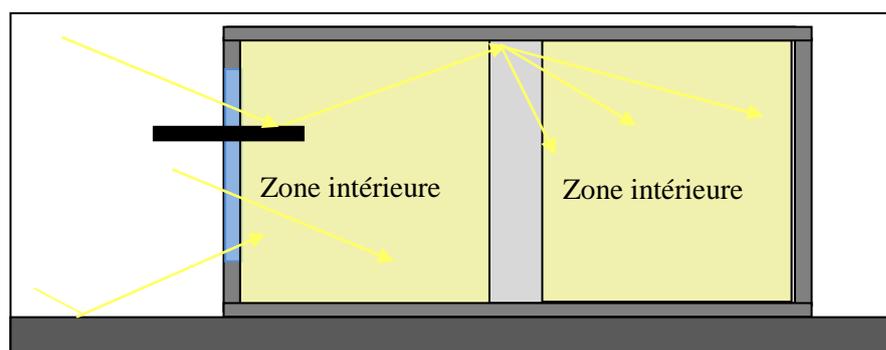


Figure 117 : La répartition lumineuse de système light shelf (Source : Auteur)

Pour que le light shelf fonctionne de manière optimale et donne un bon rendement pendant les saisons, il faut donc jouer avec la surface supérieure du système : Dans les régions ayant un climat chaud, il faut rendre la surface supérieure de l'étagère moins réfléchissante pour réduire le gain de chaleur dans l'espace en été. A l'inverse, dans les régions froides, il faut rendre les surfaces extérieures très réfléchissantes afin de capturer les gains de chaleur. Pendant la saison froide, le soleil est bas dans le ciel, la fenêtre et le light shelf permettent de capter une grande quantité de lumière à travers la fenêtre mais il faut contrôler ces rayons solaires, car ils peuvent donner lieu à l'éblouissement. Ce gain de chaleur solaire peut passivement chauffer le local, comme il peut être un problème pendant les mois chauds de l'été en contribuant à la surchauffe. C'est pour cette raison que le système light shelf doit être muni d'un dispositif d'ombrage (stores, brises soleil extérieurs...etc.) qui lui permettront de jouer son rôle parfaitement tout en bloquant les rayons solaires d'été et en gardant le local frais et bien éclairé en hiver.

IV. Le système light shelf et l'ombrage

Les solutions architecturales d'ombrage font généralement partie de la façade extérieure. Des brises soleil, des surplombs, des écrans d'ombre, des stores vénitiens, des stores verticaux, des stores à rouleaux, etc...sont couramment utilisés comme des systèmes de protection contre les rayons solaires directs. Un inconvénient de l'utilisation de ces dispositifs d'ombrage est le risque de réduction du niveau de lumière du jour à l'intérieur du local car ces dispositifs vont cacher une partie du ciel qui est une source potentielle de lumière. Cela peut augmenter l'utilisation de l'éclairage artificiel pour compenser le déficit en lumière.

L'une des formes efficaces des dispositifs d'ombrage est le light shelf. Ce système a deux problèmes de conception: le premier concerne l'emplacement du le light shelf et le deuxième, c'est comment l'installer pour éviter l'éblouissement et les gains de chaleur excessifs adjacents à la partie inférieure de la fenêtre sous l'étagère, surtout en été. Généralement, les étagères de lumière sont installées dans la partie haute de la fenêtre à l'intérieur ou à l'extérieur, juste au-dessus du niveau des yeux pour rediriger la lumière vers l'intérieur du local ; ce dispositif va refléter la lumière sur le fond de la pièce en utilisant le plafond intérieur comme un réflecteur au lieu d'un plafond typique. Dans le même temps, le

light shelf va porter l'ombre sur la partie inférieure de la fenêtre ce qui réduit la quantité de lumière reçue près d'elle tout en projetant la lumière vers l'arrière ou l'éclairage devient plus élevé. Mais, il est nécessaire de contrôler la quantité de lumière qui pénètre dans l'espace par des éléments de protection tels que les stores et les persiennes qui permettent à la lumière d'être orientée de manière qu'elle ne provoque pas de problème. Le résultat est un environnement lumineux équilibré, avec moins de contraste et d'éblouissement.

IV.1. L'ombrage de la fenêtre inférieure

Le système light shelf va diviser la fenêtre en deux parties, une grande fenêtre qui se situe sous l'étagère et une petite fenêtre au dessus de l'étagère. Si cette façade n'est pas équipée de ce système, ceci fournit un excès de lumière sur toute la surface vitrée de la façade. L'installation de ce système à l'intérieur de la fenêtre est une solution efficace pour bloquer cet excès de la lumière directe car il va ombrer la grande fenêtre qui se trouve au dessous de l'étagère et par conséquent, il va assurer à la fois un bon niveau d'éclairage qui est fourni par la petite fenêtre et une protection contre l'excès de lumière pour la grande fenêtre qui est la source principale d'éblouissement et de fort contraste.

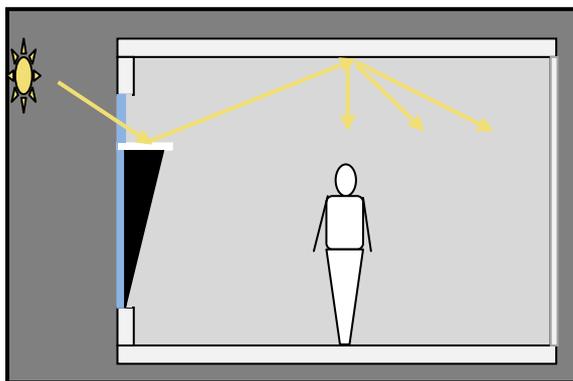


Figure 118 : Façade avec dispositif d'ombrage intérieur. (Source : Auteur)

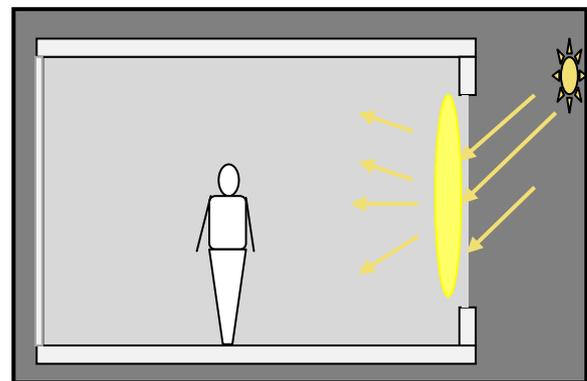


Figure 119 : Façade sans dispositif d'ombrage. (Source : Auteur)

IV.2. L'ombrage extérieur

En été, les fenêtres munies d'un système light shelf doivent être équipées avec un dispositif d'ombrage situé à l'extérieur dont le but d'ombrager la partie externe de la grande fenêtre. Lorsque l'ombrage extérieur est utilisé avec un light shelf, il doit être installé exactement au

même niveau que l'étagère. S'il est supérieur, il va bloquer l'entrée de la lumière du soleil vers l'espace au-dessus du light shelf. S'il est inférieur, la lumière directe du soleil va entrer dans le local par l'espace qui se trouve entre l'étagère et le dispositif d'ombrage. Dans cette configuration, si la teinte extérieure du dispositif d'ombrage a une surface de haute réflexion, ce dispositif va jouer deux rôles : le premier est bien sur la protection contre les rayons solaires directs et le deuxième, c'est la réflexion du rayonnement solaire vers la partie supérieure de la fenêtre (light shelf) :

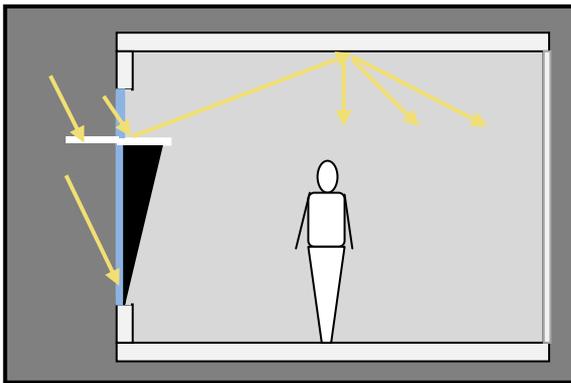


Figure 120: Façade avec dispositif d'ombrage intérieur et extérieur.
(Source : Auteur)

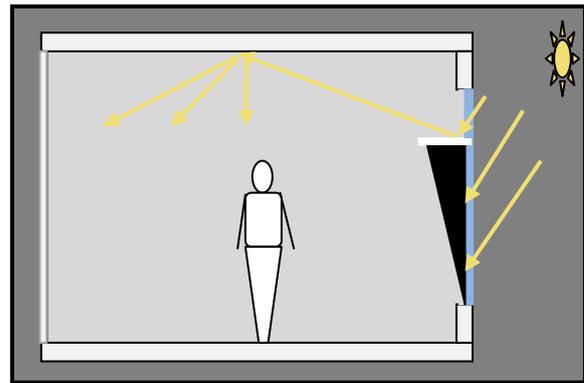


Figure 121 : Façade avec dispositif d'ombrage intérieur seulement.
(Source : Auteur)

IV.3. Application du système light shelf

Le projet illustré ci après par deux photos est un immeuble de bureau, où l'architecte a introduit le système light shelf dans sa conception pour éclairer naturellement les bureaux. Le plafond et les murs ont une couleur claire pour participer à leur tour à la réflexion de la lumière qui vient de l'extérieur. Les light shelves sont installés directement contre les vitres, juste assez haut pour éviter d'être un danger. Le haut de chaque étagère est un miroir qui reflète la lumière du jour vers le plafond, puis vers le fond du bureau. Pour contrôler la quantité de lumière qui entre dans le local et protéger les occupants des pénétrations directes de la lumière qui peut provoquer l'éblouissement et la surchauffe dans les périodes estivales, l'architecte a utilisé des dispositifs d'ombrages une fois à l'intérieur et une fois à l'extérieur selon l'orientation de la façade et les besoins d'éclairage. La figure suivante est une vue intérieure d'un bureau équipé d'un light shelf sur deux façades. La façade gauche est munie d'un dispositif d'ombrage interne qui sert à réduire les risques d'éblouissement

provenant de la grande fenêtre qui se trouve au dessous du système. La fenêtre droite est équipée d'un dispositif de fixation externe (voir figure 123).



Figure 122 : Façade équipée d'un light shelf et d'un dispositif d'ombrage intérieur.
(Source: ENERGY EFFICIENCY MANUAL, CONTROL AND USE OF SUNLIGHT)

La vue extérieure du bureau montre la configuration du dispositif de protection externe. Ce dernier est incliné vers l'extérieur et joue deux rôles : Le premier, sert à réfléchir la lumière par les lamelles inclinées vers la petite fenêtre au dessus du light shelf pour éclairer profondément le bureau, et le deuxième sert à ombrager la grande fenêtre au dessous de light shelf des rayons directs.



Figure 123 : Façade avec dispositif d'ombrage intérieur seulement. (Source : ENERGY EFFICIENCY MANUAL, CONTROL AND USE OF SUNLIGHT)

V. Le système light shelf et la conservation d'énergie

Avant l'introduction du système light shelf, les fenêtres étaient la source principale pour recueillir une grande quantité de lumière et la faire entrer dans le local pour l'éclairer pendant la journée. Cette énergie solaire va se transformer en énergie thermique qui peut chauffer la pièce de quelques degrés en hiver, ce qui permet de réduire les charges de chauffage. Mais le problème va se poser en été : ces rayons lumineux vont augmenter les charges de refroidissement, ce qui nécessitera le recourt aux autres systèmes de refroidissement alimentés par le courant électrique. Toutefois, lorsque cette lumière est focalisée et concentrée sur un objet (un PC par exemple), elle peut devenir une nuisance ce qui nous oblige de fermer les rideaux et d'allumer les lampes électriques qui sont coûteuses et non écologiques.

L'installation d'un système light shelf au niveau de la fenêtre est l'une des meilleures façons d'améliorer la performance énergétique, d'augmenter l'efficacité du bâtiment et d'avoir aussi une économie importante en termes d'énergie. Le système light shelf est un élément architectural qui peut être installé à l'intérieur d'une pièce ou à l'extérieur. Généralement, ils sont fabriqués à partir d'un matériau réfléchissant comme l'aluminium. Ce système d'éclairage naturel joue deux rôles principaux dont le premier est de capter la lumière du jour et la faire entrer dans le local, puis la distribuer en haut vers le plafond. Cela permet ensuite de réduire les coûts d'énergie car il permet d'avoir un éclairage uniforme tout au long de la pièce qui atteint même le fond, ce qui rend toute la pièce lumineuse. Le deuxième, c'est de réduire l'effet des rayons solaires directs en été qui conduisent à la surchauffe grâce au dispositif d'ombrage. Le système va disperser la lumière du soleil de façon assez efficace et la quantité d'énergie ajoutée à l'espace n'est pas plus importante que celle fournie par l'éclairage électrique et par conséquent, le light shelf permet de faire une véritable économie d'énergie. Certaines recherches ont montré que grâce à ce système, on a obtenu des niveaux d'éclairage intérieurs suffisants et cela se traduit par une économie d'électricité variant entre 30 à 120 watts par mètre le long du mur.

La recherche qui a été faite par le Centre d'Énergie Solaire de Florida (FSEC) par David B. Floyd et Danny S. Parker a montré que l'installation du système light shelf permet de faire des économies importantes d'énergie. Quatre bureaux ont été choisis par le FSEC dans le but d'évaluer la performance des différents systèmes de protection à Florida. Notons que cette région est caractérisée par un climat chaud ce qui a nécessité l'installation d'un dispositif

d'ombrage intérieur et/ou extérieur pour pouvoir réduire la surchauffe en été et l'effet de l'éblouissement. Le bureau original (de référence) est équipé d'un dispositif d'ombrage extérieur seulement, les trois autres sont équipés de plus d'un dispositif d'ombrage extérieur. Notons que les quatre bureaux ont les mêmes caractéristiques en termes de dimension du local, de largeur de la fenêtre ainsi que du système d'éclairage artificiel installé.

Le tableau suivant montre les dispositifs (d'éclairage et d'ombrage) qui ont été installés dans chaque bureau :



Figure 124 : Light shelf dans la façade sud à (FSEC)
(Source : Floyd et al.)

Bureau #	Dispositif d'ombrage intérieur
212	33" light shelf intérieur avec une surface diffusante
213	Dispositif d'ombrage extérieur (bureau de référence)
214	Mini store horizontal, blanc et translucide
216	33" light shelf intérieur avec une surface spéculaire

Tableau 9 : Les caractéristiques des dispositifs d'ombrage pour chaque bureau (Source : Floyd et al.)

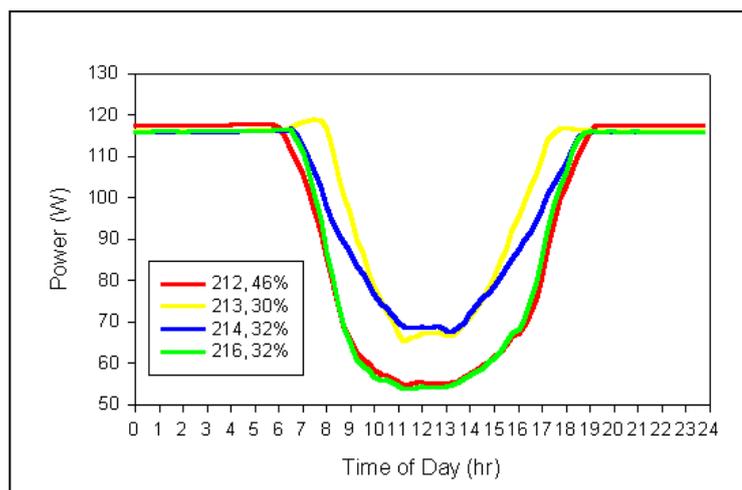


Figure 125 : La moyenne journalière de la consommation d'énergie pour chaque bureau (Source : Floyd et al.)

Comme le montre la figure 125, une importante économie d'énergie a été atteinte dans le bureau équipé d'un système light shelf intérieur qui arrive à 46% dans le cas 112. Il est intéressant de noter que la différence en termes d'économie d'énergie entre le système light shelf avec une surface diffusante (courbe en rouge) est négligeable par rapport au système light shelf avec une surface spéculaire (courbe en vert). Le bureau de référence et celui équipé des stores (horizontal et translucide) permettant de faire moins d'économie d'énergie (entre 30% et 32%).

On en conclut que le système light shelf permet de faire des économies d'énergie qui peuvent être supérieures à 50%. Cette véritable économie résulte de l'augmentation du niveau d'éclairage dans le local qui est du à la réflexion du système light shelf ainsi qu'à la diffusion du plafond.

Le système light shelf fonctionne seulement dans les périodes où il y a du soleil (ciel clair). Dans le cas de ciel couvert, le rendement du système va diminuer et nous allons recourir à l'éclairage artificiel et donc, les espaces sont éclairés par une combinaison de lumière naturelle et de lumière artificielle. Pour cette raison, les appareils d'éclairage artificiel et leurs circuits d'alimentation doivent être disposés de manière qu'ils puissent désactiver lorsque l'éclairage naturel peut fournir une quantité suffisante de lumière du jour apportée par le système light shelf.

Conclusion

Les lights shelves jouent le rôle de dispositifs d'éclairage et de protection. Installés au niveau des fenêtres, ils permettent d'éclairer la pièce de manière efficace, d'avoir une uniformité de d'éclairement dans l'espace et de réduire de manière considérable l'effet de l'éblouissement. Ce système permet des économies d'énergie et a des résultats concrets car il peut réduire la quantité d'électricité nécessaire pendant les heures d'ensoleillement pour éclairer une pièce. Ce dispositif joue aussi le rôle de protection solaire surtout dans les climats chauds et pendant les périodes estivales en empêchant les rayons solaires directs d'entrer dans le local ce qui peut causer des surchauffes et un inconfort substantiels.

En pratique, il existe plusieurs configurations de light shelf ; ils peuvent être intérieurs ou extérieurs, droits ou inclinés et parfois mixtes. Chaque type est efficace pour un climat lumineux particulier. Dans les régions à climat chaud, le taux d'ensoleillement est très important. Le taux élevé du gisement lumineux dans ces conditions peut provoquer des surchauffes, des contrastes forts, des risques d'éblouissement, des taches solaires et une répartition non uniforme de la lumière. L'utilisation de l'éclairage artificiel devient nécessaire pour palier ces effets ce qui entraîne des consommations élevées d'électricité. Si le potentiel lumineux est bien utilisé, il peut couvrir tous les besoins d'éclairage sans poser un problème de confort visuel ou thermique pour les utilisateurs de l'espace. Les light shelves peuvent réduire cette pénétration directe des rayons solaire grâce au dispositif d'ombrage et à promouvoir un espace éclairé naturellement en profondeur, tout en assurant un niveau uniforme d'éclairement grâce à leurs capacités à diffuser la lumière.

Pour une conception optimale du système light shelf, il est nécessaire d'étudier le climat de la région, l'état du ciel dominant, l'éclairement extérieur, etc... La connaissance de ces informations climatiques, nous permettrons de connaître l'efficacité et le rendement de ce système afin d'éviter les problèmes liés au confort visuel et thermique qui peuvent être causés par une mauvaise étude climatique et par conséquent, un mauvais choix d'un système d'éclairage.

Chapitre V

La simulation du système light shelf

Introduction

Le confort visuel est assuré lorsque la quantité d'éclairement qui présente dans un espace est suffisante pour accomplir une tâche déterminée sans avoir de gêne pour l'œil humain. Cette gêne peut être le résultat d'un niveau d'éclairement qui n'est pas adapté à la tâche, de l'éblouissement ou d'une composition d'une lumière qui n'est pas compatible avec le niveau d'éclairement et l'activité. Afin de répondre aux exigences du confort visuel, l'architecte au cours de sa conception, essaye de capter le maximum de lumière à travers le choix de l'orientation de la fenêtre, sa configuration, sa dimension, sa hauteur, la nature du vitrage...etc. Cette stratégie est apparue efficace, mais elle permet simplement d'augmenter le niveau d'éclairement à quelques lux près de la fenêtre, tout en laissant le fond de l'espace obscur et par conséquent, contribue à l'inconfort visuel.

Après l'apparition des outils informatiques qui sont spécialisés en éclairage, l'étude de la lumière naturelle et même artificielle en architecture est devenue un phénomène facile à étudier. Le domaine de l'éclairage naturel des bâtiments a connu la création de plusieurs logiciels; citons " DIALUX ", " VILUX ", " ECOTECT ", " ENERGIE+ ", " RADIANCE " ...etc. Ces outils permettent d'étudier le comportement de la lumière dans l'espace architectural, de faire une étude quantitative, qui permet de connaître le niveau d'éclairement et de luminance dans chaque point du local comme ils permettent aussi de faire une étude qualitative. Ces logiciels sont faciles à manipuler et donnent des résultats qui sont proches de la réalité. Plusieurs projets dans le monde ont vu leur conception être faite par des logiciels.

Au cours de cette simulation, on va essayer de répondre à deux objectifs, le premier est de faire une investigation exhaustive sur les différents types du système light shelf afin de choisir les configurations les plus adaptées au climat de la ville de Biskra. Le deuxième objectif est d'étudier le rendement du système light shelf dans l'espace architectural.

I. Les outils de simulation et de modélisation

I.1. Mesures sur site

Les mesures sur site sont un outil facile et simple à exécuter et permet d'étudier qualitativement et quantitativement la lumière dans un espace. Elles permettent de caractériser l'ambiance intérieure et d'obtenir les vraies valeurs d'éclairement, de luminance, etc... Pour effectuer des mesures sur site, il faut qu'on soit équipés du matériel adéquat. Cet outil offre la possibilité de combiner des études d'éclairage naturel et des études d'éclairage artificiel. Le choix de cet outil peut être compris entre deux limites. La première, c'est que ces mesures ne peuvent être réalisées qu'après la construction du bâtiment, la deuxième, qu'elles dépendent des conditions climatiques.

I.2. Les méthodes de calcul simplifiées

Les méthodes de calcul simplifiées sont des outils qui permettent la prédétermination de la lumière naturelle. Ces outils se présentent sous forme d'algorithmes simplifiés, de tables, de nomogrammes, de diagrammes, ... et sous forme informatique ou sous format papier. Ces méthodes sont utilisées pour le calcul de l'éclairement, de facteur de lumière de jour, etc... La commission internationale de l'éclairage a développé à l'aide des formules et des abaques une méthode pour pouvoir estimer le FLJ à l'intérieur d'un local sous des conditions de ciel couvert. Ces méthodes sont généralement utilisées par les concepteurs dans la première phase d'esquisse d'un projet d'éclairage car elles donnent des valeurs approximatives d'éclairement dans un local, ce qui permet d'avoir une première idée sur l'éclairage de cet espace. Elles trouvent leurs limites dès que se présentent des besoins de visualisation de l'ambiance intérieure et d'analyse du confort visuel ainsi que dans des situations d'éclairage complexes. Ceci qui nous oblige de recourir à d'autres outils de prédétermination. Différentes méthodes simplifiées permettent de calculer l'éclairage intérieur en fonction de l'installation d'éclairage et de la lumière naturelle. Citons entre autres :

-La méthode des diagrammes de Waldram. Cette méthode est basée sur un système de projection du ciel sur une grille dont chaque élément représente une contribution (équivalente) du ciel pour l'éclairement du point considéré.

Il existe plusieurs diagrammes pour divers types de ciels, permettant des calculs pour différentes conditions extérieures.

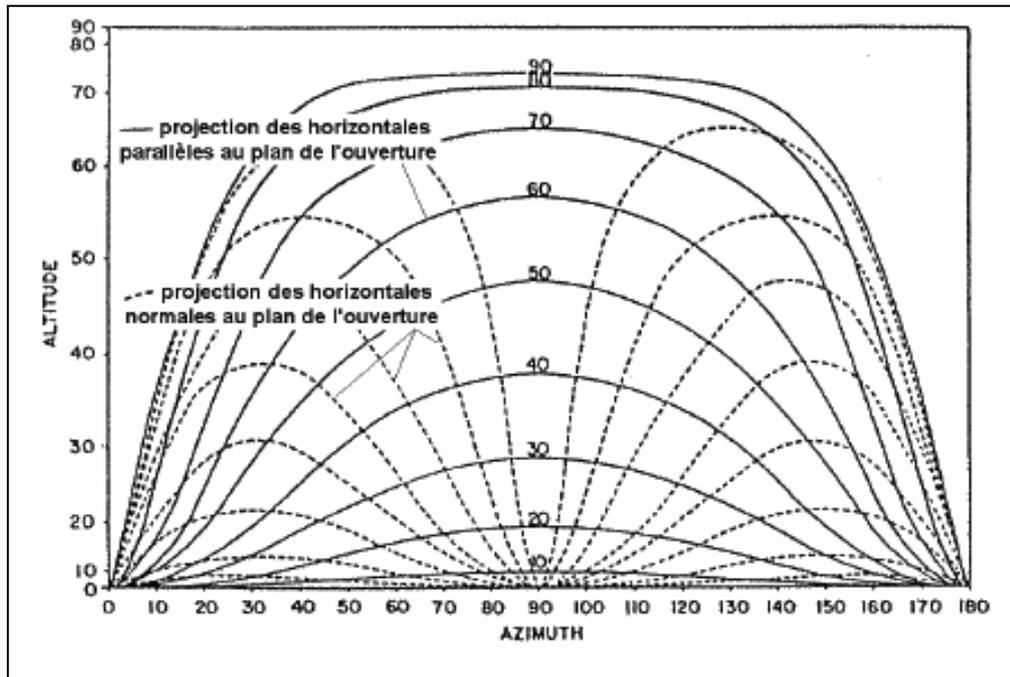


Figure 146: Diagramme de Waldram (Source : Francis Miguet)

-La méthode BRS. Elle est mise au point par le BRE (Building Research establishment- United Kingdom). C'est une méthode qui permet de calculer les valeurs de FLJ pour un ciel couvert en un point d'un local sur base de ses plans et du type du ciel. Ces méthodes relativement simples à appliquées prend en compte les obstructions extérieurs. Elle se repose sur l'emploi de disques qui, appliqués à la bonne échelle sur les vues en coupe des bâtiments, permettent de déterminer la composante directe de l'éclairage naturel. Différents disques offrent la possibilité de calculer les éclairagements naturels sous divers types de ciels.

-La norme NBN L 13-002 pour les calculs liés à la présence de la lumière naturelle. Elle est utilisée pour calculer la composante de l'éclairage due à l'éclairage naturel dans les bâtiments en fonction de la contribution directe du ciel et des réflexions lumineuses (composante directe, composante externe réfléchie et composante interne réfléchie) dans des conditions de ciel couvert.

-La norme NBN L 14-002/A1 pour les calculs sous éclairage artificiel. Elle permet, quant à elle, le calcul point par point des éclairagements sous éclairage artificiel.

I.3. Les logiciels informatiques

Pendant ces dix dernières années, le domaine informatique a connu un progrès important, ce qui a donné naissance à des nouveaux programmes de simulation qui ont touché le domaine du bâtiment, ou les architectes ont commencé à utiliser ces multiples logiciels pour la prédétermination de la lumière naturelle dans leurs projets. Ces outils informatiques sont de deux catégories basés sur deux méthodes de calcul différentes : la technique de la radiosité et la méthode du lancer de rayon inverse. La méthode de la radiosité traite des échanges radiatifs entre surfaces parfaitement diffusantes formant un espace clos. Les logiciels basés sur la méthode de la radiosité traitent des volumes simples, éclairés par des ouvertures rectangulaires ou les calculs ne tiennent pas compte des surfaces spéculaires ni de l'aspect spectral du phénomène lumineux. Ainsi, ils sont généralement couplés à une base de données climatique. Alors que la méthode du lancer de rayon inverse tient compte de tous les phénomènes optiques qui peuvent être exprimé analytiquement par des équations physiques. Elle peut intégrer des matériaux spéculaires, semi-spéculaires, diffus, réfractant ou translucides. Cette méthode peut simuler de manière efficace des textures non-homogènes et des surfaces infiniment petites. Le bon exemple de logiciel utilisant cette méthode de calcul de propagation de la lumière est Radiance. Cependant, ces programmes demandent en général un temps d'apprentissage assez long et une certaine expérience. Ils sont donc réservés aux personnes spécialisées dans le domaine de l'éclairage naturel. Ils demandent également un temps de calcul relativement long. Ces logiciels requièrent également une description détaillée de tous les éléments de l'espace à modéliser et ne sont donc pas applicables au stade de l'esquisse ou de l'avant projet.

I.4. L'utilisation de modèles réduits

En architecture, les concepteurs utilisent souvent les maquettes comme un outil de conception architecturale qui les aident à visualiser la volumétrie de leurs bâtiments ainsi que les espaces intérieurs et leurs organisations. Actuellement, et après le développement des techniques et technologies liées à la lumière et à l'image, l'utilisation de la maquette en architecture a dépassé ce stade. Elle a commencé par être un outil permettant d'étudier le confort visuel et de réaliser même la conception de l'éclairage, ce qui a donné naissance à trois types de maquettes, nous trouvons des maquettes sous ciel artificiel, Héliodon et des prototypes de

taille réelle. Ainsi, selon la phase de la conception, on utilise différents types de modèle : des modèles de masse qui permettent d'étudier le soleil disponible en fonction du site, de la localisation du bâtiment et de son orientation, des modèles permettant d'étudier les performances du bâtiment, comme, par exemple, la pénétration de lumière du jour et sa distribution, les niveaux de luminance, l'éblouissement et les contrastes et enfin, des modèles étudiant les ouvertures, le vitrage, le système d'ombrage, les éléments directionnels, etc....

II. Les types de simulateurs

L'étude de l'éclairage naturel dans un local par l'utilisant des maquettes à échelle réduite ou réel peut se faire sous un ciel réel ou un ciel artificiel. Le ciel réel est caractérisé par l'instabilité de la luminance, il est très variable dans le temps, il dispose d'instrumentation très complexe et ne permet pas de mesures comparables. Alors que le ciel artificiel est un outil validé scientifiquement et utilisé dans plusieurs laboratoires d'études d'éclairage reconnus mondialement, dont le GRAP (Groupe De Recherche En Ambiances Physiques). Il est caractérisé par un environnement lumineux stable dans le temps et qu'il permet de réaliser des mesures sous des conditions lumineuses précises, ce qui permet de comparer entre les projets. Ce type de ciel est particulièrement adapté aux besoins des architectes dans l'intégration de stratégies d'éclairage naturel, assurant un lien étroit entre les différentes étapes de conception du projet architectural ainsi que les besoins particuliers en éclairage. Il existe différents instrumentation nécessaires dans la simulation dont :

II.1. Mirror box

Le Mirror box est appelé aussi ciel à miroir, c'est une boîte de forme cubique de plus de 3 mètres de côté. Il est composé des murs intérieurs revêtus de miroirs très réfléchissants et d'un plafond lumineux constitué de 101 tubes fluorescents masqués par un matériau diffusant. Ce type de ciel offre plusieurs avantages, c'est un outil simple et maniable pour simuler un ciel couvert, comme le définit la Commission internationale de l'éclairage CIE. L'éclairage résultant sur le plan horizontal situé à la base du cube est de 10.000 lux et présente une très bonne uniformité. Les mesures s'effectuent à l'aide de luxmètres placés à l'intérieur et à l'extérieur du modèle réduit. Une caméra équipée d'un objectif à grand angle

est utilisée pour visualiser les ambiances intérieures, et fournit à l'utilisateur la représentation de la distribution lumineuse, comme s'il était à l'intérieur même du bâtiment. Le Mirror box permet aussi de tester différentes configurations de façades et donne des résultats très précis. Il est très didactique et permet d'étudier des modèles relativement grands dans une courte durée et avec moindre coût. Le seul inconvénient d'un Mirror box, qu'il ne permet pas de simuler différents types de ciel et ne tient pas compte de la composante directe du soleil.

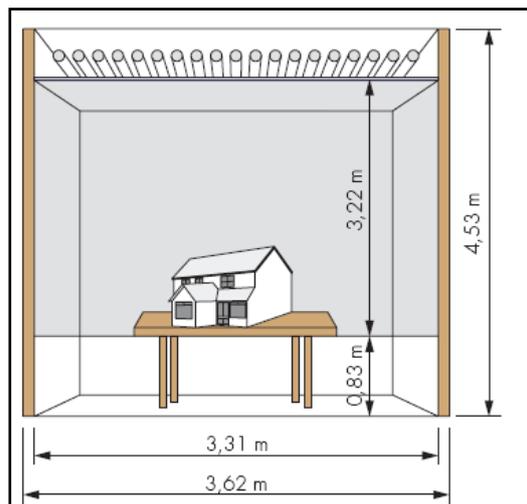


Figure 147 : Schéma de principe de la Mirror box
(Source : Arnaud Deneyer)

II-2- Ciel artificiel à une lampe

Le ciel artificiel à une lampe un outil plus complexe et plus puissant, destiné à simuler tout type de ciel, y compris celui qui fait intervenir la composante directe du soleil. Il repose sur un principe de subdivision du ciel en 145 disques lumineux (distribution théorique modifiée de Tregenza). Ces disques lumineux sont juxtaposés les uns aux autres, de manière à assurer une couverture complète du dôme (voir figure 149). L'intensité de leur flux lumineux est adaptée pour simuler les différents types de ciels : ciel couvert, clair, partiellement nuageux, etc ... Le ciel artificiel à une lampe permet des mesures précises d'éclairage naturel dans n'importe quelle heure et n'importe quel type de ciel choisis dans une courte durée d'environ 70 minutes. Ce type de ciel, et à l'opposé de la Mirror box ne permet pas de vue directe des ambiances lumineuses atteintes à l'intérieure du modèle, mais nous pouvons recomposer une vue de l'ambiance par la recomposition informatique des images prises lors du positionnement aux 145 positions. Le modèle doit être fixé sur un socle dur qui dépasse de 3 cm au moins des

parois du modèle et qu'il ait une hauteur maximale de 3 cm avant d'être fixé sur le plateau tournant. Le mobilier aussi doit être fixé au modèle, car la maquette va obéir différent rotation selon différents angles. Le poids total de la maquette sera limité à 15 kg pour, d'une part permettre à la table d'effectuer ses mouvements de rotation et, pour d'autre part, ne pas gêner la manutention.

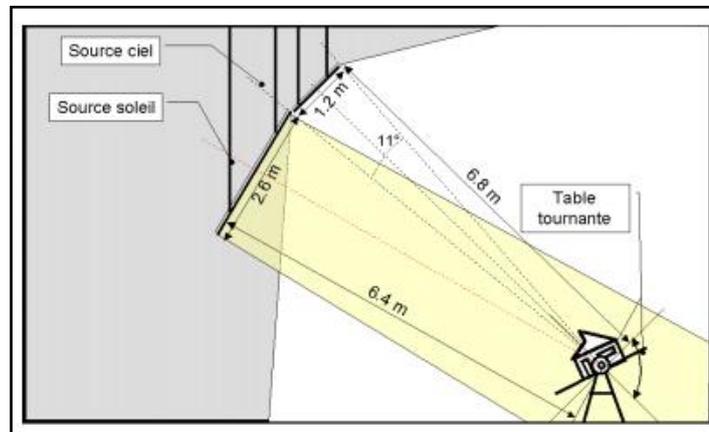


Figure 148: Ciel artificiel à une lampe
(Source : Arnaud Deneyer)

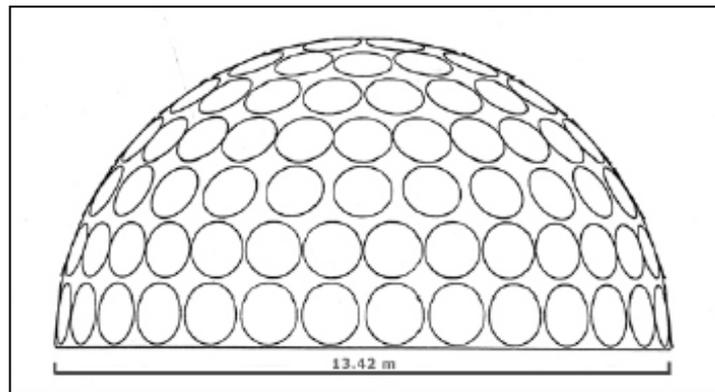


Figure 149: Vue en coupe des disques du dôme
(Source : Arnaud Deneyer)

II.3. Soleil mécanique

Le soleil mécanique est un outil didactique qui permet de visualiser notre perception du mouvement du soleil. Il est constitué d'une lampe mobile se déplaçant autour d'un modèle réduit et décrivant le mouvement du soleil pour une latitude donnée. Pour chaque simulation, le soleil décrit un cercle qui correspond à la base d'un cône dont l'axe principal est incliné. L'angle d'inclinaison de cet axe correspondant à la latitude du site considéré. La longueur du

côté du cône dépend du jour choisi. Sous ce simulateur, aucune mesure n'est effectuée. Il n'est utilisé que pour visualiser le déplacement du soleil et les ombres ou taches solaires associées.

II-4- Soleil artificiel à une lampe

Le soleil artificiel à une lampe est un simulateur qui permet une étude plus détaillée que le soleil mécanique car il combine observations et mesures. Il se compose de 91 petites lampes halogènes fixées au plafond. Son mouvement relatif est réalisé par la rotation de la maquette autour de deux axes indépendants. Il peut être utilisé pour évaluer l'aspect visuel induit par les rayons solaires. Cette observation est directe. Elle doit cependant être superposée aux valeurs obtenues lors des mesures sous ciel diffus, afin de refléter la réalité obtenue par combinaison du ciel clair avec le soleil. Les modèles sont fixés sur le plateau tournant via un système d'attaches réglables en fonction de la taille du modèle.



Figure 150 : Dispositif de ciel au-dessus et de soleil en dessous.
(Source : Arnaud Deneyer)

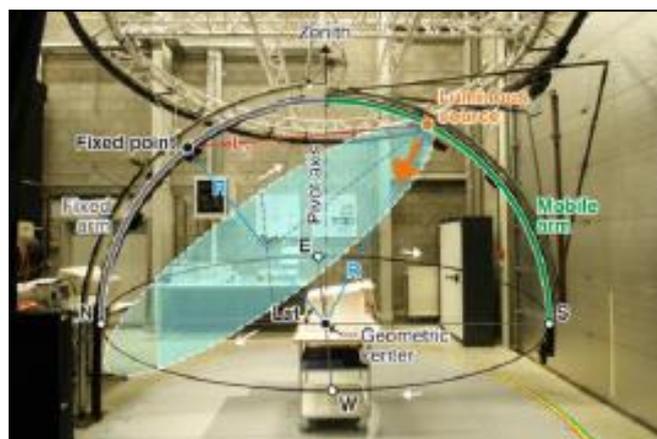


Figure 151 : Soleil mécanique (Source : CSTC)

III. Investigation exhaustive sur les types du light shelf

La simulation informatique désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène réel. En architecture, les architectes font des collaborations avec les éclairagistes pour développer des logiciels qui permettent de simuler l'éclairage naturel dans le bâtiment afin de faciliter la conception de l'éclairage et choisir la solution la plus fiable. Le choix de la simulation se fait à cause de la facilité de d'exécution par rapport à l'expérimentation. Il suffit seulement d'identifier les variables et les constantes (par exemple : les dimensions du local à simuler, choisir les matériaux ainsi que les coefficients de réflexion de ceux-ci,...etc) et faire entrer le fichier climatique de la région où la simulation va se dérouler. Le logiciel va calculer l'éclairement, donner les valeurs de luminance ou de FLJ; nous pouvons également avoir des interfaces graphiques permettant la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse ce qui rend la comparaison entre les différents résultats facile. La simulation de l'éclairage naturel par outil informatique permet de choisir les meilleures solutions parmi des centaines de solutions dans un temps réduit.

Dans notre cas d'étude et dans le but de faire une investigation exhaustive sur les types de light shelf et choisir les types les plus performants et les plus efficaces, nous avons choisi "Ecotect v5.5" pour simuler les différentes configurations du modèle.

III. 1. Le choix du logiciel de simulation

Ecotect v 5.5 est un logiciel de conception Haute Qualité Environnementale (HQE) destiné aux architectes, qui allie une vaste gamme de simulations et d'analyses pour bien comprendre les performances du bâtiment. C'est un logiciel de simulation simple et complet qui associe un modeleur 3D avec des analyses solaire, thermique, acoustique et de coût. Ecotect permet aux concepteurs de travailler facilement en 3D et d'utiliser tous les outils nécessaires à la gestion efficace de l'énergie. "Ecotect 5.5" offre plusieurs avantages, c'est un outil facile dans sa manipulation et sa compréhension, il permet de guider le processus de conception et aide les concepteurs à prendre les bonnes décisions dès la première phase d'esquisse, en ce qui

concerne la localisation de la construction, sa forme globale, son orientation, les matériaux utilisés pour l'extérieur ainsi que la taille des fenêtres et leur emplacement...etc. Un autre avantage important est qu'il est possible d'analyser la situation d'éclairage durant toute l'année tout simplement en attribuant les paramètres de simulation (comme l'emplacement, la date, l'heure, l'état du ciel etc). Il donne des résultats très visuels comme il peut être connecté avec d'autres logiciels (Radiance, EnergyPlus et d'autres logiciels performants). À partir d'Ecotect, nous pouvons importer des données de 3D Studio (.3DS .ASC .PRJ), Autocad (.DXF), EnergyPlus (.IDF), Windows Bitmap (.BMP). Comme nous pouvons faire des exportations vers DOE-2 (.INP), AIOLOS (.PPA), VRML (.WRL), ESP-r (.CFG), WinAir4 CFD (.GEO); Radiance (.RAD .OCT), EnergyPlus (.IDF), Autocad (.DXF). Ecotect offre six fonctions principales :

- La fonction Visual Impact, aide à analyser les angles de projection, les obstructions et les composants verticaux pour n'importe quel point ou surface.
- La fonction Solar Radiation Analysis, "Ecotect 5.5" permet de visualiser l'incidence des radiations solaires sur les fenêtres et les surfaces calculées pour chaque saison.
- La fonction Shadow and Reflections : permet les simulations d'ombres, de réflexions et indique la position du soleil et l'ensoleillement du projet comme elle montre comment la lumière entre par les fenêtres et se déplace dans l'espace.
- La fonction Daylight, permet de calculer les détails de l'ensoleillement, les facteurs d'éclairage naturels : les niveaux d'éclairement (lux), le facteur de lumière du jour (%), les réflexions intérieures et extérieures (%) à n'importe quel point du modèle, ainsi que les composantes du ciel. Selon le type de la grille (verticale ou horizontale), la fonction affiche les résultats en 2D et/ou en 3D. Elle simule aussi les économies potentielles qu'offre la conception axée sur l'éclairage naturel. Notre travail se base sur cette fonction.
- La fonction Thermal performance, permet de calculer les charges de chauffages et de climatisation pour toute types de zones, quelques soient leurs formes. Il analyse également les changements thermiques dû à l'occupation des bâtiments, aux apports internes, à l'infiltration, ainsi qu'aux différents équipements.

III. 2. La simulation du système light shelf

L'objectif de cette simulation est de choisir les configurations du light shelf les plus efficaces et les plus performantes du point de vue du confort visuel et de la consommation d'énergie (celles qui éclairent mieux le local et permettent d'apporter la lumière au fond de l'espace). Cette évaluation va être faite par la connaissance et la comparaison des valeurs suivantes :

- Les valeurs de l'éclairement (en lux) reçu sur le plan du travail (0.9m).
- Les valeurs de FLJ (en %).

III. 2. 1. Les paramètres de la simulation

La simulation de l'éclairage naturel dans un local équipé d'un light shelf se base sur des paramètres constants et d'autres variables. Les paramètres constants sont les suivants :

- La location : la ville de Biskra (latitude 34.48 N, longitude 5°44N).
- La zone : Urbaine.
- Le type du ciel : ciel intermédiaire.
- Le logiciel de simulation : "Ecotect v5.5" (Fonction : Daylight Analysis).

- La géométrie du local :
 - Le local : Largeur=06m, longueur=12m, hauteur=3.2m.
 - La fenêtre : Largeur=1.8m, longueur=5m, hauteur sous plafond=0.4m, hauteur de l'allège =1m.
 - Le light shelf : Epaisseur =0.15m, longueur=5m, hauteur au plafond=1m, hauteur au sol =2.2m.

- Les matériaux :
 - Les murs : paroi intérieure (Brick plaster (Réflectance: 0,50)).
 - La dalle : paroi intérieure (ConcSlab OnGround (Réflectance: 0,40)).
 - Le plafond : paroi intérieure (suspender concrete ceiling (Réflectance: 0,96)).
 - Le light shelf : partie intérieure (Simple glazed (Réflectance: 0.92,).
 - Le vitrage : intérieure (Simple glazed Aluminium Frame (Réflectance:0.92, U : 6 W/m2K)).

Les paramètres à simuler :

- L'orientation de la fenêtre.
- Le type de light shelf :
 - Droit intérieur.
 - Droit extérieur.
 - Droit intérieur-extérieur.
 - Incliné vers l'intérieur.
 - Incliné vers l'extérieur.
- La largeur du light shelf : 0.5m, 1m, 1.5m et 2m.
- L'inclinaison du plafond : inclinaison 0° , inclinaison 20° .

Remarque : La simulation va pas prendre en considération les obstructions extérieurs et l'aménagement intérieur pour ne pas interrompre les résultats.

III. 2. 2. La grille structurelle

La grille structurelle permet de diviser l'espace en grille, puis en points. Ces points peuvent être codés soit par des chiffres (1, 2,...) soit par le système chiffres et lettres (a1, a2, b1, B2,...). La grille utilisée dans la simulation a été faite à 0.9m du sol, représentant la hauteur plan de travail. Dans le but de voir les fluctuations des niveaux de lumière naturelle à partir de la fenêtre vers la face opposée de la l'espace, nous proposons une autre grille verticale.

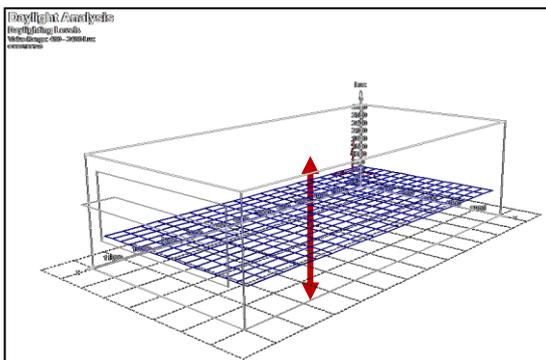


Figure 152 : Grille structurelle horizontale
(Source : Auteur)

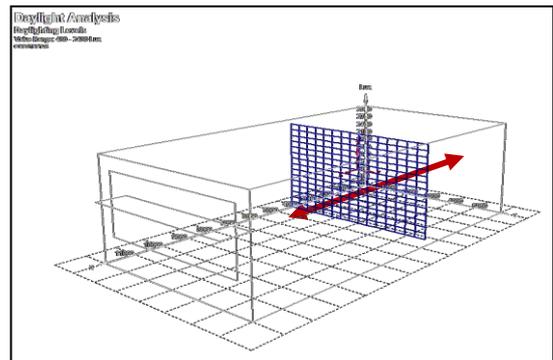


Figure 153: Grille structurelle verticale
(Source : Auteur)

IV. Analyse des résultats

IV.1. Modèle sans light shelf

IV.1.1. Etude quantitative du modèle

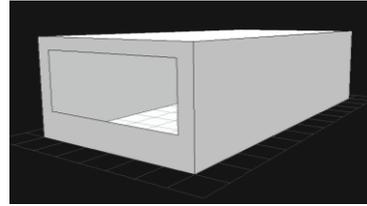


Figure154 : Modèle sans light shelf

L'objectif de cette simulation est de connaître la quantité d'éclairement qui rentre dans le local par la fenêtre uniquement et jusqu'à quelle profondeur l'espace est bien éclairé. La figure suivante montre que le local est partagé en quatre zones d'éclairéments différents:

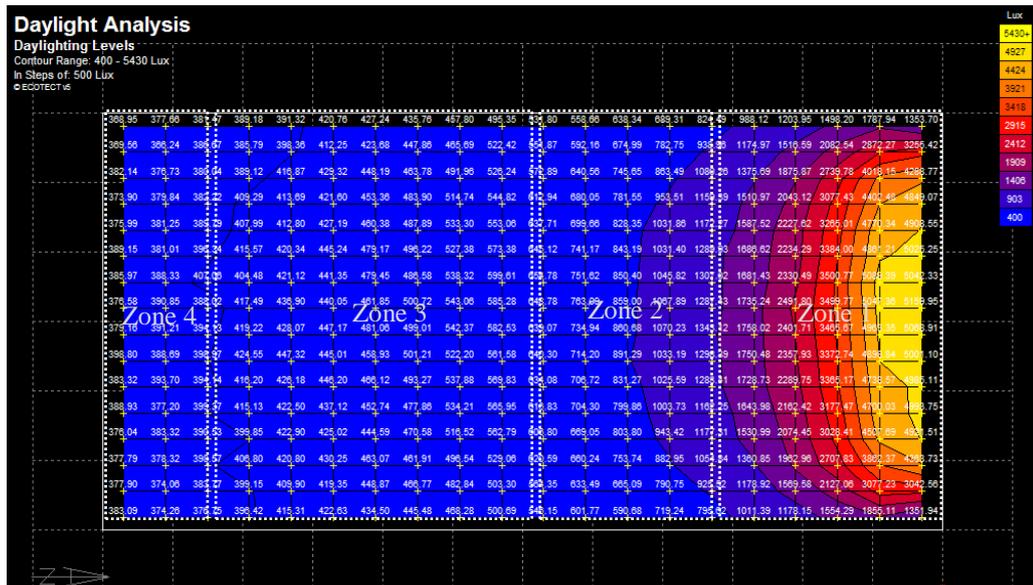


Figure 155: Local avec fenêtre sans light shelf (30 Décembre à 10h) : orientation Nord

- La zone1 (près de la fenêtre) : L'éclairement reçu dans cette zone est situé entre 5159.95lux et 1400 lux, et s'étend sur une profondeur de 3.3m (niveau très élevé).
- La zone2 (zone intermédiaire1) : La profondeur de cette zone est petite (occupe seulement 2.4m) et l'éclairement est compris entre 1400 et 700lux (niveau élevé).
- La zone3 (zone intermédiaire2) : La profondeur de cette zone reste réduite (4.8m) et l'éclairement se trouve entre 700 et 500lux (niveau moyen).
- La zone4 (loin de la fenêtre) : Cette zone est située au fond du local et s'étend sur une profondeur de 1.5m et l'éclairement est moins de 400lux (niveau faible).

Interprétation

La fenêtre divise le local en quatre zones d'éclairéement différent. La zone 2 est la seule zone qui reçoit un bon niveau d'éclairéement (1400-600lux), mais sur une petite profondeur (3.1m), les trois autres zones sont mal éclairées : la zone 1 peut causer l'éblouissement à cause de son fort éclairéement et la zone 3 et 4 peuvent constituer un fort contraste par leur faible niveau d'éclairéement qui est 16 fois moins que celui reçu par la zone 1. On en conclut que, dans un local équipé d'une fenêtre seulement, l'éclairéement est mal réparti. La lumière que reçoit le local va éclairer la surface qui se trouve près de la fenêtre, puis cette quantité d'éclairéement va diminuer vers le fond du local ce qui permet une mauvaise répartition de la lumière.

IV.1.2.Effet de l'orientation

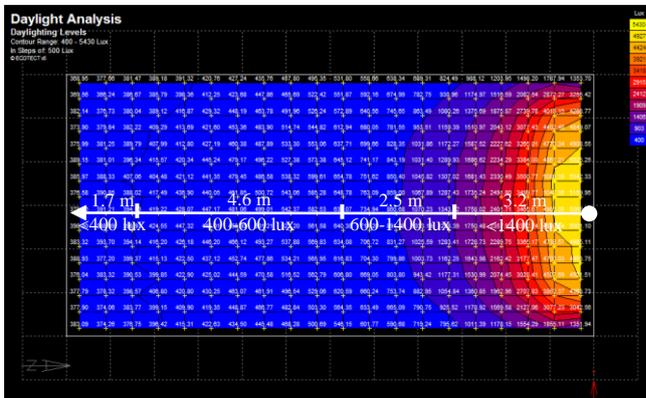


Figure 156: Local avec fenêtre sans light shelf (30 Décembre à 10h) : orientation Nord

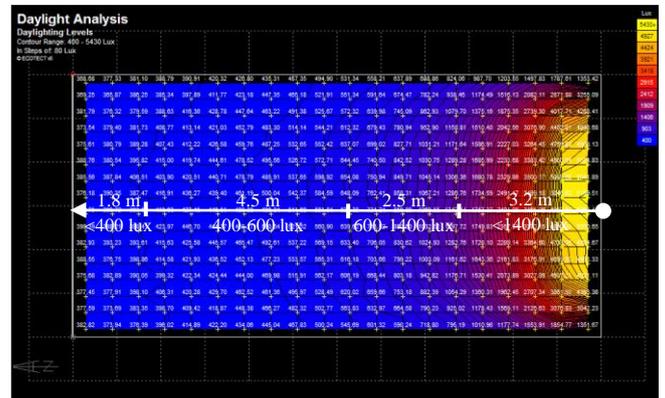


Figure 157: Local avec fenêtre sans light shelf (30 Décembre à 10h) : orientation Sud

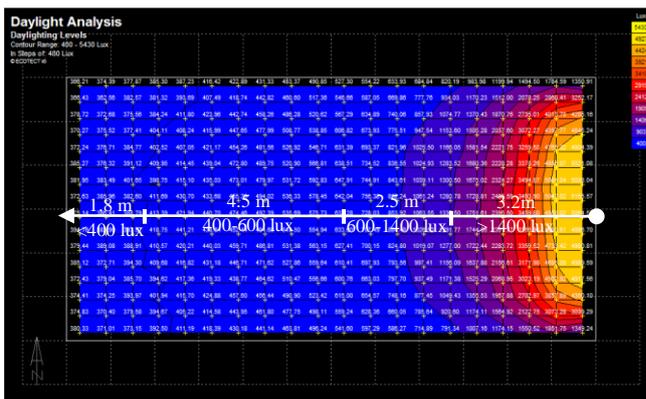


Figure 158: Local avec fenêtre sans light shelf (30 Décembre à 10h) : orientation Est

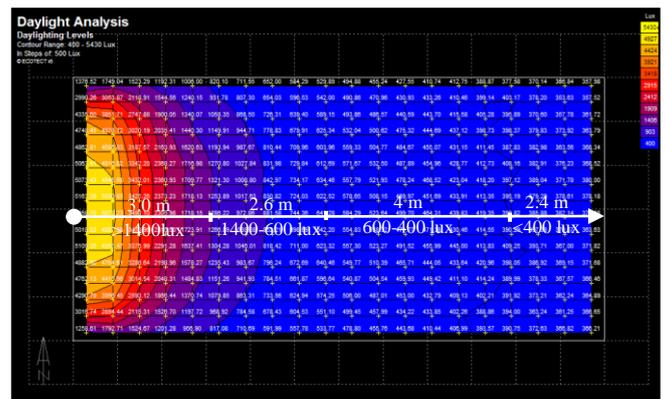


Figure 159: Local avec fenêtre sans light shelf (30 Décembre à 10h) : orientation Ouest

Analyse des résultats

L'éclairage des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)			
	Nord	Sud	Est	Ouest
Zone1 : $E > 1400\text{lux}$	3.2m	3.2m	3.2m	3.0m
Zone 2 : $1400 > E > 600\text{lux}$	2.5m	2.5m	2.5m	2.6m
Zone3 : $600 > E > 400\text{lux}$	4.6m	4.5m	4.5m	4.0m
Zone 4 : $E < 400\text{lux}$	1.7m	1.8m	1.8m	2.4m

Tableau 25: La profondeur des zones d'éclairage dans les quatre orientations cas : local avec fenêtre sans light shelf (Source : Auteur)

Orientation	Eclairage reçu par la fenêtre (lux)	Eclairage reçu à 10.5m de la fenêtre (lux)
Nord	5159.95	394.13
Sud	5159.51	393.69
Est	5155.57	388.79
Ouest	5163.39	385.88

Tableau 26: Valeurs d'éclairage reçues dans les quatre orientations cas : local avec fenêtre sans light shelf (Source : Auteur)

Les orientations partagent le local en quatre zones. L'éclairage reçu dans la zone 1 et 4 est presque le même dans toute les orientations. La largeur de la zone 4 ou l'éclairage est inférieur à 400 lux est réduite, ceci dans les orientations Nord, Sud et Est (1.7- 1.8m seulement), alors qu'elle est plus large dans l'Ouest (2.4m). Ce qui nous intéresse le plus, c'est la largeur des zones 2 et 3 ou nous avons remarqué que l'éclairage est important quand on oriente la fenêtre vers le Nord (7.1 m).

Nous remarquons aussi que les valeurs d'éclairage obtenues dans les quatre orientations sont proches les unes des autres surtout au niveau de la quantité d'éclairage que reçoit la fenêtre ainsi que dans la quantité d'éclairage reçu à 10.5 m de profondeur. Nous constatons que l'orientation Nord est celle qui reçoit la plus grande quantité d'éclairage (**394.13 lux**).

Interprétation

L'orientation Nord donne les meilleurs résultats du point de vu uniformité. Elle transmet le mieux la lumière au fond de l'espace. Cette quantité atteint 394.13lux à 10.50m de la fenêtre. L'orientation la plus défavorable est celle face à l'ouest; elle capte plus de lumière mais elle éclaire moins le fond du local. Cette première conclusion confirme que le coté nord est le coté le plus éclairé de la voute céleste avec une lumière plus stable. Donc, au cours des simulations suivantes, nous allons travailler sur l'orientation Nord à cause de son rendement d'un coté et de son adaptation au climat de la ville de Biskra, d'un autre coté.

IV.2.Modèle équipé d'un système light shelf

IV.2.1. Effet de l'orientation

Dans le but de connaitre l'influence du système light shelf sur le niveau d'éclairément et la répartition de la lumière dans le local dans les différentes orientations, nous proposons la simulation suivante :

La configuration du modèle :

- Light shelf de type droit intérieur
- Profondeur de light shelf : 1m
- Plafond : droit

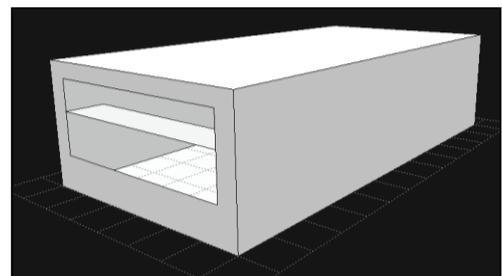


Figure160: Modèle avec light shelf droit intérieur

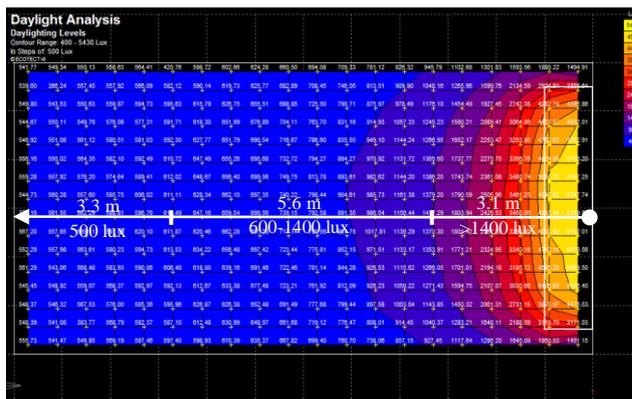


Figure161 : Local avec fenêtre équipé du système
Cas : orientation Nord (30 Décembre à 10h)

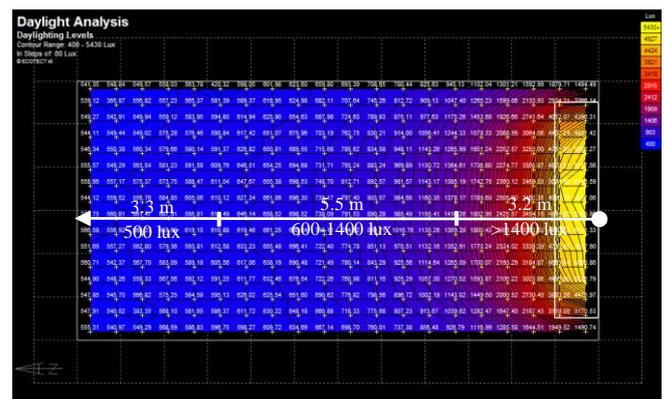


Figure162 : Local avec fenêtre équipé du système
Cas : orientation Sud (30 Décembre à 10h)

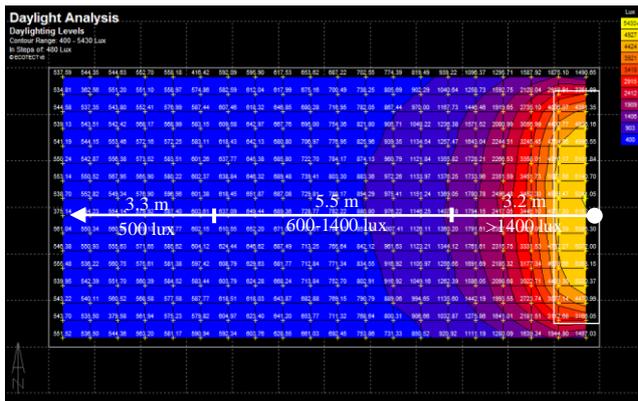


Figure 163 : Local avec fenêtre équipé du système
Cas : orientation Est (30 Décembre à 10h)

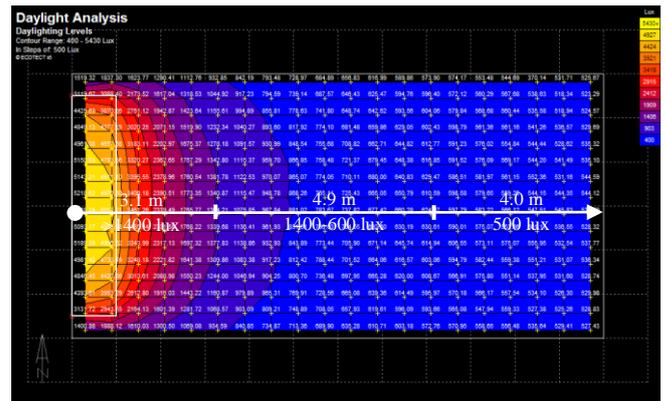


Figure 164: Local avec fenêtre équipé du système
Cas : orientation Ouest (30 Décembre à 10h)

Analyse des résultats

L'éclairement des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)			
	Nord	Sud	Est	Ouest
Zone1 : E > 1400lux	3.1m	3.2m	3.2m	3.1m
Zone 2 : 1400>E>600lux	5.6m	5.5m	5.5m	4.9m
Zone 3 : E moy500lux	3.3m	3.3m	3.3m	4.0m

Tableau 27: La profondeur des zones d'éclairement dans les quatre orientations
Cas : local avec fenêtre avec light shelf (Source : Auteur)

Orientation	Eclairement reçu à 10.5m de par la fenêtre (lux)
Nord	562.29
Sud	561.47
Est	554.14
Ouest	547.51

Tableau 28: Valeurs d'éclairement reçues à 10.5m dans les quatre orientations Cas : local avec fenêtre sans light shelf (Source : Auteur)

Nous remarquons que le système light shelf permet de partager le local en trois zones seulement au lieu de quatre et la zone 2 occupe plus de la moitié de la surface. Nous constatons aussi une augmentation du niveau d'éclairement surtout dans les zones 2 et 3 ou l'éclairement est devenu deux fois plus fort alors que l'éclairement reçu dans la zone 1

reste presque identique dans toutes les orientations. Cette augmentation résulte de la réflexion de la lumière par la partie supérieure du light shelf. Dans les orientations Nord, Sud et Est, La zone 3 s'étend sur une surface de 3.3m avec un éclairage au fond du local qui n'est pas moins de 500lux (niveau moyen). Et si nous comparons l'éclairage reçu à 10.5 m de la fenêtre dans toutes les orientations, nous trouvons que l'orientation Nord reste toujours la meilleure car elle permet de transmettre la lumière au fond du local et l'éclairage atteint à cet distance 562.29 lux. L'orientation Ouest est la plus défavorable.

Interprétation

Après l'ajout du système light shelf à la fenêtre, nous constatons que l'orientation Nord reste toujours la meilleure de point de vue d'une part, de la répartition de la lumière dans le local, ou plus de la moitié de surface du local est bien éclairée (plus de 600lux) et d'autre part, de la quantité d'éclairage que reçoit le fond de l'espace qui n'est pas moins de 500lux à 12 m de profondeur. Donc, le light shelf n'a pas une influence considérable sur l'orientation de la fenêtre. Notons que les orientations Est et Sud donnent des résultats proches de ceux obtenues par l'orientation Nord.

Configuration 1 : light shelf droit intérieur

Le modèle utilisé dans la simulation suivante va prendre les mêmes caractéristiques géométriques qui sont utilisées précédemment, De plus, toutes les simulations suivantes seront faites le 30 décembre à A10h. Les paramètres à simulés sont l'effet de la profondeur du système light shelf (0.5m, 1m) et l'inclinaison du plafond (0°, 20°).

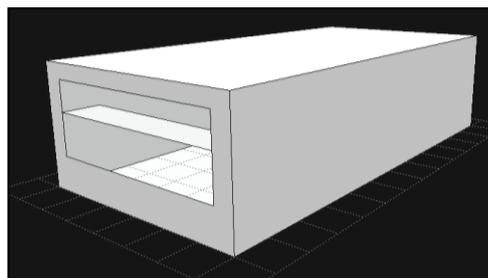


Figure165 : Configuration 1: light shelf intérieur

Cas 1 : Light shelf de 0.5m de profondeur avec un plafond droit

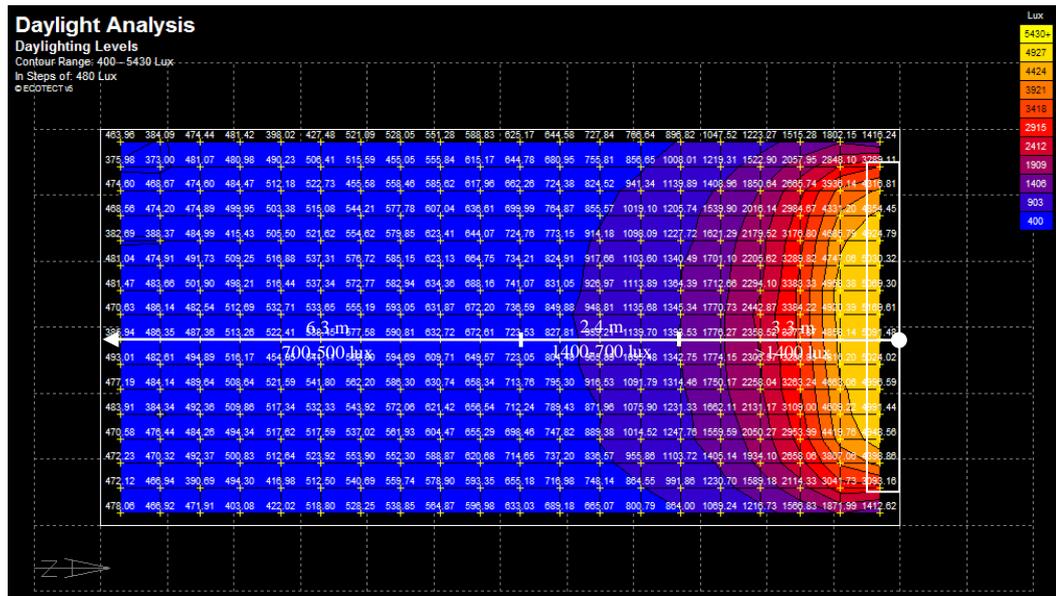


Figure 166 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 0.5m
 Cas : plafond droit

Cas 2 : Light shelf de 0.5m de profondeur avec un plafond incliné

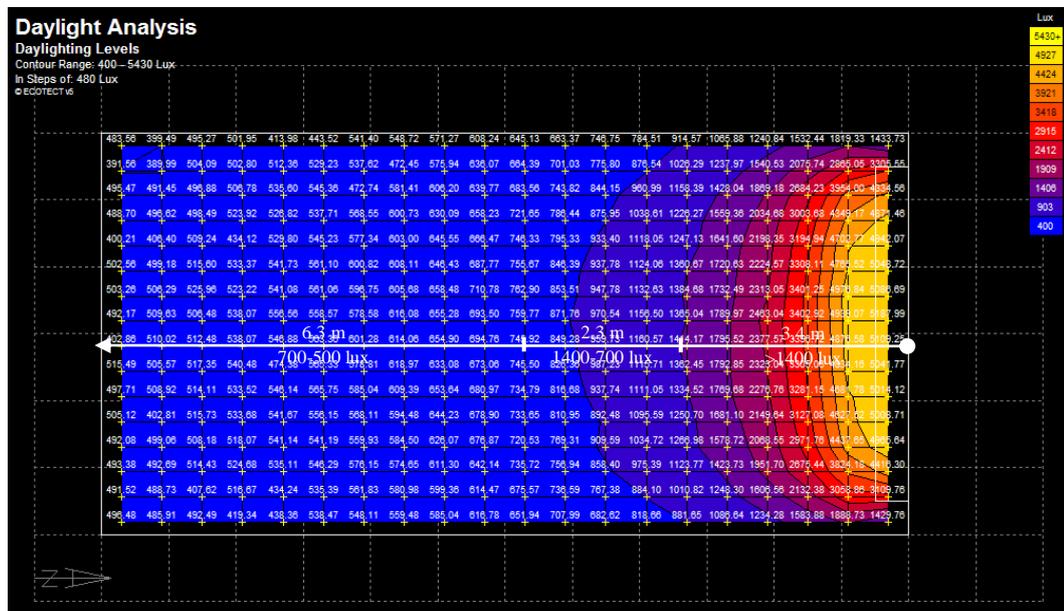


Figure 167 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 0.5m
 Cas : plafond incliné

Cas 3 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond droit

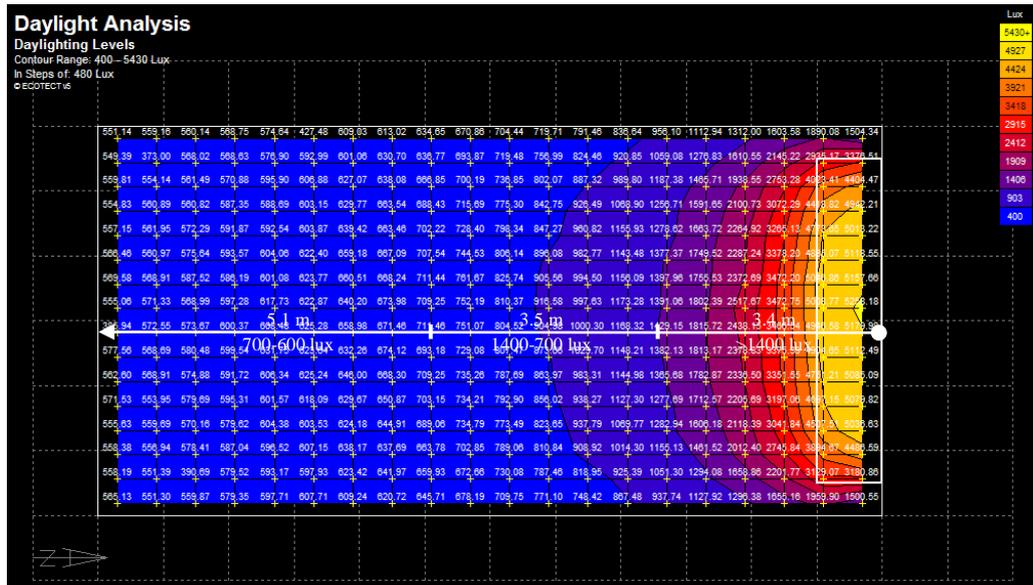


Figure 168 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1m
 Cas : plafond droit

Cas 4 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond incliné

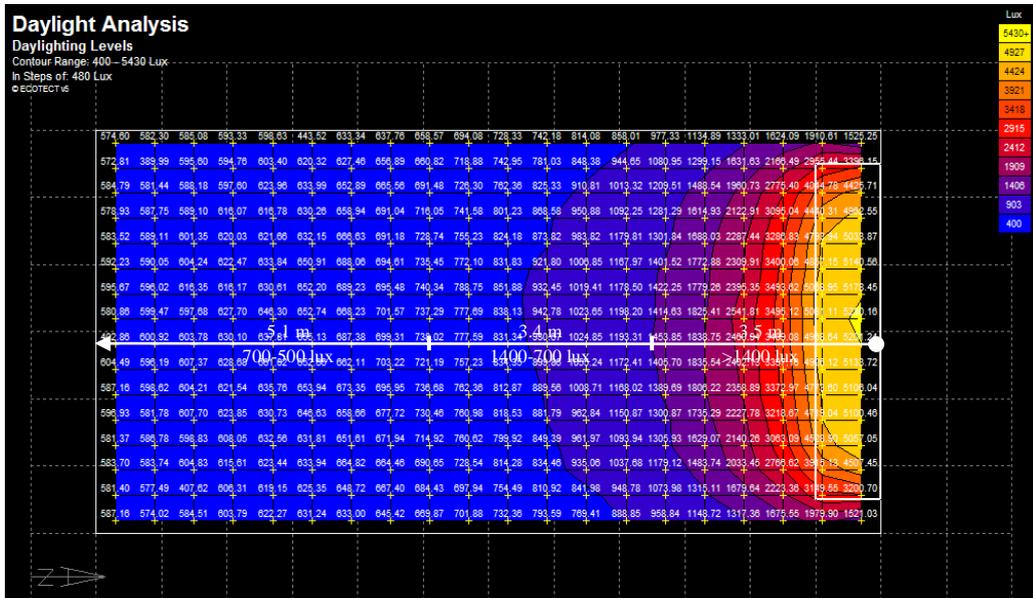


Figure 169 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1 m
 Cas : plafond incliné

Analyse des résultats

L'éclairage des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)			
	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4
Zone1 : $E > 1400\text{lux}$	3.3	3.4	3.4	3.5
Zone 2 : $1400 > E > 700\text{lux}$	2.4	2.3	3.5	3.4
Zone 3 : $700 > E > 500\text{lux}$	6.3	6.3	5.1	5.1

Tableau 29: La profondeur des zones d'éclairage pour les quatre cas de la configuration 1 (Source : Auteur)

Orientation	Eclairage reçu à 10.5m de par la fenêtre (lux)	Eclairage reçu au centre de la fenêtre (lux)
Cas 1	487	5091.48
Cas 2	512	5109.25
Cas 3	573	5179.98
Cas 4	603	5201.24

Tableau 30: Valeurs d'éclairage reçues pour les quatre cas de la configuration 1 (Source : Auteur)

Dans les quatre cas, nous constatons une augmentation du niveau d'éclairage dans le local, surtout dans la zone 2, où elle est devenue plus large. Elle atteint dans le troisième cas 3.5m de largeur avec un éclairage compris entre 1400 et 700 lux. Cette augmentation de l'éclairage est due à l'effet de la réflexion de la partie supérieure du système light shelf ainsi que l'inclinaison du plafond. A 10.50m de profondeur, l'éclairage est huit fois moins que celui reçu par la fenêtre qui atteint dans le quatrième cas 603 lux. Cette configuration a augmenté l'éclairage au niveau de la fenêtre, ce qui peut augmenter le risque d'éblouissement.

Interprétation :

Le système light shelf qui présente les caractéristiques suivantes : Largeur : 1m et plafond droit ou incliné à 20° est le meilleur du point de vue de la quantité d'éclairage qu'il transmet au fond du local bien qu'il éclaire efficacement une très petite surface qui constitue seulement 1/4 de la surface totale du local. Cette configuration ne conduit pas au confort visuel.

Configuration 2 : light shelf extérieur

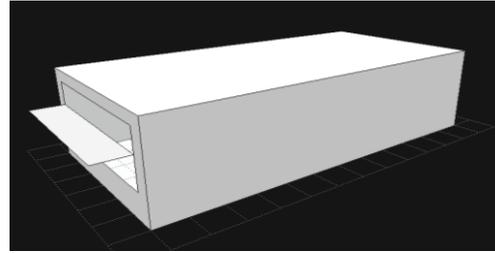


Figure 170 : Configuration 2 : light shelf extérieur

Cas 1 : Light shelf de 0.5m de profondeur avec un plafond droit

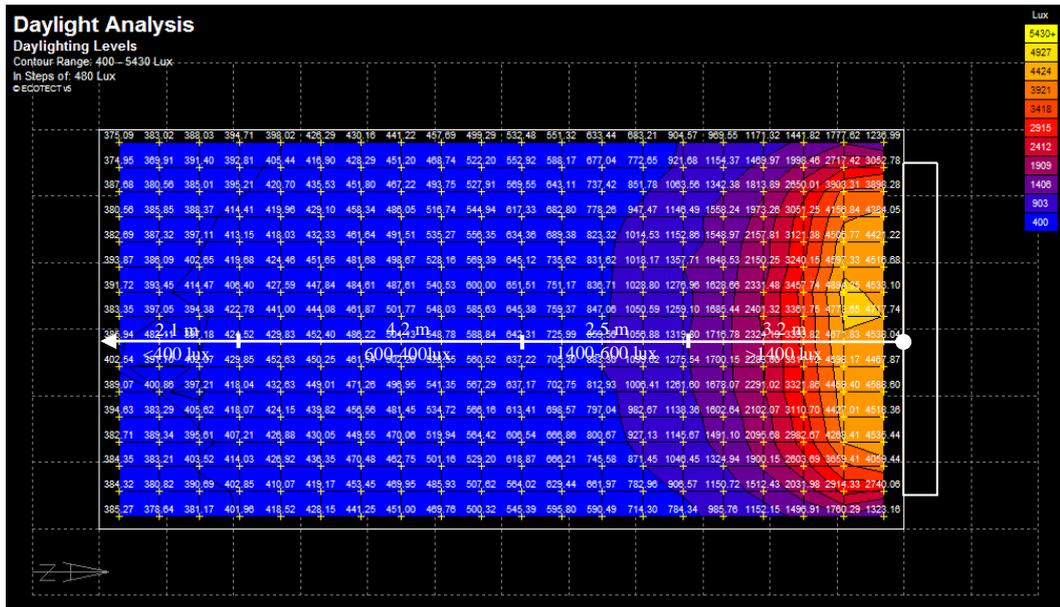


Figure 171 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 0.5m Cas : plafond droit

Cas 2 : Light shelf de 0.5m de profondeur avec un plafond incliné

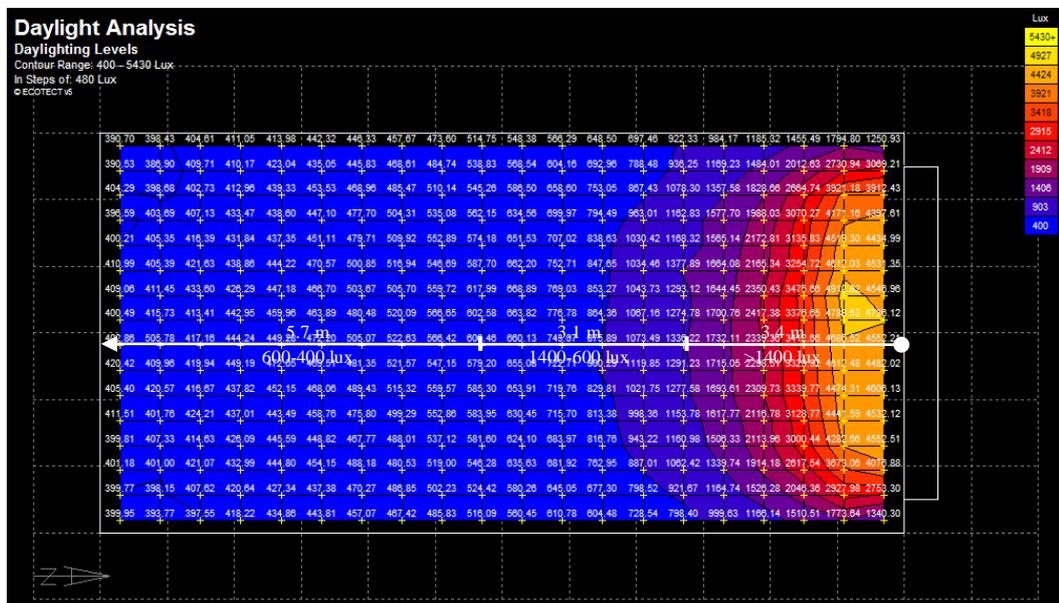


Figure 172 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 0.5m Cas : plafond incliné

Cas 3 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond droit

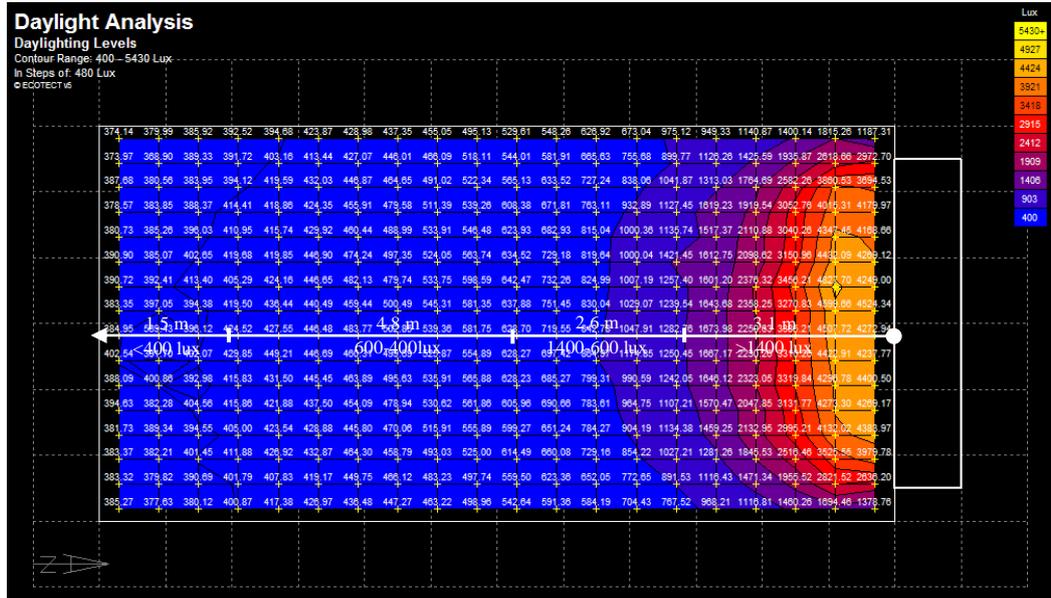


Figure 173 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1m
 Cas : plafond droit

Cas 4 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond incliné

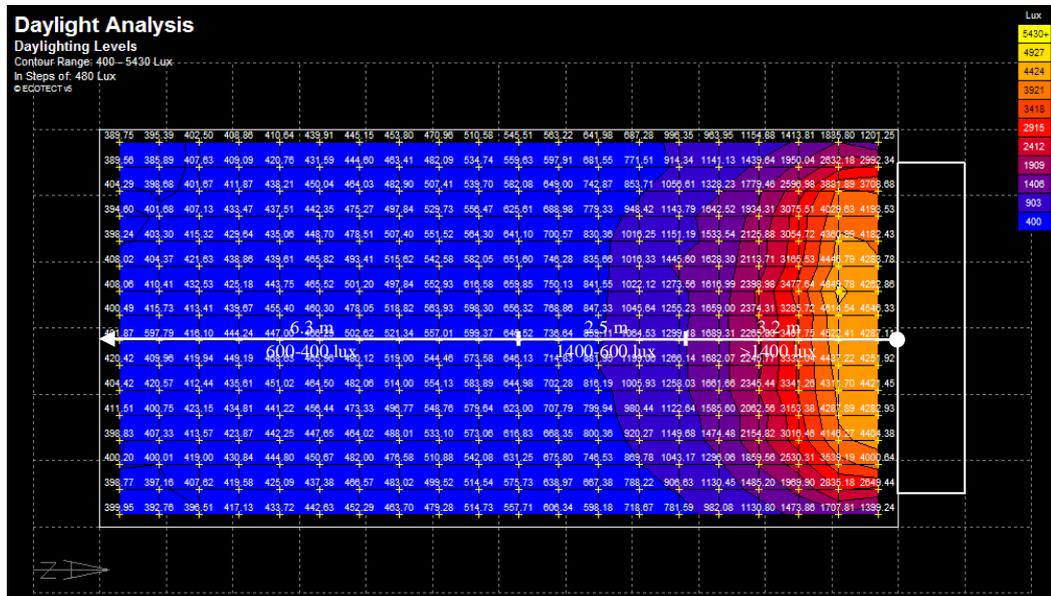


Figure 174 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1 m
 Cas : plafond incliné

Analyse des résultats

L'éclairement des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)			
	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4
Zone1 : $E > 1400\text{lux}$	3.2	3.4	3.1	3.2
Zone 2 : $1400 > E > 600\text{lux}$	2.5	3.1	2.6	2.5
Zone 3 : $600 > E > 400\text{lux}$	4.2	5.7	4.8	6.3
Zone 4 : $E < 400\text{lux}$	2.1	-	1.5	-

Tableau 31: La profondeur des zones d'éclairement pour les quatre cas de la configuration 2 (Source : Auteur)

Orientation	Eclairement reçu à 10.5m de par la fenêtre (lux)	Eclairement reçu au centre de la fenêtre (lux)
Cas 1	397.18	4538.01
Cas 2	417.16	4552.21
Cas 3	396.12	4272.94
Cas 4	418.10	4287.11

Tableau 32: Valeurs d'éclairement reçues pour les quatre cas de la configuration 2 (Source : Auteur)

Nous remarquons que la zone 4 apparait à nouveau dans le premier et le troisième cas de cette configuration (light shelf extérieur). Cette zone est caractérisée par un faible niveau d'éclairement ($< 400\text{lux}$) et par une petite largeur qui atteint seulement 2m. La largeur de la zone 2 est devenue moins petite si nous la comparons avec la configuration du light shelf intérieur ; cette diminution arrive jusqu'à 1.5m dans les cas où le plafond est droit. Nous constatons aussi une diminution de l'éclairement qui arrive au centre de la fenêtre ; cette diminution atteint 1114.13 lux dans le quatrième cas. Cela revient à la partie extérieure du système light shelf qui bloque la pénétration de la lumière. Ce type de light shelf apporte moins de lumière au fond du local. A 10.50 m de profondeur et dans le quatrième cas, l'éclairement reste faible et il atteint sa valeur maximale (417.10lux).

Interprétation

Le type extérieur du système light shelf n'a pas donné de bons résultats si nous le comparons avec le type intérieur, car dans toutes ces configurations, la plus grande profondeur de la zone 2 ou l'éclairage est élevé reste petite et atteint seulement 3m. De plus, ce type n'augmente pas le niveau d'éclairage au fond du local qui reste faible (418.10 lux). Le système light shelf extérieur offre l'avantage de réduire la quantité d'éclairage reçu au centre de la fenêtre, ce qui réduit par conséquent l'éblouissement. Cette configuration ne répond pas aux exigences du confort visuel.

Configuration 3 : light shelf intérieur+extérieur

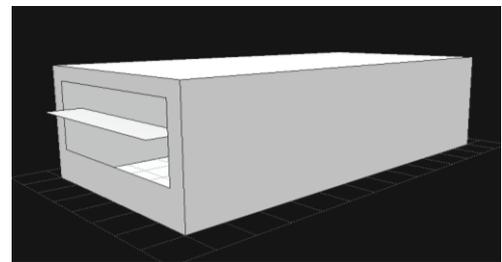


Figure175 : Configuration 3 : light shelf intérieur+extérieur

Cas 1 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond droit

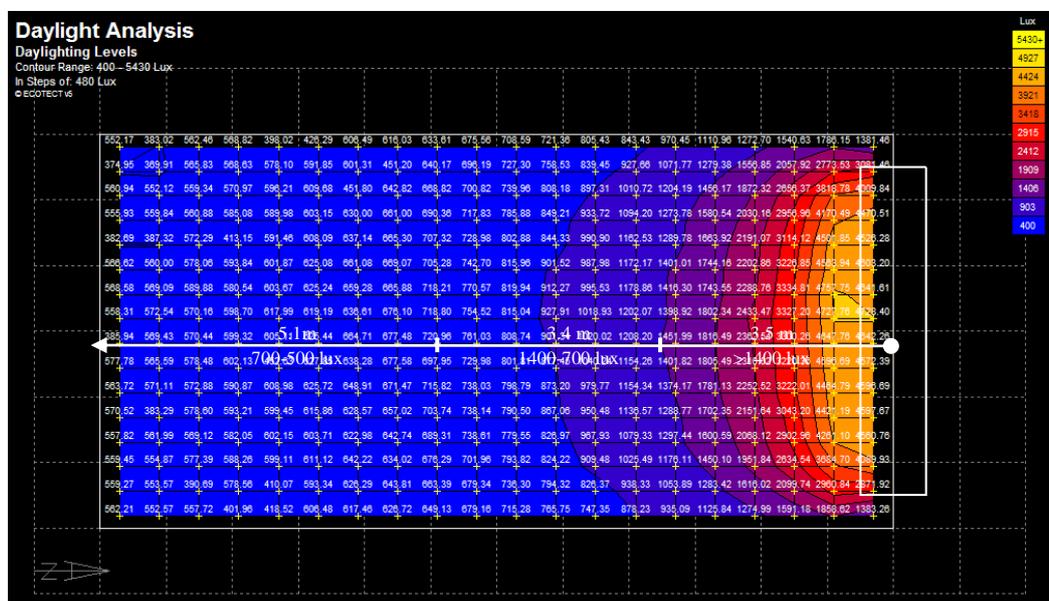


Figure 176 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1 m
 Cas : plafond droit

Cas 2 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond incliné

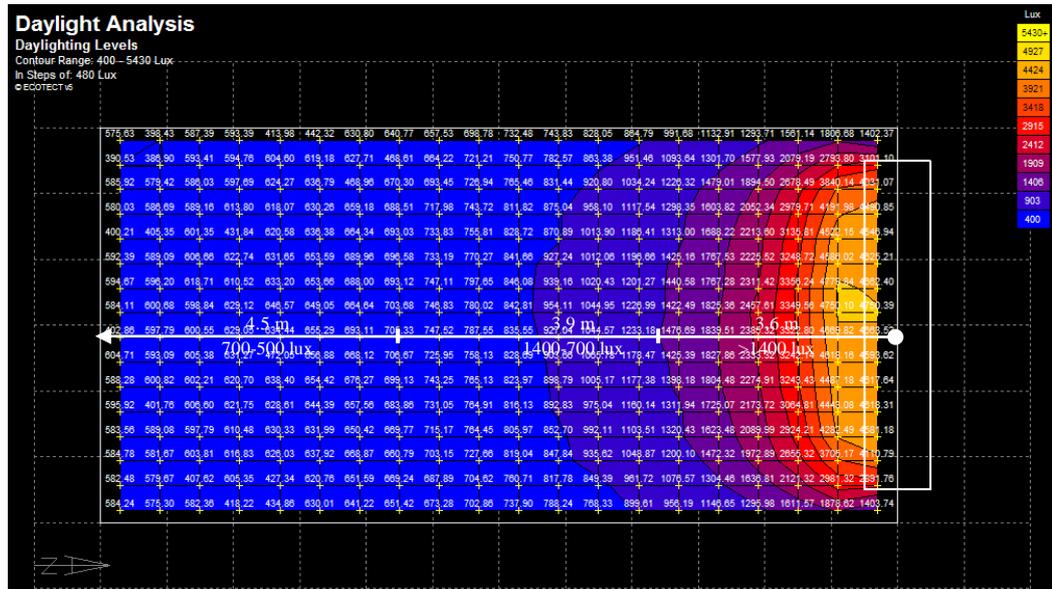


Figure 177 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1m
 Cas : plafond incliné

Cas 3: Light shelf de 2m de profondeur avec un plafond droit

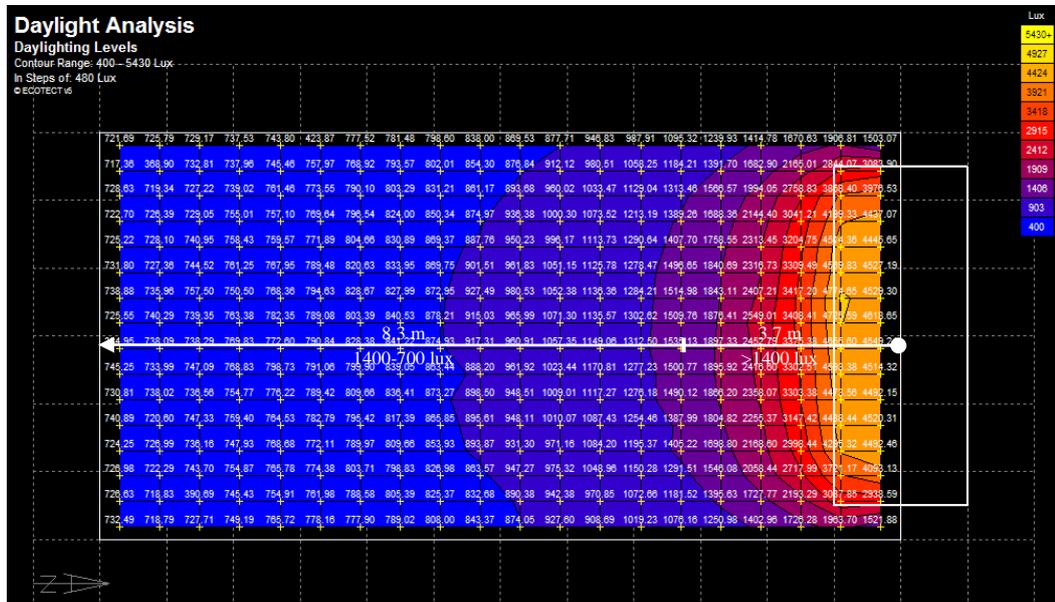


Figure 178 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 2m
 Cas : plafond droit

Cas 4 : Light shelf de 2m de profondeur avec un plafond incliné

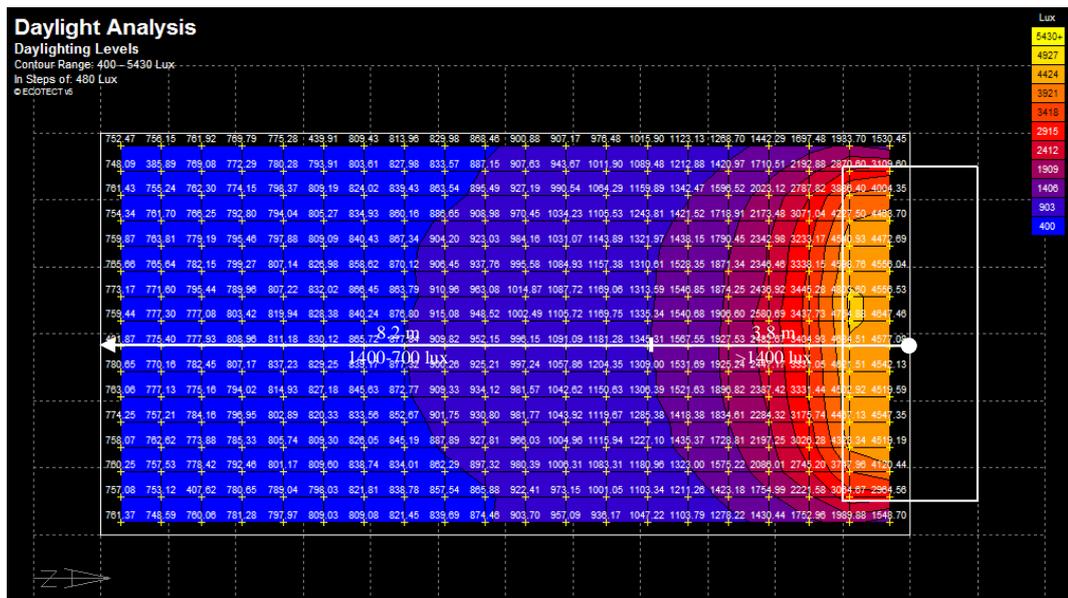


Figure 179 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 2 m
Cas : plafond incliné

Analyse des résultats

L'éclairement des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)			
	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4
Zone1 : $E > 1400\text{lux}$	3.5	3.6	3.7	3.8
Zone 2 : $1400 > E > 700\text{lux}$	3.4	3.9	8.3	8.2
Zone 3 : $700 > E > 500\text{lux}$	5.1	4.5	-	-

Tableau 33: La profondeur des zones d'éclairement pour les quatre cas de la configuration 3 (Source : Auteur)

Orientation	Eclairement reçu à 10.5m de par la fenêtre (lux)	Eclairement reçu au centre de la fenêtre (lux)
Cas 1	570.44	4842.28
Cas 2	600.55	4563.53
Cas 3	738.29	4549.21
Cas 4	777.39	4577.08

Tableau 34: Valeurs d'éclairement reçues pour les quatre cas de la configuration 3 (Source : Auteur)

Dans le premier et le deuxième cas, nous remarquons que le local est partagé en trois zones. La zone 2 qui est caractérisée par un bon niveau d'éclairage occupe seulement le 1/3 de la surface totale du local. Alors que dans le troisième et le quatrième cas, le local est partagé en deux zones seulement et la zone 2 devient deux fois plus large (elle occupe 2/3 de la surface du local) et l'éclairage est devenu plus fort au fond du local avec plus de 700lux à 10.50 m de profondeur. Nous constatons aussi que ce type permet de réduire la quantité d'éclairage reçu au niveau de la fenêtre. Cette diminution revient à la partie extérieure de cette configuration. En plus, la valeur minimale de l'éclairage reçu dans tout le local n'est pas inférieure à 500lux.

Interprétation

Le système light shelf extérieur-intérieur est plus efficace que les deux configurations précédentes. Il permet de réduire la quantité d'éclairage reçue au niveau de la fenêtre et par conséquent, il va réduire l'effet de l'éblouissement et de contraste. Le meilleur cas est celui qui a 2 m de profondeur avec un plafond incliné car il apporte la lumière plus profondément dans le local (777.39lux à 10.50 m de profondeur).

On en conclut que, le système light shelf type extérieur-intérieur donne de bons résultats et permet une répartition plus au moins uniforme dans tout le local ce qui assure un confort visuel.

Configuration 4 : light shelf incliné vers l'intérieur

L'inclinaison du light shelf dans les deux types (intérieur et extérieur) correspond à la latitude de la ville de Biskra, 34° :

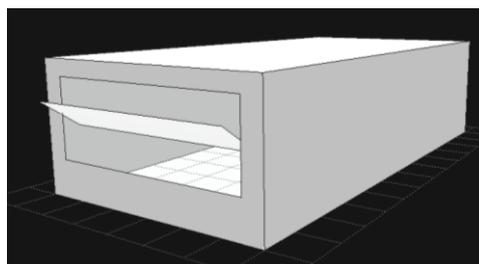


Figure 180 : Configuration 4 : light shelf incliné vers l'intérieur

Cas 1 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond droit

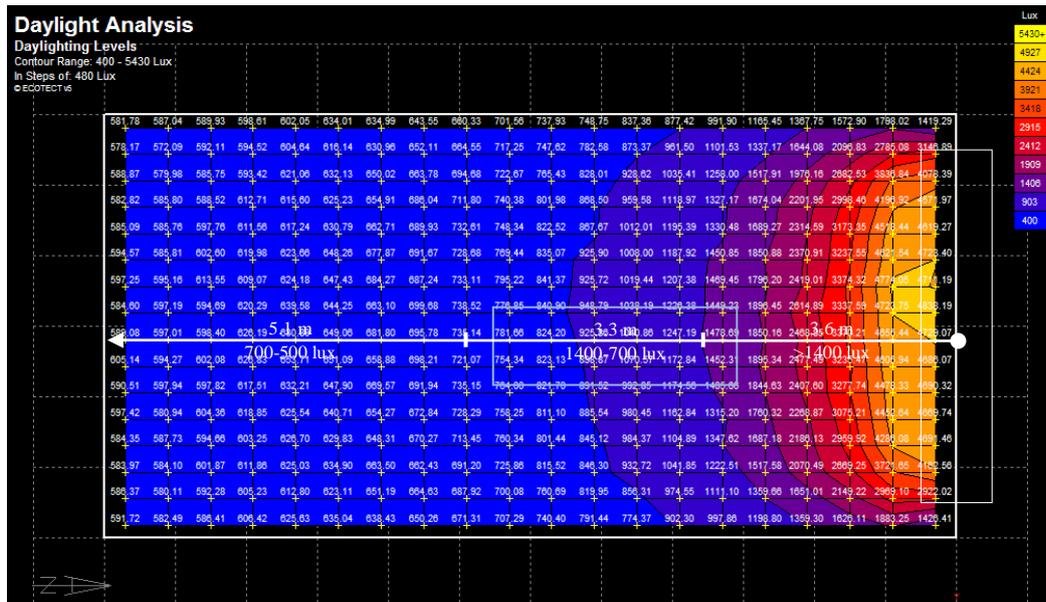


Figure 181 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1m Cas : plafond droit

Cas 2 : Light shelf de 1m de profondeur avec un plafond incliné

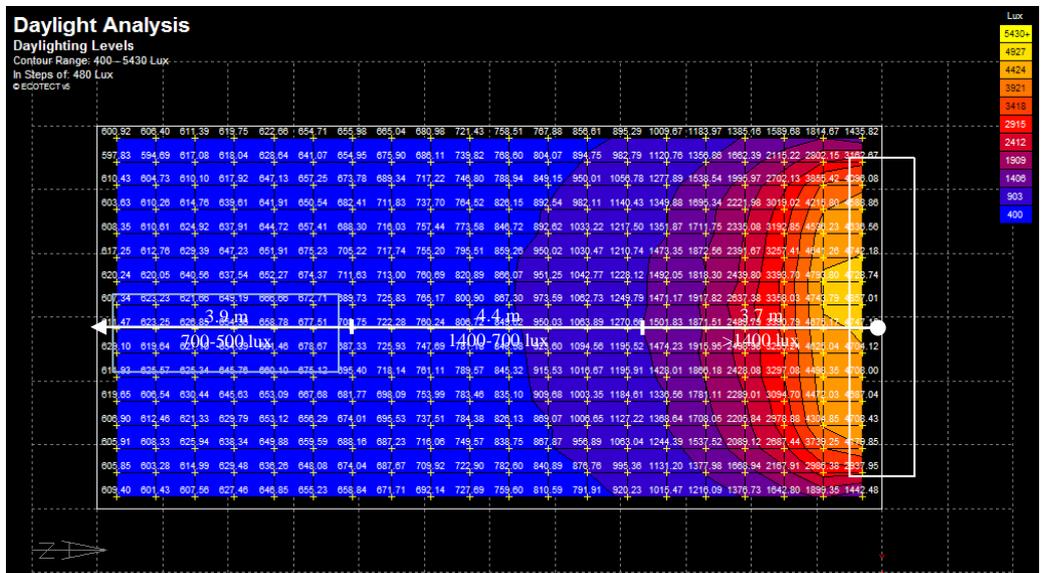


Figure 182 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1m Cas : plafond incliné

Cas 3 : Light shelf de 2m de profondeur avec un plafond droit

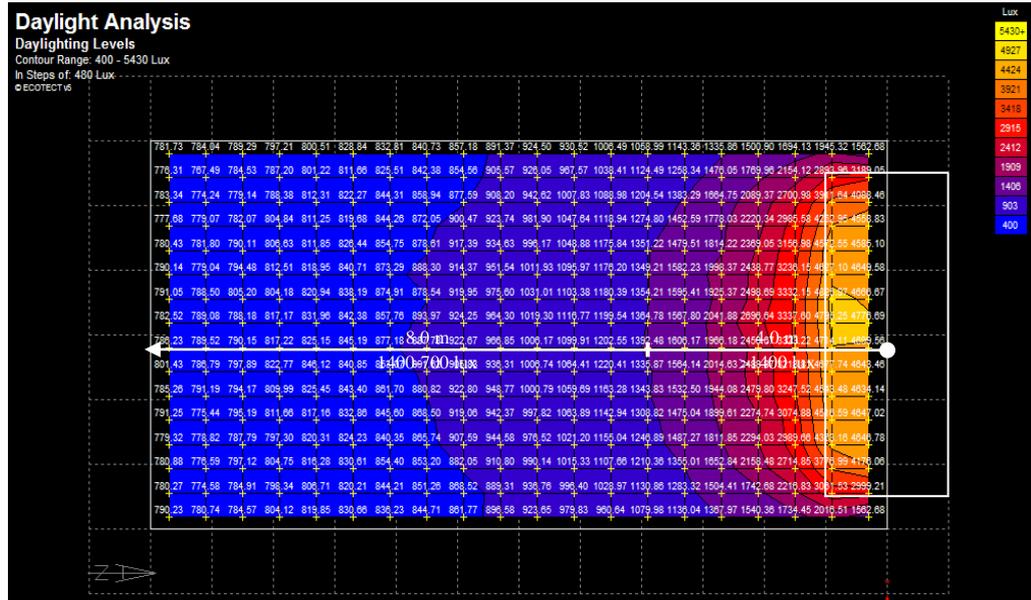


Figure 183 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 2m
 Cas : plafond droit

Cas 4 : Light shelf de 2m de profondeur avec un plafond incliné

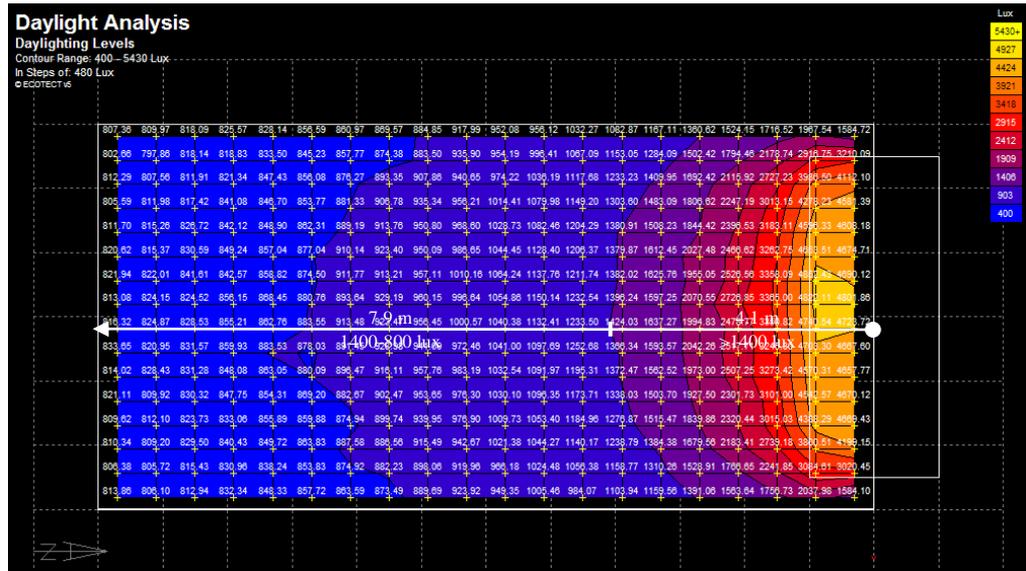


Figure 184 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 2 m
 Cas : plafond incliné

Remarque : L'inclinaison de la partie intérieure du système light shelf rend sa hauteur inférieure à 1.60 m au lieu de 2.20m. Cela peut être une gêne. Pour cette raison, nous

proposons une troisième simulation qui consiste à réduire la profondeur intérieure du système à 0.5m tout en gardant la hauteur extérieure fixe.

Cas 5 : Light shelf de 1.5m de profondeur avec un plafond droit

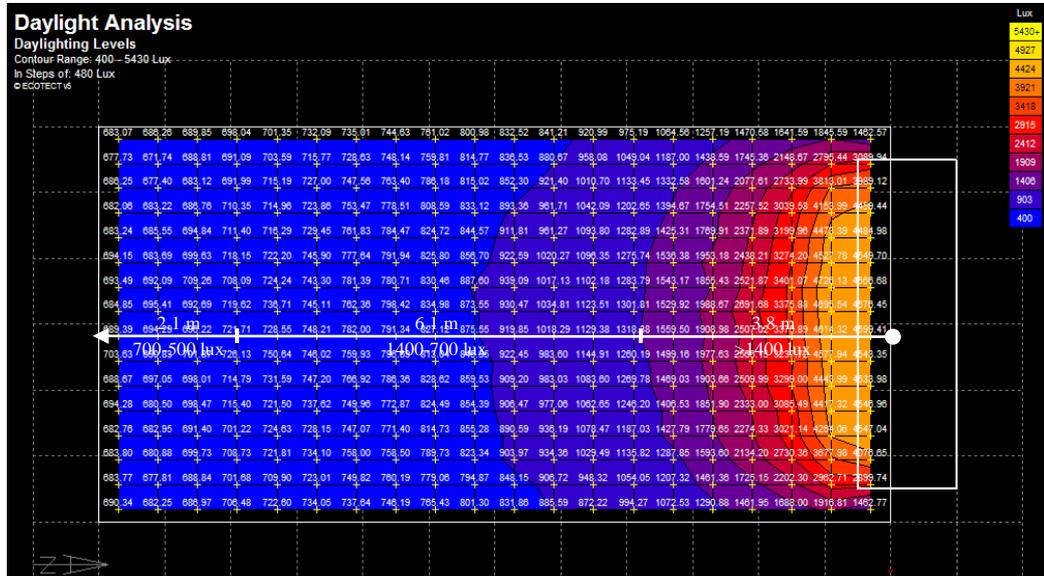


Figure 185 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1.5m
 Cas : plafond

Cas 6: Light shelf de 1.5 m de profondeur avec un plafond incliné

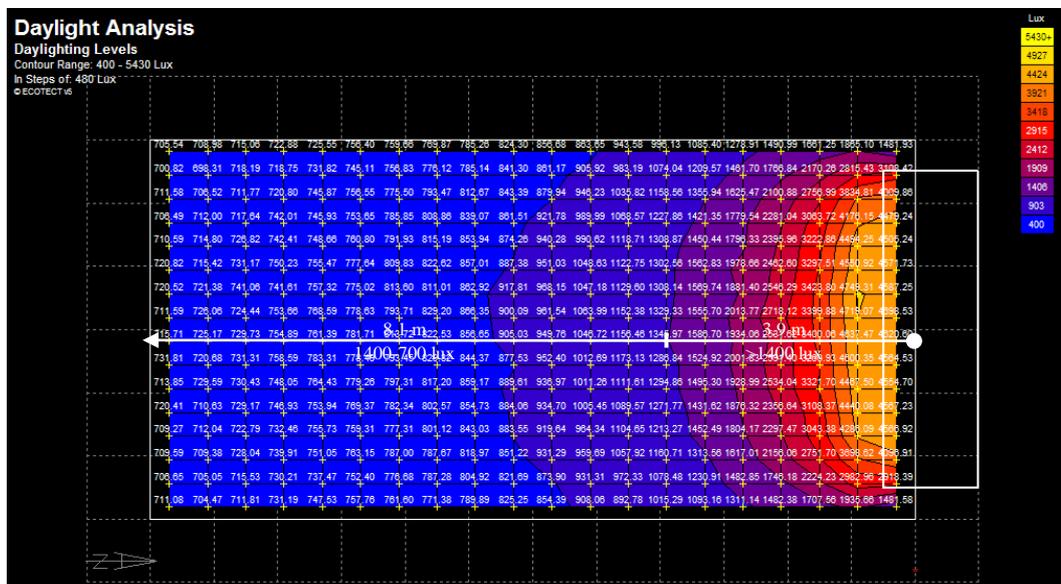


Figure 186 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1.5m
 Cas : plafond incliné

Analyse des résultats

L'éclairément des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)					
	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4	Cas 5	Cas 6
Zone1 : E > 1400lux	3.6	3.7	4.0	4.1	3.8	3.9
Zone 2 : 1400>E>700lux	3.3	4.4	8.0	7.9	6.1	8.1
Zone 3 : 700>E>500lux	5.1	3.9	-	-	2.1	-

Tableau 35: La profondeur des zones d'éclairément dans les six cas de la configuration 4 (Source : Auteur)

Orientation	Eclairément reçu à 10.5m de la fenêtre (lux)	Eclairément reçu au centre de la fenêtre (lux)
Cas 1	598.40	4729.07
Cas 2	626.85	4747.17
Cas 3	790.15	4669.56
Cas 4	828.53	4723.72
Cas 5	696.22	4599.41
Cas 6	729.73	4620.60

Tableau 36: Valeurs d'éclairément reçues pour les six cas de la configuration 4 (Source : Auteur)

Nous remarquons que dans les premier, deuxième et cinquième cas, le local est partagé en trois zones. La largeur de la zone 2, qui à un bon niveau d'éclairément, varie selon la largeur du système light shelf et atteint 6.1lux dans le cinquième cas. Par contre, nous trouvons deux zones dans les troisième, quatrième et sixième cas, ou la zone 2 à occupé 2/3 de la surface totale du local. Nous constatons aussi que l'éclairément est devenu plus fort au fond du local (plus de 700lux). La largeur de la partie extérieure de cette configuration permet de réduire la quantité d'éclairément reçu au niveau de la fenêtre.

Interprétation

Le système light shelf incliné vers l'intérieur donne de bons résultats. Il permet de réduire la quantité d'éclairément qui est reçu au niveau de la fenêtre et par conséquent, il va réduire l'effet de l'éblouissement et de contraste. De plus, la valeur minimale de l'éclairément reçu

dans tout le local n'est pas moins de 500lux. Dans cette configuration nous trouvons deux meilleurs cas. Le premier est celui qui a 2 m de profondeur avec un plafond incliné ; il apporte la lumière plus profondément dans le local avec pas moins de 800lux à 12 m, mais, il peut être une gêne à cause de sa faible hauteur à l'intérieur du local (qui est de 1.6m seulement). Le deuxième cas, qui est plus fonctionnel, est celui qui a 1.5m de profondeur avec un plafond incliné (1m à l'extérieur et 0.5m à l'intérieur). On en conclut que, le système light shelf incliné vers l'intérieur assure le confort visuel par une bonne répartition de l'éclairage dans tout le local en diminuant l'éblouissement et le contraste.

Configuration 5 : light shelf incliné vers l'extérieur

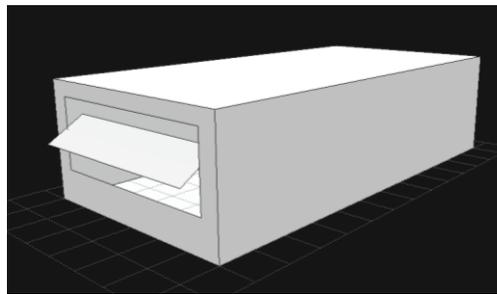


Figure 187: light shelf incliné vers l'extérieur

Cas 1: Light shelf de 1 m de profondeur avec un plafond droit

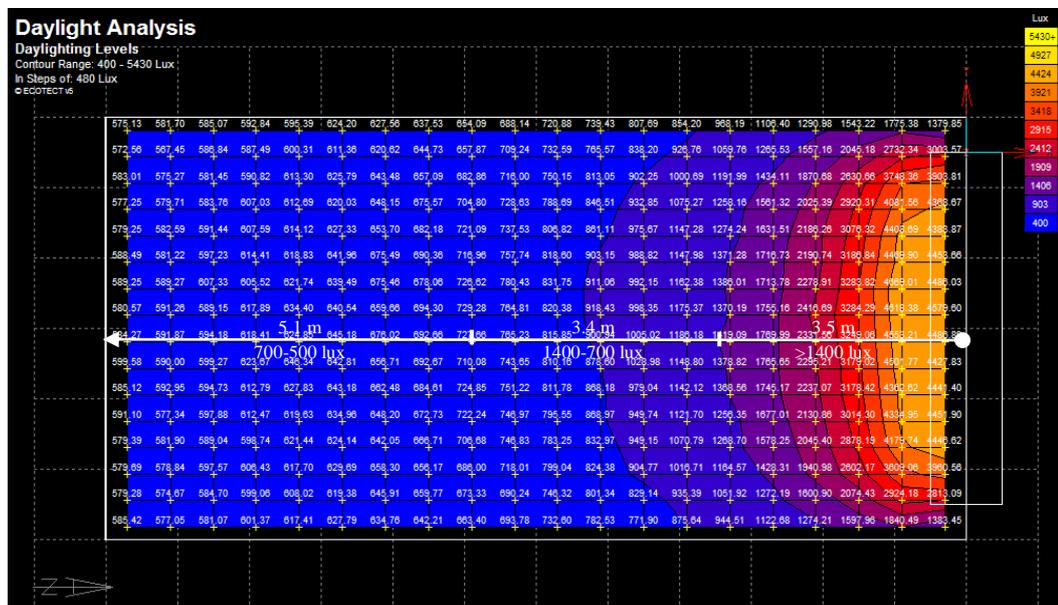


Figure 188 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1 m
 Cas : plafond incliné

Cas 2: Light shelf de 1 m de profondeur avec un plafond incliné

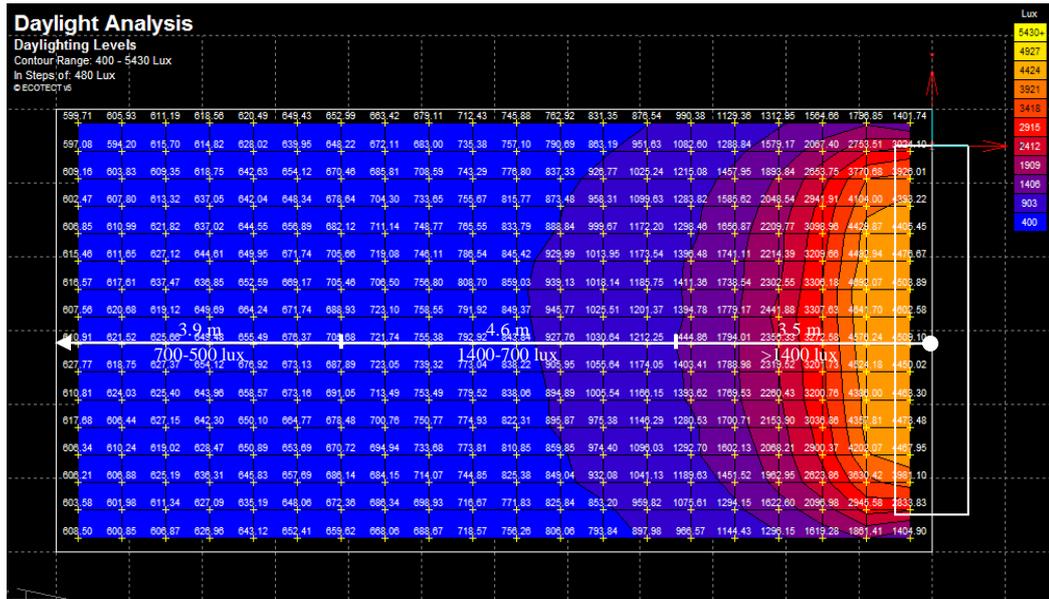


Figure 189 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1 m
Cas : plafond incliné

Cas 3: Light shelf de 1.5 m de profondeur avec un plafond droit

Remarque : L'inclinaison de la partie extérieure du light shelf rend sa hauteur inférieure à 1.60 m. Cela peut être une gêne. Pour cette raison, nous proposons une autre simulation qui consiste à réduire la profondeur extérieure à 0.5m tout en gardant la hauteur intérieur fixe.

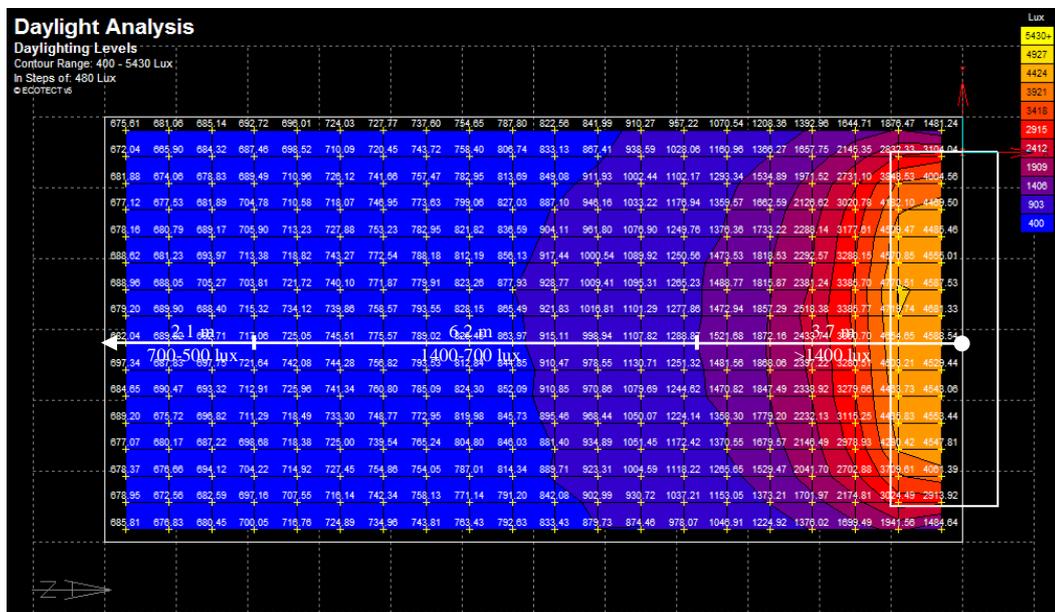


Figure 190 : Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 1.5m
Cas : plafond droit

Cas 4: Light shelf de 1.5 m de profondeur avec un plafond incliné

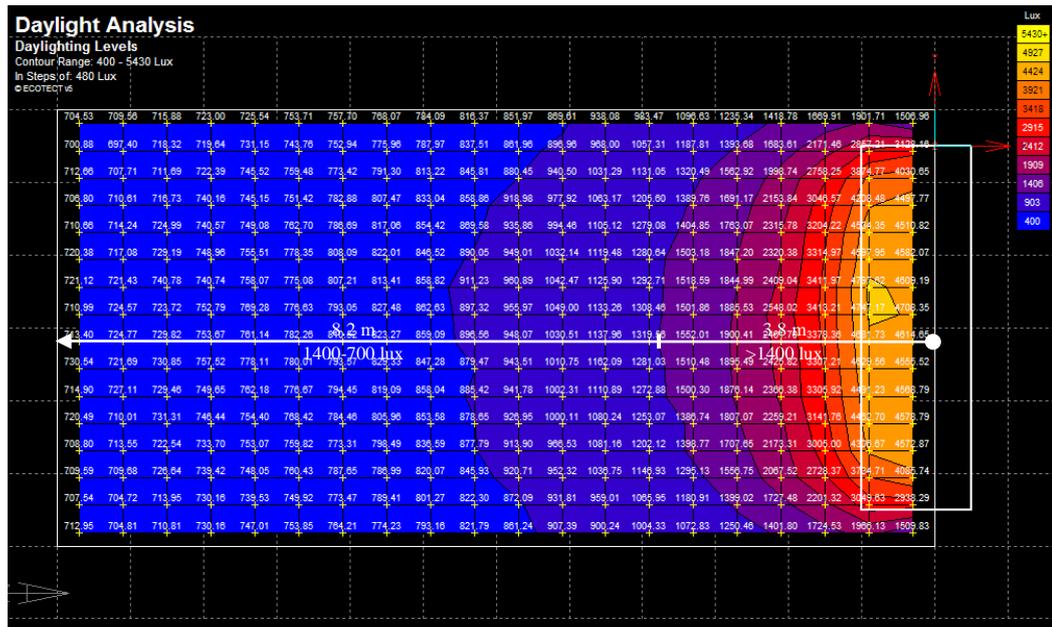


Figure 191 : Local avec fenêtre équipé du système
Light shelf de profondeur de 1.5m
Cas : plafond incliné

Cas 5: Light shelf de 2 m de profondeur avec un plafond droit

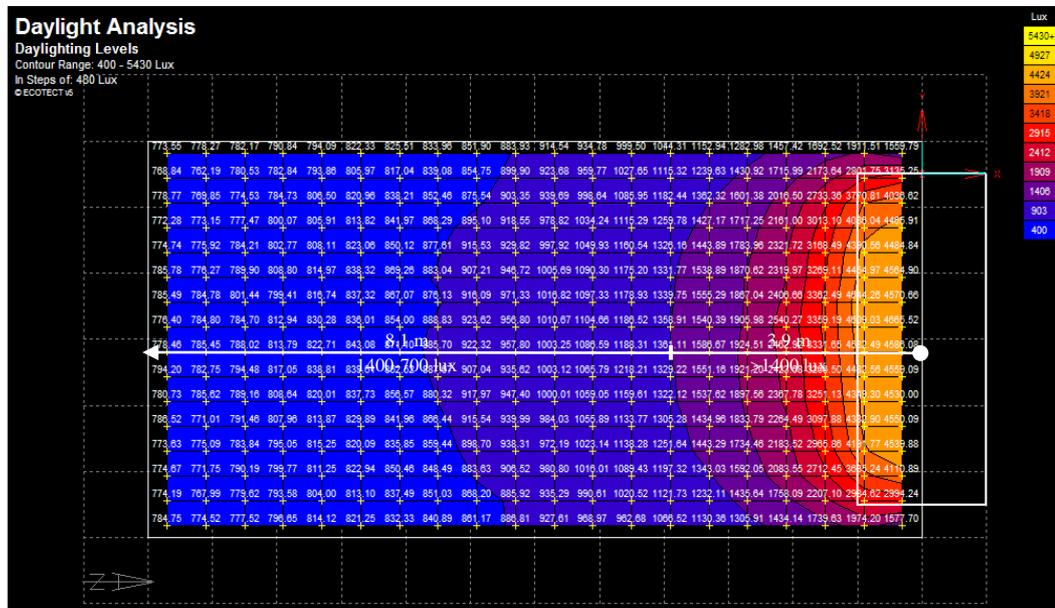


Figure 192 : Local avec fenêtre équipé du système
Light shelf de profondeur de 2m
Cas : plafond droit

Cas 6: Light shelf de 2 m de profondeur avec un plafond incliné

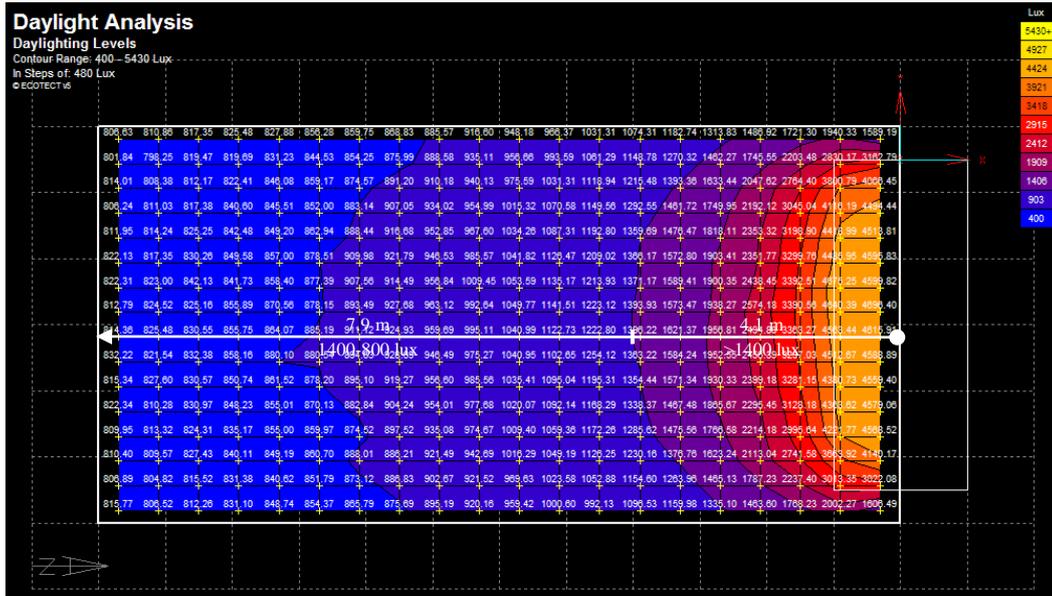


Figure 193: Local avec fenêtre équipé du système Light shelf de profondeur de 2m
Cas : plafond incliné

Analyse des résultats

L'éclairement des différentes Zones	La profondeur de la zone (m)					
	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4	Cas 5	Cas 6
Zone1 : E > 1400lux	3.5	3.5	3.7	3.8	3.9	4.1
Zone 2 : 1400>E>700lux	3.4	4.6	6.2	8.2	8.1	7.9
Zone 3 : 700>E>500lux	5.1	3.9	2.1	-	-	-

Tableau 37: La profondeur des zones d'éclairement pour les six cas de la configuration 5 (Source : Auteur)

Orientation	Eclairement reçu à 10.5m de la fenêtre (lux)	Eclairement reçu au centre de la fenêtre (lux)
Cas 1	594.18	4486.89
Cas 2	625.66	4509.10
Cas 3	692.71	4588.54
Cas 4	729.82	4614.65
Cas 5	788.02	4586.08
Cas 6	830.55	4615.91

Tableau 38: Valeurs d'éclairement reçues par la configuration 5 (Source : Auteur)

Nous remarquons que dans les premier, le deuxième et troisième cas, le local est partagé en trois zones. La largeur de la zone 2 varie selon la largeur du système light shelf ; elle atteint 6.2lux dans le troisième cas. Alors que nous trouvons deux zones dans les quatrième, le cinquième et le sixième cas, ou la zone 2 occupe plus de 2/3 de la surface totale du local et l'éclairage est devenu plus fort au fond (830lux). Cette configuration permet aussi de réduire la quantité d'éclairage reçu au niveau de la fenêtre.

Interprétation

Le rendement du système light shelf incliné vers l'extérieur est très proche de celui incliné vers l'intérieur. La configuration du système qui à 2m de largeur soit avec un plafond droit ou incliné donne les meilleurs résultats en termes de répartition de la lumière et de sa profondeur, mais architecturalement, cette largeur avec cette inclinaison rend sa hauteur inférieure à 2.2m, chose qui peut constituer une véritable gêne. Une autre configuration qui apparaît plus efficace est celle qui à 1.5m de largeur avec un plafond incliné. Elle permet à la fois une bonne répartition de l'éclairage dans le local qui arrive jusqu'au fond avec une quantité de 500 lux, une réduction des risques d'éblouissement et de contraste par la réduction de l'éclairage au niveau de la fenêtre et une solution pour la faible hauteur qui résulte de l'inclinaison du système. Le système light shelf incliné vers l'extérieur assure le confort visuel dans tout le local.

Comparaison et interprétation

A travers cette simulation qui a servi à faire une investigation exhaustive sur les types du système light shelf ainsi que les résultats obtenus, nous avons tiré les configurations qui sont les plus efficaces et les plus adaptables au climat de la ville de Biskra. Elles apportent plus profondément la lumière, permettent une bonne répartition de l'éclairage dans toute la surface du local, réduisent l'éblouissement de la fenêtre et par conséquent, le contraste et assurent un confort visuel acceptable.

Ces configurations qui sont les meilleures, sont présentées dans le tableau suivant:

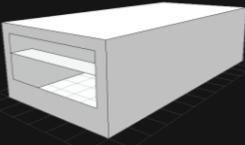
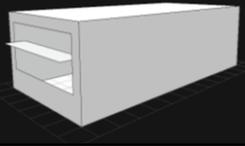
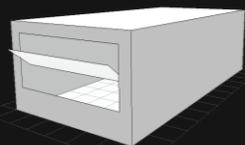
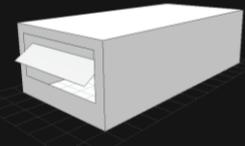
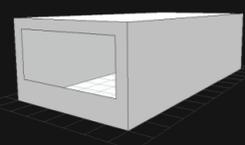
Type du système light shelf	Les différentes configurations	Largeur du light shelf (m)	Type du plafond	Eclairage au niveau de la fenêtre	Eclairage à 10.50 m	Largeur de la zone 2 (1400-700lux)
Intérieur		1	droit	5179.98	573	3.5
		1	incliné	5201.24	603	3.4
Intérieur-extérieur		2 (1m int + 1m ext)	incliné	4577.08	777.39	8.2
Incliné vers l'intérieur		1.5 (0.5m int + 1m ext)	incliné	4620.60	729.73	8.1
Incliné vers l'extérieur		1.5 (1m int + 0.5m ext)	incliné	4614.65	729.82	8.2
Fenêtre sans light shelf		-	droit	5068.91	394.13	2.4

Tableau 39: Tableau récapitulatif des différentes configurations du système light shelf (Source : Auteur)

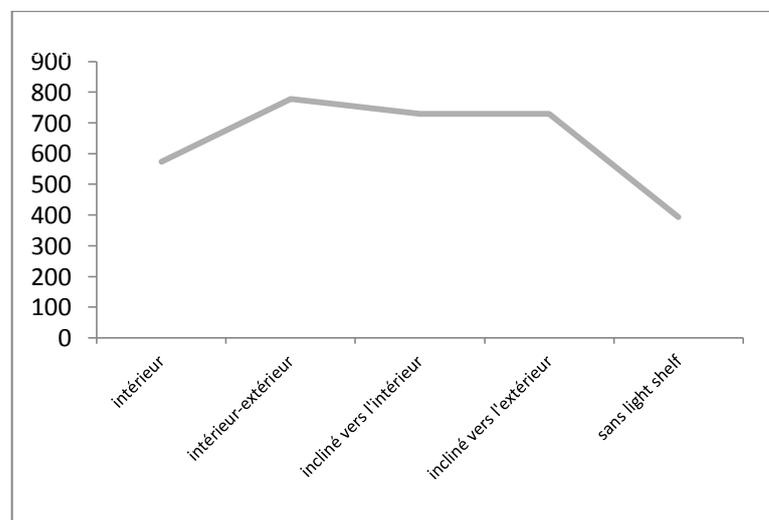


Figure 194: L'éclairage à 10.50m de profondeur pour chaque configuration (Source : Auteur)

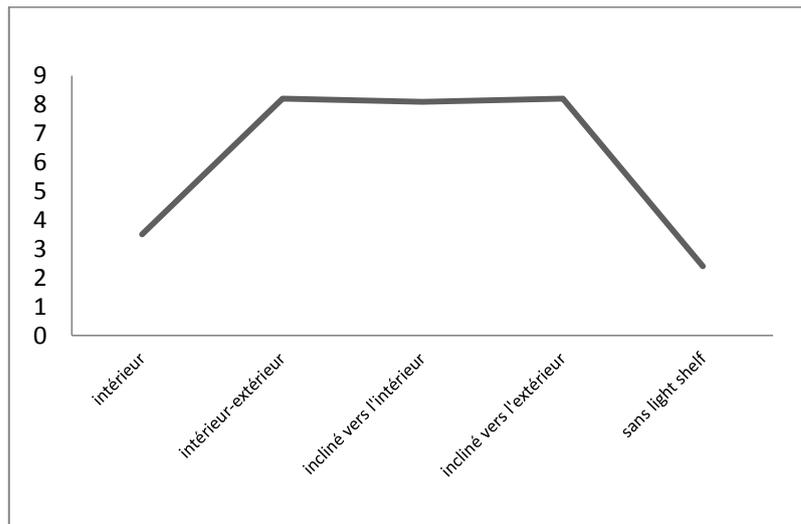


Figure 195: La profondeur de la zone 2 pour chaque configuration
(Source : Auteur)

Si nous comparons les résultats obtenus par la fenêtre seulement et ceux obtenus par les différentes configurations du système light shelf : intérieur, intérieur-extérieur, incliné vers l'intérieur et incliné vers l'extérieur, nous concluons que :

La fenêtre capte plus de lumière lorsqu'elle n'est pas équipée d'un système light shelf, sauf dans le type intérieur. Donc, les configurations du système light shelf intérieur-extérieur, incliné vers l'intérieur et incliné vers l'extérieur réduisent la quantité de l'éclairement au niveau de la fenêtre permettant ainsi de minimiser l'éblouissement et le contraste.

La largeur de la zone 2 ou l'éclairement est élevé (1400-700lux) est trois fois et demi plus fort avec le système light shelf sauf dans le type intérieur.

L'éclairement reçu à 10.50 m de profondeur est deux fois plus fort avec les trois configurations du système light shelf intérieur-extérieur, incliné vers l'intérieur et incliné vers l'extérieur.

Le rendement du système light shelf est plus fort lorsque le local est équipé d'un plafond incliné.

L'éclairement au fond du local augmente avec l'augmentation de la largeur du système light shelf.

Conclusion

Il est certain que la fenêtre reste toujours l'élément principal de la conception architecturale dans la ville de Biskra car elle permet de capter la lumière du jour pour éclairer les différents espaces. Si nous intégrons un système light shelf à cette fenêtre, son rendement va être augmenté de manière considérable. Dans le but de tester l'efficacité de ce système dans la ville de Biskra, nous avons proposé deux expériences qui ont été effectuées par le logiciel "Ecotect 5.5" sous un ciel intermédiaire: la première expérience consiste à simuler la lumière naturelle dans un espace équipé d'une fenêtre seulement (modèle de référence) alors que dans la deuxième, nous avons ajouté un système light shelf. Les résultats ont montré que le système light shelf a amélioré le rendement de la fenêtre, car il a augmenté le niveau d'éclairage dans tout le local, surtout au fond de l'espace avec des valeurs doublées, ce qui a permis d'avoir deux zones (dans certaines configurations : intérieur-extérieur et incliné) au lieu de quatre (cas de la fenêtre seulement). Cette simulation a montré aussi que ce système n'a aucune influence sur l'orientation, et l'orientation nord reste la plus intéressante. Sachant que la largeur du système influence son rendement, plus le système est large, plus il diffuse profondément la lumière. De plus, le plafond incliné améliore les résultats par rapport au plafond droit.

La deuxième expérience nous a permis de comparer le rendement de chaque configuration de système light shelf proposée pour choisir le type le plus performant qui s'adapte au climat de la ville de Biskra. La simulation nous a permis de déterminer les configurations suivantes : intérieur, intérieur-extérieur, incliné vers l'intérieur incliné vers l'extérieur à cause de leurs rendements. Le type extérieur n'améliore pas les résultats car il ne diffuse pas l'éclairage au fond de l'espace et il augmente le risque d'éblouissement. Le type intérieur augmente le niveau d'éclairage mais il augmente aussi le risque d'éblouissement. Le type incliné vers l'intérieur ou vers l'extérieur arrive à des résultats très proches en termes d'éclairage apporté au fond du local (729.73 et 729.82 lux). De plus, dans cette configuration la largeur de la zone 2 est importante et varie de 8.1 à 8.2m (la zone 2 est caractérisée par un bon éclairage). Le type intérieur-extérieur (2m de largeur, plafond incliné) est le plus performant ; il réduit l'éclairage reçu par la fenêtre de 491.83lux. Il augmente la largeur de la zone 2 (8.2m) et il permet d'augmenter le niveau d'éclairage au fond du local à 777.39lux, ce qui est la valeur maximale atteinte au cours de toutes ces simulations.

Chapitre IV

Le gisement lumineux à Biskra

Introduction

Chaque conception architecturale prend en considération le climat qui regroupe un ensemble de facteurs influençant à la fois le bâtiment et l'occupant, à savoir par exemple, le soleil, le vent, la pluie...etc. Les stratégies bioclimatiques appliquées dans les climats froids ne sont pas les mêmes que celles appliquées dans les climats chauds. La lumière naturelle est l'un des principaux facteurs qu'il faut étudier et analyser pendant la phase d'esquisse du projet architectural, car elle varie en quantité et en qualité d'une région à une autre et d'un climat à un autre (le dimensionnement des ouvertures dépendra impérativement du climat).

L'Algérie se trouve dans une zone géographique caractérisée par un gisement solaire très important surtout dans sa partie saharienne. La ville de BISKRA présente l'une des régions sahariennes qui a un fort gisement lumineux ; elle est caractérisée par un climat chaud et sec et un taux d'ensoleillement très élevé, obligeant ainsi les habitants à recourir aux dispositifs d'ombrage pour réduire la pénétration directe des rayons du soleil pendant la période estivale, ce qui réduit par conséquent le niveau d'éclairage intérieur et augmente ainsi la consommation d'électricité pour l'éclairage. L'objectif de notre travail consiste à concevoir un dispositif spécifique au climat de la région qui améliorerait l'éclairage naturel et qui permettrait à la fois de bloquer la pénétration directe des rayons solaires excessifs et de diffuser la lumière naturelle à l'intérieur de l'espace. Pour cette raison, l'étude du climat lumineux et solaire de la ville devient nécessaire pour pouvoir établir un constat et une évaluation cartésienne et juste du phénomène

La première phase sera donc d'évaluer l'éclairage extérieur horaire, mensuel, annuel, horizontal et vertical en lux reçu à Biskra pour pouvoir établir une première estimation de l'éclairage intérieur. Le rapport entre ces deux éclairages nous permettra aussi d'évaluer l'efficacité du système light shelf dans la ville de Biskra.

I. Notions de base sur le climat

Le climat peut prendre plusieurs définitions ; il peut être défini comme un « ensemble des circonstances atmosphériques auxquelles est soumise une région géographique donnée ». Les facteurs climatiques ont un grand impact sur la construction et l'environnement urbain ainsi que dans la façon de vie des êtres humains. La détermination du climat est effectuée à l'aide de moyennes établies à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales. Ces facteurs climatiques peuvent être classés en trois catégories : des facteurs énergétiques (rayonnement solaire, lumière et température), des facteurs hydrauliques (précipitation et hygrométrie) et des facteurs mécaniques (vent par exemple). Pour étudier le climat d'une région, il faut faire intervenir les facteurs suivants :

- La température de l'air en °C, ce facteur doit être mesuré à l'ombre et à une hauteur de 1.2 m à 1.8 m au sol.
- L'humidité en %, qui représente la saturation de l'air en eau.
- Les radiations solaires en W/m².
- Le mouvement de l'air, soit le vent mesuré en m/s.
- Les précipitations, mesurées en mm.
- La nébulosité, mesurée en Octets.

La carte suivante indique les différents climats dans le monde :

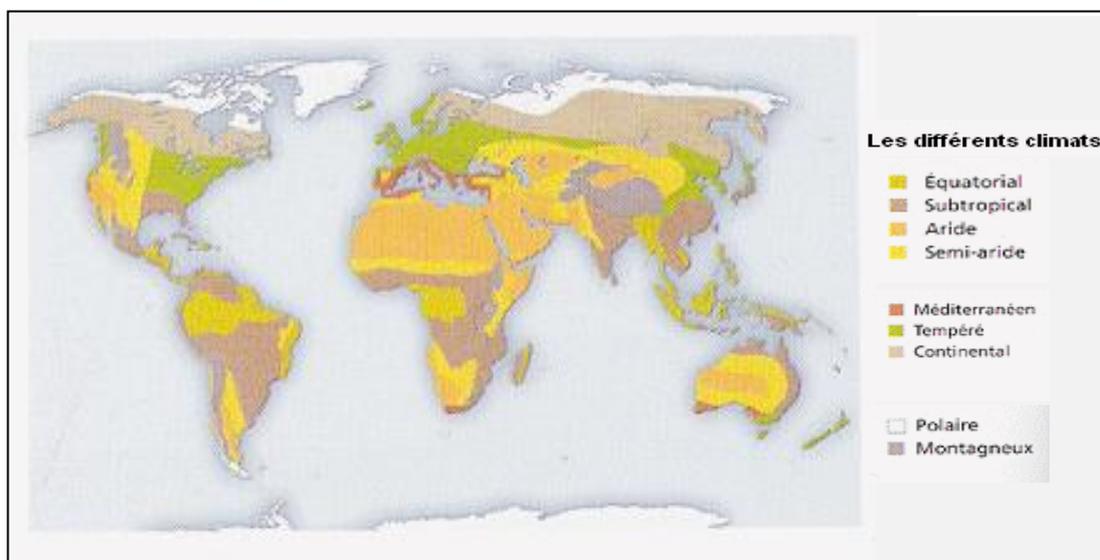


Figure 126 : Les différents climats dans le monde
(Source : <http://www.meteorologic.net/climat-monde.php>)

Il existe neuf climats qui caractérisent la surface de la terre, du climat polaire des hautes latitudes au climat équatorial de l'équateur : équatorial, subtropical, aride, semi-aride, méditerranéen, tempéré, continental, polaire et montagneux.

climat	Les caractéristiques
équatorial	il se caractérise par des températures élevées et des précipitations importantes pendant la plus grande partie de l'année. Le rayonnement solaire varie peu ou pas pendant l'année.
subtropical	il se caractérise par une saison sèche et une saison des pluies, ces deux saisons sont très marquées, les températures élevées durant toute l'année.
aride	il se caractérise par des températures très élevées en journée qui baisse la nuit et des précipitations.
semi-aride	Il se caractérise par des précipitations s'échelonnant de 250 à 500 mm, elles sont réparties inégalement dans une année et on distingue une saison des pluies et une saison sèche.
méditerranéen	Il se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Des épisodes de pluies très intenses peuvent avoir lieu en automne ou en hiver.
tempéré	Il se caractérise par des précipitations bien réparties tout au long de l'année et par quatre saisons bien distinctes.
continental	Il se caractérise par des saisons marquées par des écarts de température considérables ; ainsi, l'hiver souvent très froid succède à un été chaud. Les précipitations sont globalement faibles.
polaire	Il se caractérise par un hiver où on ne voit pratiquement pas le jour, les températures y sont très froides et la banquise se forme, les précipitations sont faibles tout au long de l'année, l'été est très frais et court.

Tableau 10 : Les différents climats dans le monde (Source : Auteur)

A partir du tableau précédent, on peut tirer quatre principaux climats dans le monde, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Type de climat	Les caractéristiques
Climat froid	Température inconfortable (très basse)
Climat modéré	Dissipation inadéquate de chaleur (soit une surchauffe ou un refroidissement)
Climat chaud et sec	Est appelé aussi désertique, caractérisé par une surchauffe
Climat chaud et humide	une surchauffe aggravée par l'humidité (le phénomène de rafraichissement par évaporation est limité)

Tableau 11 : Les quatre principaux climats dans le monde (Source : Auteur)

En Algérie, le climat est subdivisé en trois catégories :

-Le Tell : caractérisé par un climat tempéré de type méditerranéen.

- Les hautes plaines : caractérisées par un climat continental.

-Le sahara : caractérisé par un climat aride et sec. Notons que la notion d'aridité ne concerne pas les zones désertiques seulement mais elle touche toutes les régions ayant des précipitations rares ou irrégulières.

II. Les caractéristiques climatiques de la ville de BISKRA

II .1. Le climat dominant

La ville de Biskra est une ville Saharienne qui se situe au sud-est de l'Algérie ; elle occupe une superficie de 21.671 Km². Elle est caractérisée par un climat froid en hiver, chaud et sec en été. Les caractéristiques géographiques de la ville sont :

- La latitude = 34.48 N.
- La longitude = 5.44 N.
- L'altitude qui est égale à 128 m au dessus du niveau de la mer.

La ville de Biskra se caractérise par une température maximale en été qui atteint dans le mois de juillet 42°C et une température minimale en hiver qui atteint 7°C pendant le mois de janvier. La moyenne annuelle de la température est de 21.5°C.

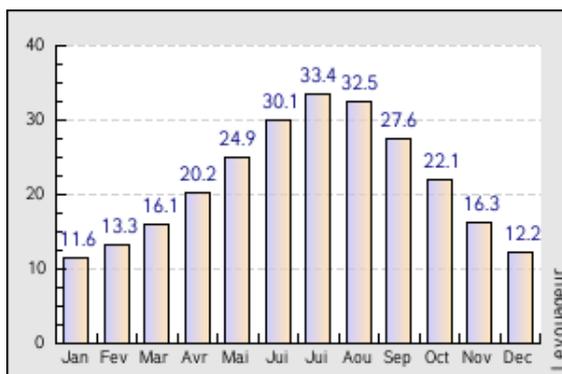


Figure 127 : la température moyenne (Source : <http://www.levoyageur.net/climat-ville-BISKRA.html>)

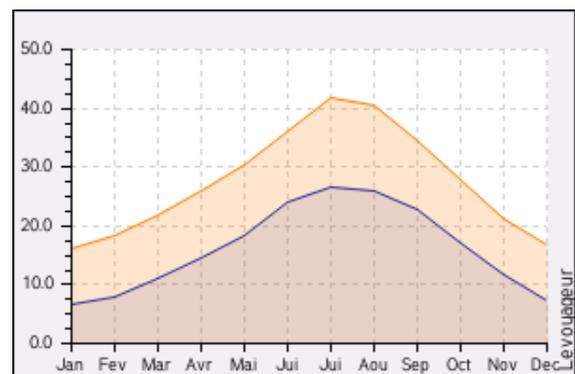


Figure 128 : La température minimale et maximale (Source : <http://www.levoyageur.net/climat-ville-BISKRA.html>)

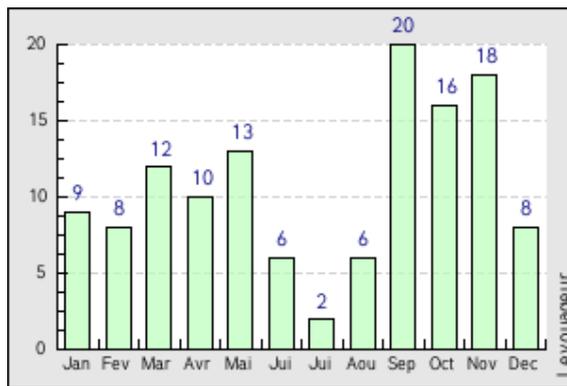


Figure 129 : la précipitation (mm) (Source : <http://www.levoyageur.net/climat-ville-BISKRA.htm>)

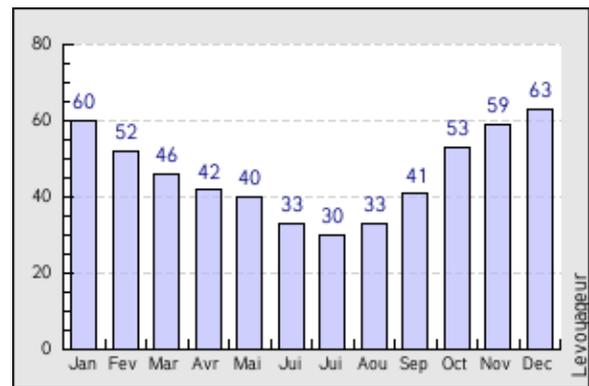


Figure 130 : L'humidité (Source : <http://www.levoyageur.net/climat-ville-BISKRA.htm>)

La précipitation moyenne annuelle est très faible, environ 8.8 mm. Elle atteint sa valeur maximale durant le mois de septembre (20mm). Les précipitations en été sont presque nulles (2 mm durant le mois de juillet). L'humidité moyenne annuelle est de 46%.

II .2. Les mois de confort à Biskra

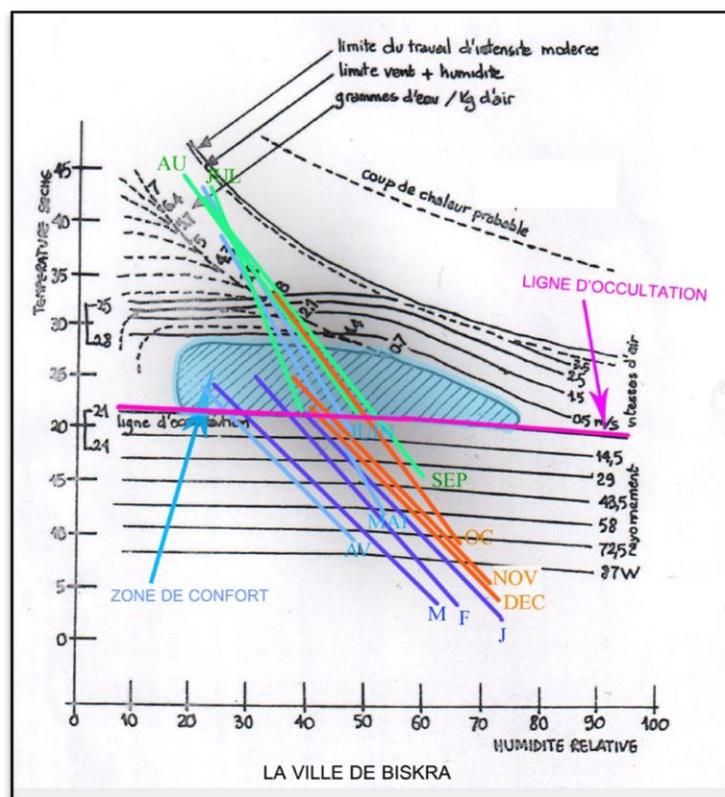


Tableau 131: Le diagramme de Olgay (Source : Auteur)

Le diagramme d'Olgay montre que la plupart des mois touchent seulement la zone de confort. Les mois d'hivers se trouvent sous la ligne d'occultation (besoin de chauffage) alors que les mois d'été nécessitent une occultation, car, ils se trouvent au dessus de la ligne. Le diagramme montre aussi que le climat de la ville de Biskra est relativement sec (les lignes des mois sont verticaux) et une grande différence de température entre le jour et la nuit.

II. 3. Le potentiel solaire

L'Agence spatiale allemande (ASA) et suite à une évaluation par satellites a conclu que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. La durée d'insolation, de l'ordre de 3500 heures/an est la plus importante au monde. Elle est toujours supérieure à 8 heures/jours. Pendant l'été, elle peut atteindre jusqu'à plus de 12 heures/jour au centre du Sahara. La carte suivante montre que l'Algérie se trouve dans une région dans laquelle l'ensoleillement direct moyen annuel excède 2000 kWh/m²/an. Ce qui nous intéresse le plus à ce stade, c'est la quantité du rayonnement solaire que reçoit la ville de Biskra au cours de toute l'année. La carte terrestre de l'ensoleillement moyen annuel indique que le potentiel reçu dans cette ville se trouve dans la fourchette de (5-6 kWh/m²/jour) et annuellement, compris entre 1825 et 2190 kWh/m²/an. La ville de Biskra possède ainsi un gisement solaire très important qui nécessite une exploitation rationnelle et durable.

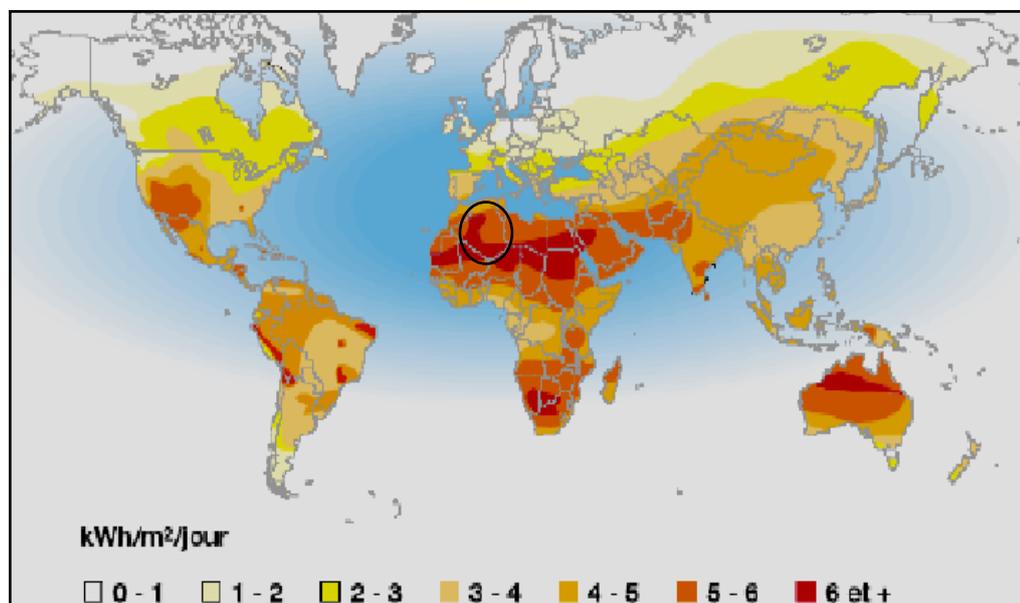


Figure 132 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel
(Source : Projet Maghreb – Europe : Production d'Hydrogène Solaire)

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien montre que le Sahara occupe une grande superficie du territoire et que l'ensoleillement annuel reçu est très important et atteint 2600 kWh/m²/an, ce qui le classe parmi les plus grands gisements solaires au monde.

Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique	Superficie (%)	Ensoleillement (h/an)	Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)
Région Littoral	4	2650	1700
Hauts Plateaux	10	3000	1900
Sahara	86	3500	2650

Tableau 12 : l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique
(Source : Projet Maghreb – Europe : Production d'Hydrogène Solaire)

II. 4. La couverture nuageuse

Il est important de comprendre le fonctionnement du système climatique y compris le rôle des nuages dans la détermination de la sensibilité du climat. Les nuages affectent le climat et à leur tour sont affectés par les évolutions climatiques. La relation est un système compliqué de rétroactions dans lequel les nuages modulent le bilan radiatif de la terre. Les nuages refroidissent la terre en réfléchissant la lumière solaire incidente et ils peuvent la réchauffer en absorbant la chaleur émise par la surface en la réémettant vers le bas (effet de serre) et à leur tour, ils sont eux-mêmes affectés par le réchauffement ou le refroidissement de la terre. Un autre objectif de cette étude est de déterminer le taux de couverture nuageuse moyen de la voûte céleste de la ville de Biskra et donc, connaître le type de ciel dominant au cours de l'année ce qui permettra de déterminer effectivement l'éclairement intérieur réel reçu sur une surface horizontale ou verticale.

II. 4. 1. Les stations météorologiques de mesure du taux de couverture nuageuse

Il existe deux types de stations météorologiques qui permettent la mesure du taux de la couverture nuageuse du ciel. On peut obtenir ces données soit, par les stations météorologiques de surveillance au sol ou par des données de satellites géostationnaires "le programme SSE de la NASA" (Surface Météorologique et de l'Energie Solaire) (<http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>). Les stations de mesure au sol se situent principalement

dans les pays développés. Elles ne donnent pas des valeurs précises à cause des problèmes inhérents à leur utilisation (conditions atmosphériques extérieurs). De plus, lors de l'enregistrement des données, les valeurs recueillies peuvent être sporadiques conduisant à des profils climatologiques incomplets. Contrairement aux mesures au sol, les données de la station SSE de la NASA sont plus précises car elles représentent la moyenne de 10 ans de collecte des données météorologiques qui sont recueillies par des stations qui couvrent la surface entière de la terre et sur une grille de 10 par 10 km (chaque grille est divisée en cellules). Cependant, il est important de noter que l'ensemble des données de la NASA n'est pas destiné à remplacer la qualité des données de mesure au sol mais de combler le vide là où les mesures au sol sont manquantes et d'élargir les zones où ces dernières existent. Les deux types de données sont complémentaires, les unes compensant les autres. L'ensemble des données et des cartes de la NASA peuvent déterminer les caractéristiques climatiques et permettent une estimation du potentiel des ressources énergétiques renouvelables qui peut être déterminé pour n'importe quel endroit du globe.

La couverture nuageuse fournie par les satellites de la NASA est de trois sortes:

- La quantité mensuelle moyenne de nuages qui est définie par la quantité de nuages durant le jour dans une région donnée (elle s'exprime en %).
- Les données mensuelles de la couverture liée au temps de mesure. Ces données seront utilisées pour dégager les équations qui calculent la fréquence des nuages.
- La nébulosité du ciel est classée selon trois degrés de la couverture nuageuse :
 - Clair (nébulosité <10%).
 - Partiellement nuageux (nébulosité comprise entre 10% -70%).
 - Couvert (> ou = nébulosité de 70%).

L'ensemble des données climatiques concernant les nuages fournies par le programme SSE de la NASA proviennent du projet international de climatologie satellitale des nuages (ISCCP) (<http://www.isccp.giss.nasa.gov>) qui a été créé en 1982 en soutien au Programme de Recherche sur le Climat Planétaire (WCRP) pour collecter et analyser les mesures de radiance satellitale et en déduire par la suite la distribution générale des nuages, leurs propriétés et leur variations journalières, saisonnières et interannuelles (Rossow et Schiffer 1991, Lu et Walker, 1991).

Ces données sont utilisées pour étudier le rôle des nuages sur le climat, à la fois leurs effets sur les échanges d'énergie radiative et leur rôle dans le cycle de l'eau (Brest et Rossow 1992). ISCCP a été un projet exceptionnellement utile. Il a fourni une archive satellitale extrêmement condensée qui reste manipulable, idéale pour les études du climat à long terme et permis des recherches qui n'auraient pas été possibles autrement dans ce domaine.

La couverture nuageuse globale qui comprend des facteurs comme la répartition, le type, l'épaisseur et l'altitude des nuages a une importante influence sur le climat et joue le rôle d'indicateur de l'évolution de celui-ci. Les satellites météorologiques sont les seuls capables de cartographier les configurations évolutives de la nébulosité et apportent donc une contribution vitale au Programme de Recherche sur le Climat Planétaire (WCRP).

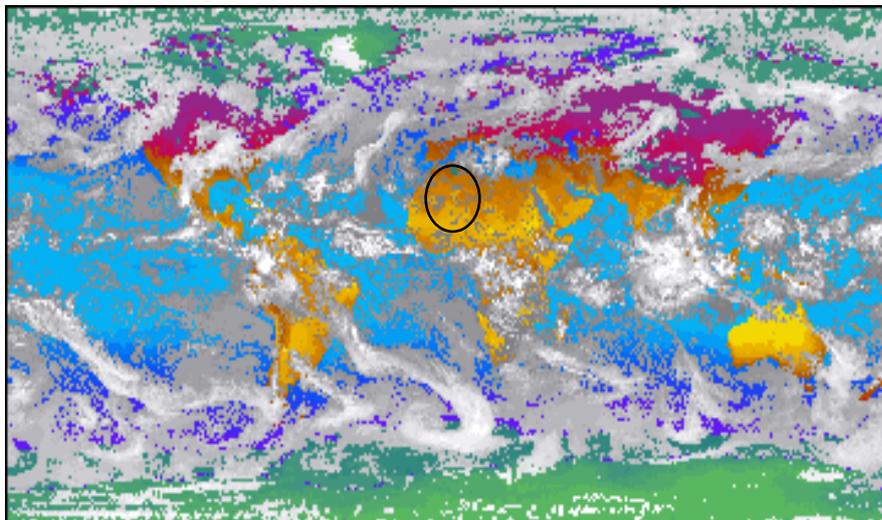


Figure 134 : Exemple de la configuration de nuage produite par ISCCP
(Source : Dr Zemmouri .N)

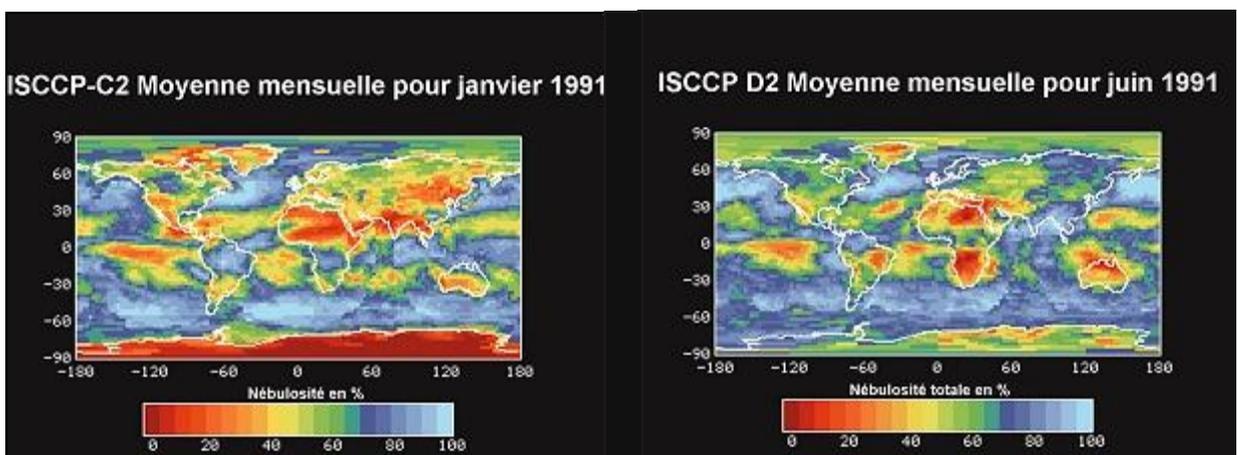


Figure 135 : Nébulosité moyenne pour janvier et juin 1991 extraite des séries de données ISCCP
(Source : Le Projet International Climatologie Satellitale des Nuages)

La détermination de la couverture nuageuse est basée sur la mesure de la quantité du rayonnement réfléchi vers l'espace. Cette quantité est une mesure de l'albédo planétaire (Sa valeur moyenne est de 30%) qui est le rapport de la quantité de lumière réfléchi par un objet sur la quantité de lumière qu'il reçoit. Il est inversement proportionnel à la couverture nuageuse du ciel. La configuration de nuage produite par ISCCP (figure 135) montre qu'en Algérie, le ciel n'est ni clair, ni couvert. A titre d'exemple, la nébulosité atteinte en 1991 en Algérie a été entre 20 et 30% en janvier et entre 35 et 55% en juin, ce qui indique que le ciel en Algérie est partiellement couvert (intermédiaire).

La carte suivante est produite par le logiciel "RETScreen" (logiciel de calcul des données climatiques) ; elle indique l'emplacement de toutes les stations de mesure dans le monde, les points rouges représentent l'emplacement des stations météorologiques au sol, tandis que les points bleus représentent l'emplacement des données satellite ou analysées mondiales de la NASA pour les régions peuplées. Les données de la NASA se trouvant dans la base de données climatique pour les endroits peuplés sur la terre. L'ensemble de ces points représente les endroits où il y a au moins 10 habitants selon les données de peuplement des Nations Unies. La base de données climatiques RETScreen contient les données météorologiques nécessaires au modèle. Le logiciel peut fournir des données climatiques en provenance des stations météorologiques de surveillance au sol ou des données satellitaires (NASA SSE).

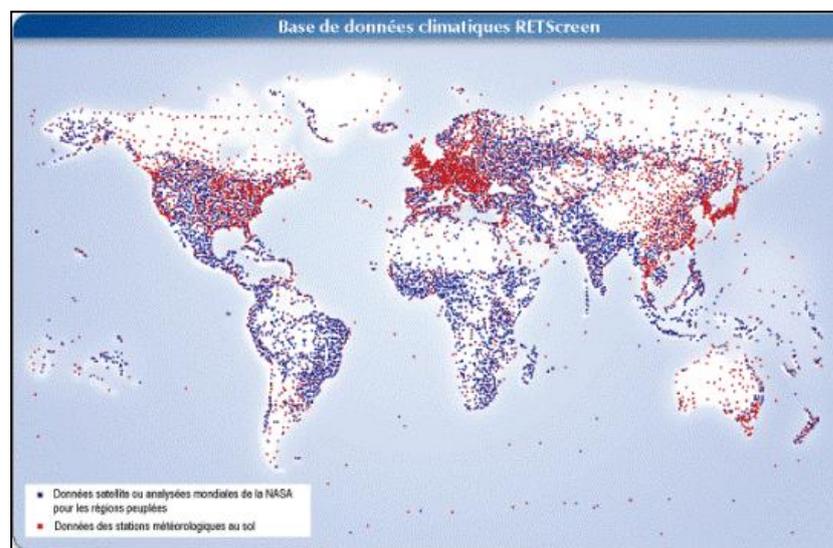


Figure 133 : Carte des données climatiques (Source : <http://www.retscreen.net/fr>)

Remarque : Bien que l'Algérie se trouve dans une zone de grand potentiel solaire, le nombre des stations de mesure reste insignifiant et elles sont implantées surtout au nord du pays.

II.4. 2. Le type de ciel dominant à BISKRA

La détermination du type de ciel dominant durant toute l'année à Biskra permettra de caractériser le climat de la ville de manière générale ainsi que le gisement solaire et l'éclairement lumineux, ce qui est l'un des objectifs principaux de cette recherche. Cette détermination se fait par le calcul de la couverture nuageuse qui représente la quantité des nuages dans une région donnée pendant la journée, ce taux est exprimé en pourcentage (%). La variation de cette couverture de 0 à 100% détermine le type de ciel : 0% indique un ciel clair, 100% un ciel couvert et entre 10 et 70% le ciel est intermédiaire. Les données représentées dans les tableaux suivants sont reprises des données satellitaires de la NASA qui donnent le taux de la couverture nuageuse annuelle moyenne à Biskra durant toute l'année et au cours de différentes heures de la journée.

Lat 34.48 Lon 5.44	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Auo	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne de 10 ans	52.5	53.6	55.9	54.3	55.0	47.1	31.3	35.0	41.4	56.3	56.0	52.2

Tableau 13 : Le taux de la couverture nuageuse (%)
(Source: NASA Surface meteorology and Solar Energy Data Set)

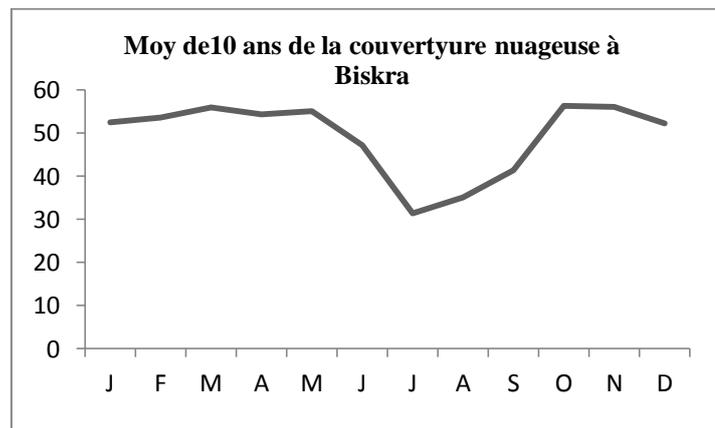


Figure 136 : Le taux de la couverture nuageuse (%)
(Source: Auteur)

Le tableau précédent indique que le taux de la couverture nuageuse à BISKRA au cours de toute l'année est compris entre 31.3% et 56%, avec une moyenne de 49,21%. Nous constatons aussi que pendant les mois de Janvier à Mars et d'Octobre à Décembre, le ciel est partiellement couvert (plus de 52% de couverture) alors que dans le reste de l'année, la

moyenne de la couverture est de 38,7%. Le graphe montre que le taux de la couverture du ciel est constant dans la période hivernale et un peu différent en été (10% de différence).

Donc, nous concluons que dans une moyenne de 10 ans, le type de ciel qui domine dans la ville de Biskra est intermédiaire, proche du clair.

Lat 34.48 Lon 5.44	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Auo	Sep	Oct	Nov	Dec
Moy@0	44.2	42.6	46.0	44.5	48.2	41.8	24.0	29.8	37.9	51.0	46.3	44.4
Moy @3	44.9	43.8	45.2	44.7	46.7	39.2	20.9	25.2	34.4	51.0	46.6	44.6
Moy @6	45.8	44.9	45.9	41.9	42.5	35.1	17.8	21.2	32.7	50.9	48.4	44.4
Moy @9	48.2	47.2	51.1	51.7	52.6	45.4	29.3	31.5	38.7	52.8	52.4	47.7
Moy @12	55.7	58.0	63.0	61.6	60.2	53.5	37.5	40.3	45.3	62.0	60.0	56.7
Moy @15	53.6	55.5	63.6	63.9	63.7	54.5	39.3	44.7	49.2	59.5	55.7	52.3
Moy @18	46.4	45.5	53.4	52.2	55.9	47.2	32.7	37.3	41.1	51.7	49.9	47.5
Moy @21	45.2	42.8	47.4	46.1	50.1	43.8	26.3	33.3	39.2	50.1	47.6	45.1

Tableau 14: Taux de la couverture nuageuse dans les différentes heures GMT (%)
(Source: NASA Surface meteorology and Solar Energy Data Set)

Il est clair que la moyenne annuelle de la couverture nuageuse du ciel aux différentes heures de la journée (de 0h à 21h) est de 45.78% ce qui indique que ciel est partiellement couvert. Ce taux est dépassé pendant certaines heures et peut atteindre les 60% (par exemple, dans le mois d'avril à 15h, la couverture du ciel est de 63.9%). Il se dégrade dans certains cas à 17% pendant le mois de Juillet à 6h.

Remarque : La période moyenne d'étude est située entre 9h et 18h.

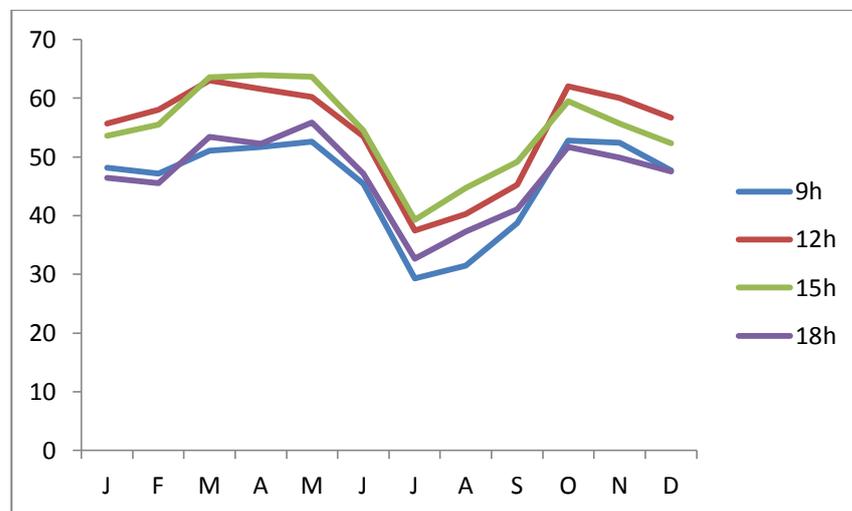


Figure137 : Le taux de la couverture nuageuse pendant les différentes heures GMT (%) (Source : Auteur)

L'heure	La couverture nuageuse annuelle
Moy @9	45.72 %
Moy @12	54.54 %
Moy @15	54.63 %
Moy @18	46.73 %

Tableau 15 : La moyenne de la couverture nuageuse pendant les différentes heures GMT (%) (Source : Auteur)

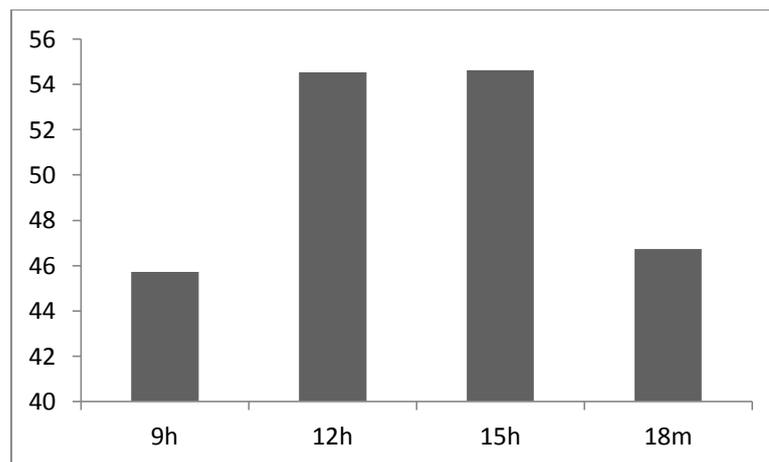


Figure 138 : La moyenne de la couverture nuageuse pendant les différentes heures GMT (%) (Source : Auteur)

A partir des figures et des tableaux précédents, nous pouvons tirer les constatations suivantes :

Pendant la journée, le taux de la couverture nuageuse diffère d'une heure à l'autre. Il est important à 12 h et à 15h (54.63%). Le taux de la couverture nuageuse moyenne annuelle qui concerne la période entre 9h et 18h est de 50.40%. De plus, ce taux est le même à 9h et 18h et identique également à 12h et 15h. Nous en concluons donc que le ciel dominant à Biskra est de type intermédiaire.

Comme il été déjà avancé, la détermination du type de ciel dominant à Biskra va nous aider à calculer le gisement solaire et lumineux. Il est nécessaire de tenir compte de la composante diffuse produite par la voute céleste pendant que le ciel est couvert, ainsi que de la composante directe du soleil dans les moments où le ciel est clair (pas de couverture nuageuse).

III. Le gisement solaire à Biskra

III. 1. La détermination du gisement solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre qui ne provoque pas d'émissions de gaz nocifs pour notre environnement. Elle se propage dans l'espace sous forme de photons, donc, elle est disponible partout et sans cesse renouvelable. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. L'objectif dans cette partie est de pouvoir déterminer le rayonnement solaire global reçu à Biskra.

III.1.1. Les données de METEONORM

"METEONORM" est une référence météorologique complète comprenant un catalogue de données météorologiques et des méthodes de calcul pour les applications solaires et la conception du système à n'importe quel endroit désiré dans le monde. Il est basé sur plus de 23 années d'expérience dans le développement de bases des données météorologiques pour les applications de l'énergie. Il regroupe plus de 20 stations de mesure à travers le monde. La carte suivante représente l'irradiation solaire globale et annuelle de toute l'Afrique. Nous remarquons que l'irradiation solaire dans la ville de Biskra atteint 2000 KWh/m².

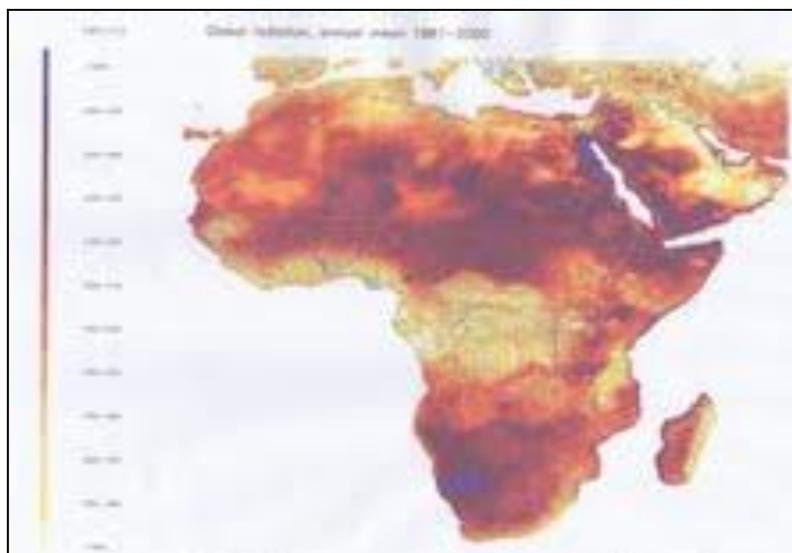


Figure 139 : Carte d'irradiation solaire globale annuelle tirée de METEONORM 1981-2000 (Source : www.meteonorm.com)

III.1.2. Les données du logiciel "NOOR 1.1"

Ce logiciel est un outil pédagogique d'évaluation de la lumière naturelle. Il aide les architectes à la conception car il permet d'avoir des renseignements sur le climat lumineux de n'importe quelle région du globe terrestre. Il calcule pour les trois types de ciel (clair, couvert et intermédiaire) la quantité de rayonnement solaire en W/m^2 , l'éclairement extérieur en lux ainsi que l'efficacité lumineuse. Ces valeurs varient selon les différentes heures du jour, de l'altitude et de l'azimut.

Le logiciel calcule l'irradiation solaire sur une surface plane ou inclinée du lever jusqu'au coucher du soleil pour chaque mois. Les données nécessaires au calcul sont : le nom de la région, la date (jour, mois, année), le temps, la latitude, la longitude, l'altitude, la nature de la région (rurale, urbaine, industrielle), l'angle d'inclinaison du plan et enfin le pourcentage de la couverture du ciel. Les résultats calculés sont ensuite affichés sous forme de tableau.

```

D:\LA THESE\Etude climatique\Fortr\NOUCHK1.exe
WELCOME TO MORE COMPUTER PROGRAM USED
IN THE GENERATION OF ILLUMINANCES ON
THE HORIZONTAL AND SLOPED PLANES
PLEASE ENTER THE OUTPUT FILE NAME
biskra 4

PLEASE ENTER THE LOCATION NAME
biskra

ENTER SUCCESSIVELY DAY,MONTH & YEAR
15,4,2010

ENTER THE STANDARD TIME LONGITUDE OF THE PLACE
1

ENTER LATITUDE AND LONGITUDE
34,5

ENTER NOW THE ALTITUDE OF THE PLACE ABOVE SEA LEVEL IN KM
0,1

ENTER THE TURBIDITY ZONE

1 STANDS FOR RURAL ZONE
2 STANDS FOR URBAN ZONE
3 STANDS FOR INDUSTRIAL ZONE
2

ENTER NOW THE SLOPE OF THE PLANE/HORIZONTAL IN dg
45

ENTER THE MEASURED PERCENTAGE OF SUNSHINE
CORRESPONDING TO THE GIUEN MONTH
54,3
    
```

Tableau 16 : Interface de logiciel « NOOR 1.1 » (Source : Auteur)

Le calcul du taux d'ensoleillement et d'éclairement sur des surfaces inclinées par ce logiciel va prendre en considération l'orientation du plan. Il suffit de lui donner l'inclinaison du plan en degrés, il va donner ensuite les résultats pour les orientations suivantes : nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest, nord-ouest.

Le tableau suivant donne la quantité mensuelle du rayonnement solaire reçu à Biskra en KW/m². La période ciblée dans notre recherche est celle comprise entre 9h et 16.

Heure Mois	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier			64.210	212.21	352.07	453.95	504.80	500.13	440.30	330.86	186.93			
Février			120.42	293.40	449.93	562.80	620.74	620.74	562.80	449.93	293.40	120.42		
Mars		54.36	233.01	426.42	588.95	698.88	749.96	745.42	684.65	565.14	395.46	200.49		
Avril	14.95	164.21	360.79	547.20	690.09	771.71	797.58	790.83	741.31	630.31	464.02	267.51	83.96	
Mai	74.26	247.42	444.36	619.99	734.30	793.78	789.73	795.10	772.66	677.07	519.11	326.30	137.00	7.32
Juin	83.79	235.61	404.23	553.63	656.71	692.20	672.35	684.17	684.76	615.95	488.13	326.05	160.01	31.44
Juillet	50.24	158.44	281.76	393.66	474.79	510.45	505.79	509.09	504.97	454.69	362.53	244.94	122.95	25.56
Aout	21.52	131.25	268.74	398.29	496.98	550.87	564.28	562.99	539.71	471.63	361.81	226.99	93.44	
Sept		99.72	251.87	400.30	516.90	588.40	615.10	603.99	551.22	451.78	313.68	158.38	26.65	
Octobre		63.26	236.68	416.38	560.72	651.22	682.67	655.16	568.54	427.40	249.09	73.26		
Nov		8.12	145.60	308.22	444.98	533.24	564.03	535.21	448.78	313.37	151.02	11.21		
Déc			76.69	218.30	346.56	434.99	472.27	454.91	384.44	268.73	127.50	5.67		

Tableau 17 : Valeurs de rayonnements solaires obtenus par logiciel "NOOR 1.1"
(Source : Auteur)

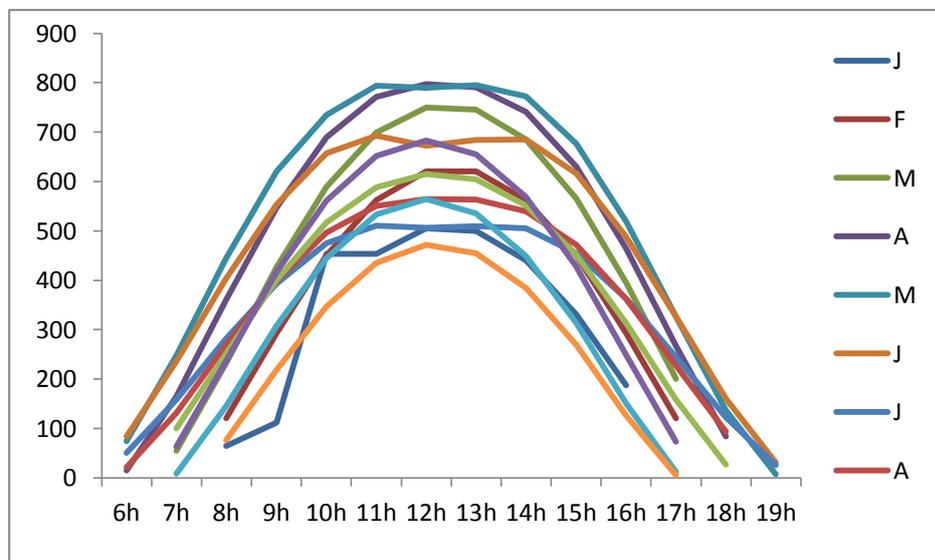


Tableau 140: Valeurs de rayonnements solaires obtenus par logiciel "NOOR 1.1"
(Source : Auteur)

Nous remarquons qu'au cours de l'année, le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale vers midi et avec des valeurs minimales au lever et au coucher du soleil. Les quantités de rayonnement reçues en début de journée et pendant l'après midi sont presque équivalentes (la quantité reçue à 9h est très proche de celle reçue à 16h). Cette valeur maximale est atteinte pendant les mois d'avril et mai de 9h jusqu'à 15h et la quantité de rayonnement est de 797.58 kW/m². Pendant les mois de janvier et décembre, la quantité reçue est moindre à cause de la faible hauteur du soleil. Nous constatons aussi que le nombre d'heures d'insolation journalière dans la ville de Biskra est important ; il est supérieur à 9 h et atteint pendant les mois chauds 14 heures d'exposition au soleil.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Nombre d'heure d'insolation	9	10	11	13	14	14	14	13	12	11	11	10

Tableau 18 : Nombre d'heure d'insolation (Source : Auteur)

Le graphe suivant donne la quantité de rayonnement solaire reçue sur une surface horizontale à Biskra le 15 Avril 2010 par le logiciel NOOR 1.1. Nous remarquons que cette quantité atteint 797.58W/m² à midi

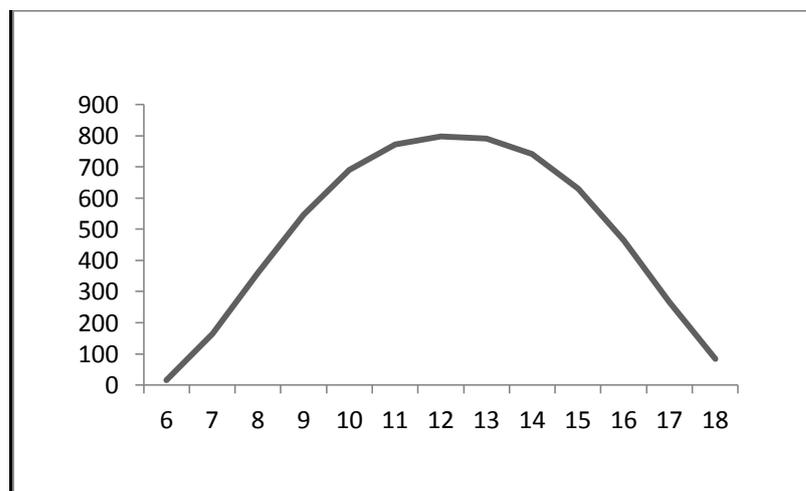


Figure 141 : Courbe de rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale à Biskra le 15 avril 2010 par le logiciel "NOOR 1.1" (Source : Auteur)

Pour confirmer la validité de ce logiciel nous allons procéder à une étude comparative entre les résultats obtenus par une application de laboratoire de génie mécanique en plus des

résultats d'une journée d'expérimentation et de mesure entreprise sur le site de l'université de Biskra le mois d'avril 2009. Nous avons pris le mois d'avril comme mois de comparaison (mois représentatif), car ce mois ne représente pas les cas extrêmes, il se trouve dans la mi-saison et nous recevons au cours de ce mois une quantité importante de rayonnement solaire.

III.1.3. Données de l'application de laboratoire de génie mécanique

Ce logiciel a été réalisé par un groupe de chercheurs dans le laboratoire de génie mécanique à l'université de Biskra. L'objectif principal de ce logiciel est de calculer la quantité de rayonnement solaire à Biskra pour pouvoir estimer la quantité d'énergie reçue par les capteurs solaires. Il suffit de choisir le jour, le mois le type de ciel, la latitude du lieu et l'angle de déclinaison. Les résultats obtenus vont donner les valeurs de rayonnement global, direct, diffus et réfléchi sous forme de graphe. Ce logiciel ne prend malheureusement pas en considération l'orientation.

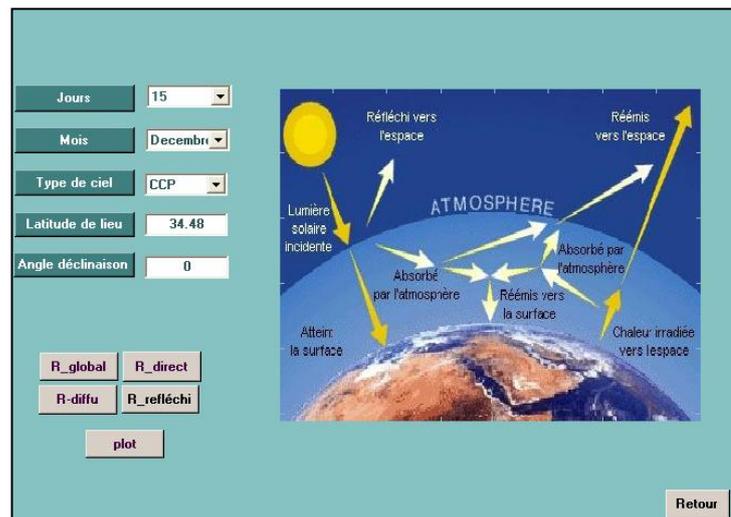


Figure 142: Interface graphique de l'application de génie mécanique
(Source : Auteur)

Le tableau et le graphe suivants nous donnent le rayonnement solaire global, direct et diffus reçu sur une surface horizontale à Biskra le 15 avril sous un ciel intermédiaire. Nous constatons que la quantité de rayonnement solaire global est minime au lever et au coucher du soleil avec des valeurs maximales à midi qui atteignent 970 KW/m². Nous remarquons aussi que la quantité de rayonnement direct reçue est plus grande que la quantité de rayonnement diffus, du essentiellement à la clarté du ciel.

Heure	Rayonnement global	Rayonnement direct	Rayonnement diffus
6	65	15	50
7	240	160	80
8	480	395	85
9	635	575	60
10	820	750	70
11	915	800	115
12	970	830	140
13	915	800	115
14	820	750	70
15	635	575	60
16	385	385	85
17	240	160	80
18	65	15	50

Tableau 19: Valeurs de rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal à Biskra le 15 avril par l'application de génie mécanique (Source : Auteur)

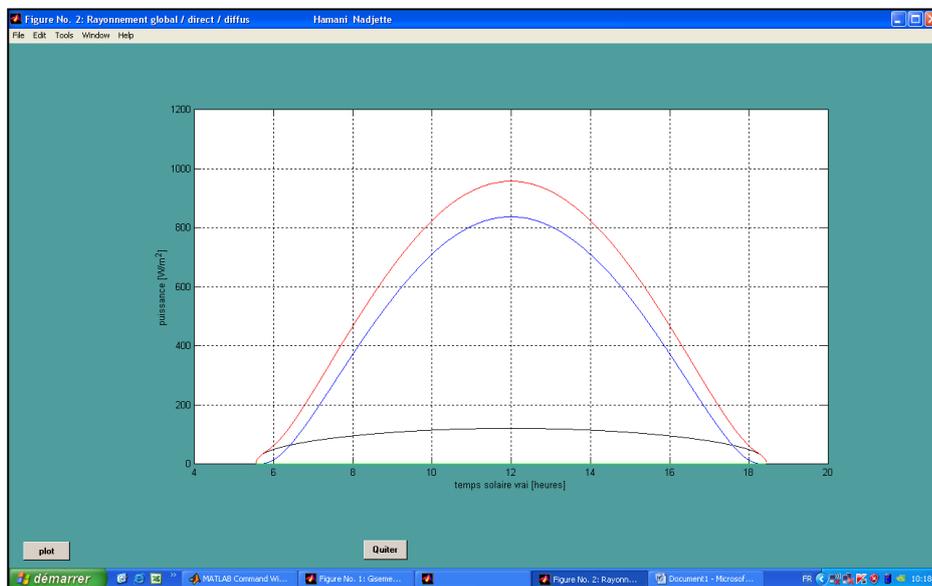


Figure 143: Courbe de rayonnement solaire global, direct et diffus reçu sur une surface horizontale à Biskra pour le 15 avril (Source : Auteur)

III.1.4. Données de la journée expérimentale et de mesure

Les mesures se sont déroulées le 04 avril 2009 à Biskra sous un ciel intermédiaire proche de clair et nous avons pu mesurer le rayonnement en utilisant un pyranomètre (instrument de mesure de rayonnement solaire). L'objectif de cette expérience était de mesurer la quantité du rayonnement global reçue sur une surface horizontale et inclinée pour pouvoir calculer par la

suite le rendement du capteur solaire en ce jour. Ce rendement atteint 72% dans les moments où le capteur reçoit une grande quantité de rayonnement avec une moyenne de 53,98%.

Les résultats de cette étude expérimentale sont donnés dans le tableau suivant :

Heure	T am [° C]	T e [° C]	T s [° C]	T m [° C]	Ig-hor [W/m ²]	Ig-incliné [W/m ²]
12H00	21,800	27	67	47,000	780	837
12H15	21,800	28	65	46,500	800	840
12H30	21,800	28	64	46,000	800	848
12H45	21,800	29	63	46,000	800	847
13H00	21,800	29	60	44,500	700	842
13H15	21,800	30	59	44,500	790	832
13H30	21,800	31	58	44,500	800	822
13H45	21,800	32	57	44,500	780	801

Tableau 20 : Valeurs de rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale à Biskra le 04 avril (Source : Auteur)

Tam: Température ambiante [°c].

Te: Température à l'entrée du capteur [°c].

Ts: Température à la sortie de capteur [°c].

Tm: Température moyenne [°c].

Ig hor: Rayonnement global horizontal [W/m²].

Ig incliné: Rayonnement global incliné [W/m²].

Nous remarquons dans ce tableau que la valeur de rayonnement solaire reçue sur une surface horizontale et inclinée n'est pas constante et varie sur des périodes de 15 minutes avec un écart de 100W/m². La quantité de rayonnement reçue horizontalement à midi à Biskra est de 780 W/m² sous un ciel intermédiaire.

III.1.5. Comparaison des résultats

Heure	Résultats de logiciel N00R 1.1	Résultats de logiciel	Résultats de l'expérimentale
6	14.95	65	-
7	164.21	240	-
8	360.79	480	-
9	690.09	635	-
10	771.71	820	-
11	915	915	-
12	797.58	970	780
13	790.83	915	800
14	741.31	820	-
15	630.31	635	-
16	464.02	385	-
17	267.51	240	-
18	83.96	65	-

Tableau 21 : Valeurs du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal à Biskra pendant le mois d'avril pour les trois données (Source : Auteur)

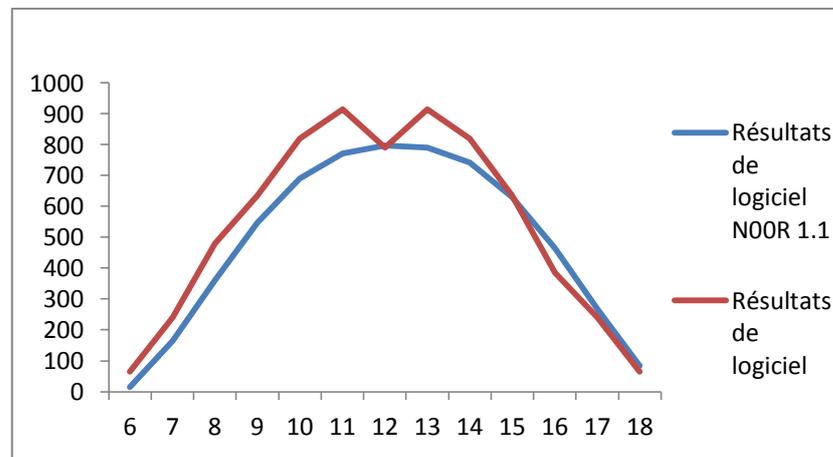


Figure 144: Valeurs de rayonnement solaire obtenu par les deux logiciels données (Source : Auteur)

Après la comparaison des résultats des trois outils qui ont été utilisés pour le calcul de l'irradiations solaire, nous remarquons qu'ils donnent des valeurs de rayonnement solaire très proches surtout à midi ou la différence est presque négligeable entre le logiciel "NOOR 1.1" et la journée expérimentale avec un écart de 17 W/m² seulement, alors qu'entre le logiciel "NOOR 1.1" et l'application de génie mécanique, l'écart est plus grand et de l'ordre de 173 W/m².

Pour la prédétermination et le calcul de l'éclairage extérieur dans la ville de Biskra, nous allons utiliser le logiciel "NOOR 1.1", car il est valable et donne des résultats exacts.

IV. La détermination de l'éclairage extérieur

IV.1. L'éclairage extérieur global

Heure Mois	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier			4514	17034	31515	43024	49039	48172	41384	29133	14559			
Février			8850	25302	42701	55612	62349	62349	55612	42701	25302	8850		
Mars		4107	19459	40000	58839	70961	76821	76350	69511	56010	36528	16320		
Avril	1403	13470	33742	54560	70430	79619	82560	81760	76387	63801	45272	23531	6685	
Mai	6134	21911	43235	62949	76806	82640	82912	83108	80028	69294	51563	30095	11324	762
Juin	7179	21500	39994	57021	68314	72708	71585	72426	71533	63946	49583	31287	14020	2924
Juillet	4661	14858	28323	40858	49980	54152	54266	54459	53409	47815	37418	24121	11316	2524
Aout	2108	11749	26159	40822	51960	57839	59578	59363	56573	48956	36635	21666	8234	
Sept		8281	23190	39765	53157	61011	63863	62669	56693	45817	29963	13639	2391	
Octobre		4821	19820	39141	55626	65618	69353	66014	56349	40149	21167	5530		
Nov		724	10945	26554	41879	51818	55252	52008	41130	27231	11419	968		
Déc			5518	17757	31121	40974	45205	43192	35361	22859	9504	520		

Tableau 22 : Valeurs de l'éclairage extérieur global annuel reçu à Biskra le 15 avril sur une surface horizontale
(Source : Auteur)

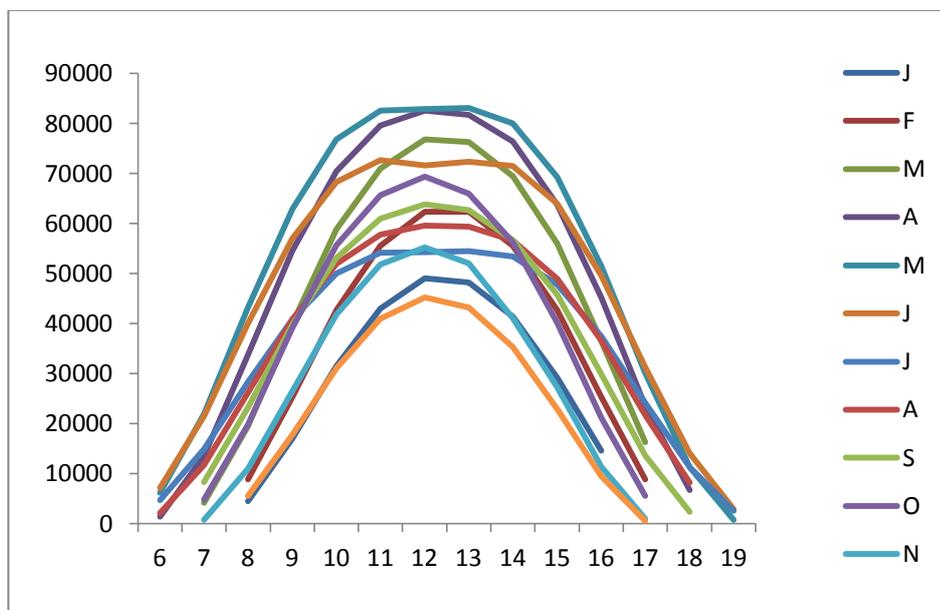


Figure 145 : Valeurs de l'éclairage extérieur global annuel reçu à Biskra le 15 avril sur une surface horizontale
(Source : Auteur)

A partir du tableau et du graphe, nous remarquons que la quantité d'éclairage extérieur global reçue à Biskra diffère d'un mois à l'autre. Nous distinguons trois périodes : la première qui regroupe les mois de janvier, février, Novembre et décembre est celle qui reçoit la quantité d'éclairage la plus faible ; celle de juillet, août, septembre et octobre reçoit une quantité moyenne d'éclairage alors que la dernière qui comprend les mois de mars, avril, mai et juin reçoit la plus grande quantité d'éclairage qui atteint 82000lux. D'autre part, l'éclairage diffère aussi d'une heure à l'autre :

De 6 h à 7h : L'éclairage extérieur global est relativement faible et compris entre 724 et 21911 lux.

De 8 h à 17h : L'éclairage extérieur global est relativement fort et atteint 83108 lux.

De 18 h à 19h : L'éclairage extérieur global est relativement faible et se situe entre 14020 et 762 lux.

Nous en concluons que la quantité d'éclairage extérieur reçue dans la ville de Biskra durant toute l'année est proportionnelle à la quantité de rayonnement solaire. Un maximum est atteint au niveau de la mi-journée (midi) et un minimum au lever et coucher du soleil.

IV. 2. L'éclairage extérieur direct

Heure Mois	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier			1656	11350	23887	34008	39297	38498	32559	21790	9264			
Février			4567	18293	33576	44841	50630	50630	44841	33576	18293	4567		
Mars		1171	12736	30562	46996	57067	61678	61330	55920	44550	27514	10113		
Avril	105	7140	24093	41958	54837	61022	61952	61841	59164	49618	34041	15333	2354	
Mai	1807	13466	31600	48135	58343	59771	56592	58500	59879	53104	38685	20331	5147	25
Juin	2204	12521	27700	41423	48959	48680	43241	45762	49804	46436	35553	20509	6762	352
Juillet	826	6722	16549	25681	31407	31977	29039	29928	32332	30275	23251	13402	4372	206
Aout	161	4963	15629	26941	34868	37638	37142	37393	37276	32820	23737	12197	2738	
Sept		3196	14395	27900	38560	44161	45827	45168	32819	21894	19894	6941	291	
Octobre		1501	12868	29659	44065	52526	55648	52849	44710	30517	14026	1899		
Nov		53	6107	19311	32883	41637	44632	41799	33184	19921	6484	90		
Déc			2210	11761	23301	31930	35629	33865	27020	16122	5060	31		

Tableau 23 : Valeurs de l'éclairage extérieur direct reçu à Biskra le 15 avril sur une surface horizontale (Source : Auteur)

IV. 3. L'éclairage extérieur diffus

Heure Mois	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier			2858	5684	7628	9016	9742	9674	8826	7343	5296			
Février			4273	7009	9125	10771	11719	11719	10771	9125	7009	4273		
Mars		2936	6723	9438	11843	13894	15144	15019	13591	11486	9013	6207		
Avril	1299	6329	9649	12602	15594	18597	20608	19919	17222	14184	11231	8198	4332	
Mai	4328	8445	11635	14813	18463	22869	26321	24609	20149	16190	12879	9763	6177	737
Juin	4975	8980	12294	15598	19355	24028	28344	26664	21729	17511	14030	10778	7258	2572
Juillet	3835	8136	11774	15177	18574	22175	25227	24531	21076	17540	14167	10720	6944	2318
Aout	1947	6787	10530	13882	17093	20202	22436	21970	19296	16137	12898	9469	5496	
Sept		5085	8796	11864	14597	16850	18036	17500	15577	12998	10068	6697	2101	
Octobre		3320	6952	9452	11561	13092	13705	13166	11684	9633	7141	3631		
Nov		671	4838	7243	8996	10181	10620	10209	9046	7310	4935	878		
Déc			3308	5996	7820	9044	9576	9327	8341	6737	4444	489		

Tableau 24 : Valeurs l'éclairage extérieur diffus reçu à Biskra le 15 avril sur une surface horizontale
(Source : Auteur)

L'éclairage extérieur global reçu sur un plan horizontal à Biskra est la somme d'un éclairage direct qui est dû au soleil et d'un éclairage diffus qui est dû au ciel. La quantité d'éclairage directe est plus grande que celle de l'éclairage diffus ; cela est dû à la nature du ciel qui est intermédiaire et proche du clair ou la composante diffuse est très faible.

Remarque : il est à noter qu'au cours de la simulation nous avons travaillé sur les valeurs d'éclairage extérieur global concernant la période de 9h à 16h, ce qui permettra d'évaluer l'efficacité du système light shelf. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 22.

Conclusion

La situation géographique du Sahara algérien lui permet de bénéficier d'un potentiel solaire très important qui excède 2190 KW/m^2 par an ; elle est parmi les régions les plus ensoleillées dans le monde avec 14 heures d'insolation par jour et la quantité moyenne de rayonnement solaire atteint 797.58 KW/m^2 . Une utilisation durable de ce potentiel permettra de répondre en grande partie à la demande du bâtiment en termes d'éclairage, de chauffage, de climatisation...etc. La présente recherche montre aussi que cette ville est caractérisée par un ciel intermédiaire proche du clair avec une couverture nuageuse moyenne annuelle de 49.21%. Ces caractéristiques climatiques permettent à cette ville de recevoir un important gisement lumineux qui atteint dans certains mois la valeur de 83100 lux, comme par exemple, le mois de mai. Plusieurs logiciels de calcul des données climatiques ont été développés, tels que le logiciel RETScreen, Météonorm, NOOR 1.1...etc. Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel NOOR 1.1 qui nous a permis de calculer le gisement solaire, l'éclairement lumineux global, direct et diffus durant toute l'année, ce qui est l'objectif principal dans cette partie.

Généralement l'éclairement des espaces intérieurs se fait à travers les fenêtres. Mais pendant les périodes extrêmes, elles peuvent être une source d'inconfort visuel et thermique ce qui nous conduit à l'utilisation de l'éclairage électrique pendant le jour pour couvrir nos besoins en éclairage. L'utilisation du système light shelf est l'une des solutions à ce problème, car il permet d'éclairer et de protéger au même temps les ouvertures et réduire les besoins en éclairage électrique. Dans la ville de Biskra, l'utilisation de ce système d'éclairage naturel reste limitée car peu d'études ont été faites pour l'étudier et le simuler dans l'espace architectural.

Il est clair que la ville de Biskra est caractérisée par un gisement solaire et potentiel lumineux important. Ce fort niveau d'éclairement doit être utilisé de manière intelligente et durable pour pouvoir répondre aux besoins quantitatifs et qualitatifs de l'occupant tout en protégeant le bâtiment et l'environnement. La simulation par des logiciels d'éclairage ou l'expérimentation à l'aide d'un modèle réduit sont des moyens qui nous aident à étudier l'éclairage naturel et à concevoir un système d'éclairage qui correspond au niveau du gisement lumineux de la ville de Biskra.

Conclusion générale

La lumière a occupé au cours de l'histoire de l'architecture une place importante et était une source d'inspiration pour les différentes civilisations et tendances architecturales. Grace à cet aspect physique, nous sommes capables de percevoir le monde qui nous entoure et particulièrement l'objet architectural. Elle transforme le bâtiment de l'extérieur et influence à son tour à l'espace l'intérieur ce qui lui donne plusieurs lectures suivant le changement du temps. La lumière se regroupe avec le temps pour former la quatrième dimension. La lumière est indissociable de l'architecture ; elle définit chaque espace dans son rapport avec l'extérieur, elle révèle les formes, les volumes, les textures, les couleurs, les matières, etc... et permet d'approcher des notions de choix de matériaux, d'implantation, d'usage, d'ambiances, de symbolisme et touche même la notion de développement durable. La lumière doit répondre à un sentiment de confort et à des usages multiples. Elle a un impact sur la productivité et le psycho-physiologique de l'occupant ; c'est pour cette raison que les physiologistes et les ergonomes devraient étudier et déterminer les conditions favorables de la lumière et de la couleur à chaque espace. La combinaison de l'éclairage, le contraste de luminance, la couleur de la lumière, la reproduction des couleurs ou leurs choix sont les éléments qui déterminent le confort visuel et l'ambiance lumineuse et la négligence de l'un ou de plusieurs éléments de cet ensemble peut conduire à l'inconfort visuel. La lecture de l'espace architectural ne peut être faite par la conception d'une forme seulement sans l'introduction de la lumière. Elle permet selon le temps de donner plusieurs sens à un seul espace ce qui apporte à chaque fois une ambiance lumineuse différente et son évaluation reste subjective ; elle peut être une sensation d'ouverture, de grandeur, de gaieté, de tristesse, etc... L'architecture a la capacité de modeler et moduler les qualités de lumière entrant dans l'espace intérieur et même l'ombre apportée. Donc, la lumière va partager son rôle avec l'espace pour créer des ambiances lumineuses différentes.

Du point de vue de la durabilité, la lumière du jour constitue une ressource naturelle, propre et inépuisable. Pour cela, elle est devenue un élément principal dans la conception architecturale surtout dans la phase d'esquisse que l'architecte doit utiliser de manière intelligente et appropriée afin d'assurer le confort visuel, d'accroître le facteur de productivité d'un espace, d'améliorer considérablement son esthétisme et réduire la

consommation d'énergie, alors qu'une mauvaise utilisation de cette lumière va conduire à l'inconfort, ce qui annule les bienfaits qu'elle peut offrir.

Parmi les sources d'inconfort les plus gênants, il y a l'éblouissement. Ce phénomène apporte la sensation d'inconfort et diminue l'acuité visuelle ; il se produit par la pénétration directe de la lumière du soleil dans l'espace. Dans certaines situations, l'éblouissement peut être un objectif recherché, mais généralement, les architectes cherchent à l'éviter par le recours à des systèmes de modélisation de la lumière naturelle sans cacher la fenêtre et réduire le niveau d'éclairement de l'espace. Ces nouveaux systèmes d'éclairage sont connus sous le nom des conduits de lumière. Le système light shelf est un type de conduit de lumière qui a une large utilisation dans les pays du Nord. Ce système est un dispositif d'éclairage et de protection installé au niveau des fenêtres à une hauteur de 2 m ou plus, qui grâce à la réflexion de sa partie supérieure, transmet la lumière plus profondément afin d'éclairer les zones éloignées de la fenêtre. Il permet à la fois d'éclairer la pièce de manière efficace, d'avoir une uniformité de l'éclairement dans l'espace, de réduire de manière considérable l'effet de l'éblouissement, d'empêcher la pénétration des rayons solaires pendant l'été surtout dans les climats chauds, ce qui réduit le risque de la surchauffe et fait des économies d'énergie qui peuvent être supérieures à 50%. Cette véritable économie résulte de l'augmentation de niveau de l'éclairement dans le local qui est du à la réflexion du système light shelf ainsi que la diffusion du plafond. Il existe plusieurs configurations de ce système ; il peut être intérieur ou extérieur, droit ou incliné et parfois mixte. Chaque type correspond à un climat lumineux particulier. Pour cela, avant d'installer un type du système light shelf, il faut tout d'abord connaître le climat de la région considérée, le type de ciel dominant, chercher l'éclairement extérieur pour pouvoir calculer l'éclairement intérieur. Une étude bien approfondie sur le climat lumineux permet de connaître l'efficacité et le rendement de ce système afin d'assurer un confort visuel et thermique et éviter tous les problèmes qui peuvent être causés par un mauvais choix du système light shelf qui est le résultat d'une mauvaise détermination du climat lumineux.

Dans les climats chauds, le taux d'ensoleillement est très important, surtout en été et en automne. Le Sahara algérien est caractérisé par un potentiel solaire très important qui excède 2 190 KW/m² par an ; il est parmi les régions les plus ensoleillées dans le monde. La ville de Biskra appartient à cette région avec un gisement solaire et lumineux très élevé, avec 14 heures d'insolation par jour et une quantité de rayonnement solaire qui atteint 797.58 KW/m². L'exploitation intelligente de cette lumière dans le bâtiment peut couvrir

tous les besoins d'éclairage sans le recours à l'électricité pendant le jour. L'introduction du système light shelf est l'une des solutions innovantes pour une meilleure conception d'éclairage dans la ville de Biskra car, il permet d'éclairer et de protéger le bâtiment des pénétrations excessives de la lumière sans recourir à l'éclairage électrique ; mais malheureusement, son utilisation reste limitée, car peu d'études ont été faites pour caractériser le climat lumineux de la ville d'une part et de simuler le système light shelf dans l'espace architectural, d'autre part. Notre recherche sur le climat lumineux de cette ville montre qu'elle est caractérisée par un ciel intermédiaire proche de clair avec une couverture nuageuse dont la moyenne annuelle est de 49.21% et par un gisement solaire et lumineux très élevé. L'évaluation de la quantité d'éclairement extérieur que reçoit la ville de Biskra a été faite par deux : logiciels NOOR 1.1 et logiciel du génie mécanique ainsi que des données de la journée d'expérimentation et de mesure. Cette étude a montré que la ville reçoit un éclairement très fort qui atteint dans le mois de mai 83108 lux. L'utilisation du système light shelf permet une exploitation intelligente et durable de ce fort éclairement.

Les outils de prédétermination de la lumière naturelle jouent un rôle majeur dans le processus de la conception de l'éclairage naturel en tant que moyens de vérification et d'aide à la prise de décision. La prédétermination de l'éclairage peut se faire grâce à quatre outils : les mesures sur site, les méthodes simplifiées, les simulations à l'aide des logiciels et les modèles réduits. Actuellement, et après le développement que connaît le domaine de l'informatique, il existe plusieurs logiciels spécialisés en éclairage des bâtiments ; ces logiciels sont faciles à exécuter et donnent de bons résultats. Pour cela, et dans le but de faire une investigation exhaustive sur les types de système light shelf et choisir la configuration la plus adéquate au climat lumineux de la ville de Biskra, nous avons recouru à la simulation informatisée à l'aide de "Ecotect v5.5". Cette simulation regroupe deux expériences : la première consiste à utiliser un modèle sans système light shelf (modèle de référence) et dans la deuxième simulation, nous avons ajouté un light shelf de type droit intérieur à la fenêtre.

Les résultats ont montré que le système light shelf a amélioré le rendement de la fenêtre car, il augmente le niveau d'éclairement dans tout le local, surtout au fond où les valeurs ont été doublées ce qui permet d'avoir seulement deux zones ayant un éclairement différent (dans certaines configurations : intérieur-extérieur et incliné) au lieu de quatre (cas du modèle de référence). Cette simulation a montré aussi, que ce système n'a aucune

influence sur l'orientation et l'orientation nord reste toujours la meilleure en termes de quantité de lumière ainsi que de l'uniformité de l'éclairage. Sachant que la largeur du système influence son rendement, plus le système est large, plus il transmet plus profondément la lumière mais cette largeur peut causer une gêne pour l'utilisation de l'espace. De plus, le plafond incliné donne des résultats meilleurs que le plafond droit.

Une deuxième simulation a été proposée pour comparer le rendement de chaque configuration du système light shelf afin de choisir le type le plus performant qui s'adapte le mieux au climat lumineux. Cette simulation nous a permis de tirer les meilleures configurations : intérieur, intérieur-extérieur, incliné vers l'intérieur et incliné vers l'extérieur ; alors que le type extérieur était exclu car, il n'a pas donné de bons résultats du fait que l'éclairage au fond de l'espace reste faible et augmente l'éblouissement. Le type intérieur augmente le niveau d'éclairage mais il augmente aussi le risque d'éblouissement. Le type incliné, soit vers l'intérieur ou vers l'extérieur, donne des résultats très proches en termes d'éclairage apporté au fond du local (729.73 et 729.82 lux) et de la largeur de la zone 2 qui est caractérisée par un bon éclairage (8.1 et 8.2m). Mais le type intérieur-extérieur qui présente les caractéristiques suivantes : largeur (2m), plafond incliné, épaisseur (0.15m) et réflexion (0.92) est le plus performant car il a réduit l'éclairage reçu par la fenêtre par une diminution de 491.83lux ; il augmente à la fois la largeur de la zone 2 qui devient (8.2m) et le niveau d'éclairage au fond du local qui arrive jusqu'à (777.39 lux) qui est la valeur la plus grande atteinte au cours de toutes les simulations.

Pour confirmer l'étude qui a été faite par "Ecotect 5.5" sur le rendement du système light shelf à l'intérieur de l'espace architectural et plus précisément sous un climat lumineux spécifique à la ville de Biskra, nous avons eu recours à un deuxième outil qui consiste à utiliser un modèle réduit qui porte les mêmes caractéristiques (géométrie, matériaux, réflexion, orientation, etc...) qui, malgré les conditions difficiles de l'expérience (manque des instrumentations ainsi que l'instabilité du ciel), nous a donné des résultats très proches de ceux obtenus par la simulation. Ce rapprochement des résultats confirme la validité de ce logiciel pour la prédétermination de la lumière naturelle dans un espace architectural équipé du système light shelf. Après cette confirmation, nous sommes passés à l'étude quantitative de l'éclairage à l'aide d'Ecotect 5.5. La simulation montre que ce système apporte un peu plus à la fenêtre, il augmente de manière considérable le niveau

d'éclairage au fond de ce local. Cet éclairage devient deux fois plus fort à partir de 3m de profondeur et il atteint (761 lux) à 12m de la fenêtre, alors que le modèle de référence reçoit seulement (377 lux). Cette augmentation est due à la réflexion de la lumière sur sa partie supérieure vers le plafond qui va la diffuser au fond. L'intensité de cette lumière réfléchie dépend des saisons ; elle est très forte au cours des mois de septembre et mars. De plus, ce système réduit la quantité de lumière dans la surface de la fenêtre ce qui réduit l'effet de l'éblouissement et le contraste. Il permet aussi d'empêcher la tâche solaire de pénétrer à l'intérieur du local, ce qui diminue le risque de surchauffe, surtout que le climat de la ville de Biskra est très chaud en été. La simulation du système light shelf au cours de toute l'année a montré que son fonctionnement dépend de la quantité de l'éclairage extérieur qui change avec les saisons.

Le système transmet mieux la lumière au fond et augmente son niveau d'éclairage intérieur lorsque l'éclairage extérieur est fort. Dans les mois chauds, l'éclairage extérieur est important, ce qui augmente l'éclairage à l'intérieur du local de manière excessive (1500 lux) dans les zones profondes mais, il pose des problèmes d'éblouissement et de surchauffe, ce qui nécessite le contrôle de cette transmission. Pendant les mi-saisons, l'éclairage dans les zones profondes est fort et atteint (1300 lux), alors que pendant les mois froids, l'éclairage diffusé est de l'ordre de (700 lux) mais il permet de réduire l'éblouissement.

Enfin, pour étudier l'ambiance lumineuse qu'apporte le système light shelf à cet espace, nous avons utilisé le logiciel "Radiance", qui nous a permis de connaître les valeurs des luminances au niveau de la fenêtre et son périphérie. L'étude des luminances a montré que le système light shelf permet une répartition harmonieuse des luminances dans la périphérie de la fenêtre et ces dernières ont des valeurs qui ne présentent pas d'importantes différences et le contraste ne dépassent pas 1/20. Cette répartition permet d'avoir trois types d'ambiances lumineuses différentes : la première apporte la sensation d'imperceptibilité qui se situe entre la fenêtre et le plafond et le contraste est compris entre 1/1 et 1/2, la deuxième apporte une ambiance douce (fenêtre/sol) avec un contraste variant entre 1/4 et 1/6 alors que la troisième apporte une ambiance forte (fenêtre/parois) et un contraste compris entre 1/9 et 1/14.

Donc, la simulation du système light shelf dans des conditions climatiques spécifiques de la ville Biskra, nous a conduit à déduire que l'ajout à la fenêtre d'un système light shelf de

type droit intérieur-extérieur de (2m) de largeur, installé à une hauteur de (2.2m) du sol, avec un plafond incliné et orienté vers le nord est une solution efficace pour concevoir un bon éclairage dans des espaces de grande profondeur et d'optimiser la distribution de la lumière dans tout le local. Ce réflecteur donne un bon rendement et éclaire le fond de l'espace deux fois plus fort qu'un espace éclairé par une fenêtre seulement allant jusqu'à 12m de profondeur. L'éclairement durant toute l'année n'est pas inférieur à (700 lux) et excède (1000 lux) en été. L'apport du système light shelf change au cours de l'année ; son rendement à l'intérieur de l'espace augmente avec l'augmentation de la quantité d'éclairement extérieur.

L'installation du système light shelf sous des conditions climatiques et environnementales de la ville de Biskra permet à la fois d'éclairer en profondeur, d'avoir une bonne répartition de la lumière dans tout le local et un facteur de lumière de jour modéré, des ambiances lumineuses différentes, d'ombrer la fenêtre des rayons directs, de réduire le risque d'éblouissement, d'empêcher la pénétration de la tache solaire surtout en été, de réduire l'utilisation de l'éclairage électrique pendant le jour et, par conséquent, maintenir les occupants dans une situation de confort visuel et même thermique.

Conclusion générale

La lumière a occupé au cours de l'histoire de l'architecture une place importante et était une source d'inspiration pour les différentes civilisations et tendances architecturales. Grâce à cet aspect physique, nous sommes capables de percevoir le monde qui nous entoure et particulièrement l'objet architectural. Elle transforme le bâtiment de l'extérieur et influence à son tour à l'espace l'intérieur ce qui lui donne plusieurs lectures suivant le changement du temps. La lumière se regroupe avec le temps pour former la quatrième dimension. La lumière est indissociable de l'architecture ; elle définit chaque espace dans son rapport avec l'extérieur, elle révèle les formes, les volumes, les textures, les couleurs, les matières, etc... et permet d'approcher des notions de choix de matériaux, d'implantation, d'usage, d'ambiances, de symbolisme et touche même la notion de développement durable. La lumière doit répondre à un sentiment de confort et à des usages multiples. Elle a un impact sur la productivité et le psycho-physiologique de l'occupant ; c'est pour cette raison que les physiologistes et les ergonomes devraient étudier et déterminer les conditions favorables de la lumière et de la couleur à chaque espace. La combinaison de l'éclairage, le contraste de luminance, la couleur de la lumière, la reproduction des couleurs ou leurs choix sont les éléments qui déterminent le confort visuel et l'ambiance lumineuse et la négligence de l'un ou de plusieurs éléments de cet ensemble peut conduire à l'inconfort visuel. La lecture de l'espace architectural ne peut être faite par la conception d'une forme seulement sans l'introduction de la lumière. Elle permet selon le temps de donner plusieurs sens à un seul espace ce qui apporte à chaque fois une ambiance lumineuse différente et son évaluation reste subjective ; elle peut être une sensation d'ouverture, de grandeur, de gaieté, de tristesse, etc... L'architecture a la capacité de modeler et moduler les qualités de lumière entrant dans l'espace intérieur et même l'ombre apportée. Donc, la lumière va partager son rôle avec l'espace pour créer des ambiances lumineuses différentes.

Du point de vue de la durabilité, la lumière du jour constitue une ressource naturelle, propre et inépuisable. Pour cela, elle est devenue un élément principal dans la conception architecturale surtout dans la phase d'esquisse que l'architecte doit utiliser de manière intelligente et appropriée afin d'assurer le confort visuel, d'accroître le facteur de productivité d'un espace, d'améliorer considérablement son esthétisme et réduire la

consommation d'énergie, alors qu'une mauvaise utilisation de cette lumière va conduire à l'inconfort, ce qui annule les bienfaits qu'elle peut offrir.

Parmi les sources d'inconfort les plus gênants, il y a l'éblouissement. Ce phénomène apporte la sensation d'inconfort et diminue l'acuité visuelle ; il se produit par la pénétration directe de la lumière du soleil dans l'espace. Dans certaines situations, l'éblouissement peut être un objectif recherché, mais généralement, les architectes cherchent à l'éviter par le recours à des systèmes de modélisation de la lumière naturelle sans cacher la fenêtre et réduire le niveau d'éclairement de l'espace. Ces nouveaux systèmes d'éclairage sont connus sous le nom des conduits de lumière. Le système light shelf est un type de conduit de lumière qui a une large utilisation dans les pays du Nord. Ce système est un dispositif d'éclairage et de protection installé au niveau des fenêtres à une hauteur de 2 m ou plus, qui grâce à la réflexion de sa partie supérieure, transmet la lumière plus profondément afin d'éclairer les zones éloignées de la fenêtre. Il permet à la fois d'éclairer la pièce de manière efficace, d'avoir une uniformité de l'éclairement dans l'espace, de réduire de manière considérable l'effet de l'éblouissement, d'empêcher la pénétration des rayons solaires pendant l'été surtout dans les climats chauds, ce qui réduit le risque de la surchauffe et fait des économies d'énergie qui peuvent être supérieures à 50%. Cette véritable économie résulte de l'augmentation de niveau de l'éclairement dans le local qui est du à la réflexion du système light shelf ainsi que la diffusion du plafond. Il existe plusieurs configurations de ce système ; il peut être intérieur ou extérieur, droit ou incliné et parfois mixte. Chaque type correspond à un climat lumineux particulier. Pour cela, avant d'installer un type du système light shelf, il faut tout d'abord connaître le climat de la région considérée, le type de ciel dominant, chercher l'éclairement extérieur pour pouvoir calculer l'éclairement intérieur. Une étude bien approfondie sur le climat lumineux permet de connaître l'efficacité et le rendement de ce système afin d'assurer un confort visuel et thermique et éviter tous les problèmes qui peuvent être causés par un mauvais choix du système light shelf qui est le résultat d'une mauvaise détermination du climat lumineux.

Dans les climats chauds, le taux d'ensoleillement est très important, surtout en été et en automne. Le Sahara algérien est caractérisé par un potentiel solaire très important qui excède 2 190 KW/m² par an ; il est parmi les régions les plus ensoleillées dans le monde. La ville de Biskra appartient à cette région avec un gisement solaire et lumineux très élevé, avec 14 heures d'insolation par jour et une quantité de rayonnement solaire qui atteint 797.58 KW/m². L'exploitation intelligente de cette lumière dans le bâtiment peut couvrir

tous les besoins d'éclairage sans le recours à l'électricité pendant le jour. L'introduction du système light shelf est l'une des solutions innovantes pour une meilleure conception d'éclairage dans la ville de Biskra car, il permet d'éclairer et de protéger le bâtiment des pénétrations excessives de la lumière sans recourir à l'éclairage électrique ; mais malheureusement, son utilisation reste limitée, car peu d'études ont été faites pour caractériser le climat lumineux de la ville d'une part et de simuler le système light shelf dans l'espace architectural, d'autre part. Notre recherche sur le climat lumineux de cette ville montre qu'elle est caractérisée par un ciel intermédiaire proche de clair avec une couverture nuageuse dont la moyenne annuelle est de 49.21% et par un gisement solaire et lumineux très élevé. L'évaluation de la quantité d'éclairement extérieur que reçoit la ville de Biskra a été faite par deux : logiciels NOOR 1.1 et logiciel du génie mécanique ainsi que des données de la journée d'expérimentation et de mesure. Cette étude a montré que la ville reçoit un éclairement très fort qui atteint dans le mois de mai 83108 lux. L'utilisation du système light shelf permet une exploitation intelligente et durable de ce fort éclairement.

Les outils de prédétermination de la lumière naturelle jouent un rôle majeur dans le processus de la conception de l'éclairage naturel en tant que moyens de vérification et d'aide à la prise de décision. La prédétermination de l'éclairage peut se faire grâce à quatre outils : les mesures sur site, les méthodes simplifiées, les simulations à l'aide des logiciels et les modèles réduits. Actuellement, et après le développement que connaît le domaine de l'informatique, il existe plusieurs logiciels spécialisés en éclairage des bâtiments ; ces logiciels sont faciles à exécuter et donnent de bons résultats. Pour cela, et dans le but de faire une investigation exhaustive sur les types de système light shelf et choisir la configuration la plus adéquate au climat lumineux de la ville de Biskra, nous avons recouru à la simulation informatisée à l'aide de "Ecotect v5.5". Cette simulation regroupe deux expériences : la première consiste à utiliser un modèle sans système light shelf (modèle de référence) et dans la deuxième simulation, nous avons ajouté un light shelf de type droit intérieur à la fenêtre.

Les résultats ont montré que le système light shelf a amélioré le rendement de la fenêtre car, il augmente le niveau d'éclairement dans tout le local, surtout au fond où les valeurs ont été doublées ce qui permet d'avoir seulement deux zones ayant un éclairement différent (dans certaines configurations : intérieur-extérieur et incliné) au lieu de quatre (cas du modèle de référence). Cette simulation a montré aussi, que ce système n'a aucune

influence sur l'orientation et l'orientation nord reste toujours la meilleure en termes de quantité de lumière ainsi que de l'uniformité de l'éclairage. Sachant que la largeur du système influence son rendement, plus le système est large, plus il transmet plus profondément la lumière mais cette largeur peut causer une gêne pour l'utilisation de l'espace. De plus, le plafond incliné donne des résultats meilleurs que le plafond droit.

Une deuxième simulation a été proposée pour comparer le rendement de chaque configuration du système light shelf afin de choisir le type le plus performant qui s'adapte le mieux au climat lumineux. Cette simulation nous a permis de tirer les meilleures configurations : intérieur, intérieur-extérieur, incliné vers l'intérieur et incliné vers l'extérieur ; alors que le type extérieur était exclu car, il n'a pas donné de bons résultats du fait que l'éclairage au fond de l'espace reste faible et augmente l'éblouissement. Le type intérieur augmente le niveau d'éclairage mais il augmente aussi le risque d'éblouissement. Le type incliné, soit vers l'intérieur ou vers l'extérieur, donne des résultats très proches en termes d'éclairage apporté au fond du local (729.73 et 729.82 lux) et de la largeur de la zone 2 qui est caractérisée par un bon éclairage (8.1 et 8.2m). Mais le type intérieur-extérieur qui présente les caractéristiques suivantes : largeur (2m), plafond incliné, épaisseur (0.15m) et réflexion (0.92) est le plus performant car il a réduit l'éclairage reçu par la fenêtre par une diminution de 491.83lux ; il augmente à la fois la largeur de la zone 2 qui devient (8.2m) et le niveau d'éclairage au fond du local qui arrive jusqu'à (777.39 lux) qui est la valeur la plus grande atteinte au cours de toutes les simulations.

Pour confirmer l'étude qui a été faite par "Ecotect 5.5" sur le rendement du système light shelf à l'intérieur de l'espace architectural et plus précisément sous un climat lumineux spécifique à la ville de Biskra, nous avons eu recours à un deuxième outil qui consiste à utiliser un modèle réduit qui porte les mêmes caractéristiques (géométrie, matériaux, réflexion, orientation, etc...) qui, malgré les conditions difficiles de l'expérience (manque des instrumentations ainsi que l'instabilité du ciel), nous a donné des résultats très proches de ceux obtenus par la simulation. Ce rapprochement des résultats confirme la validité de ce logiciel pour la prédétermination de la lumière naturelle dans un espace architectural équipé du système light shelf. Après cette confirmation, nous sommes passés à l'étude quantitative de l'éclairage à l'aide d'Ecotect 5.5. La simulation montre que ce système apporte un peu plus à la fenêtre, il augmente de manière considérable le niveau

d'éclairage au fond de ce local. Cet éclairage devient deux fois plus fort à partir de 3m de profondeur et il atteint (761 lux) à 12m de la fenêtre, alors que le modèle de référence reçoit seulement (377 lux). Cette augmentation est due à la réflexion de la lumière sur sa partie supérieure vers le plafond qui va la diffuser au fond. L'intensité de cette lumière réfléchie dépend des saisons ; elle est très forte au cours des mois de septembre et mars. De plus, ce système réduit la quantité de lumière dans la surface de la fenêtre ce qui réduit l'effet de l'éblouissement et le contraste. Il permet aussi d'empêcher la tâche solaire de pénétrer à l'intérieur du local, ce qui diminue le risque de surchauffe, surtout que le climat de la ville de Biskra est très chaud en été. La simulation du système light shelf au cours de toute l'année a montré que son fonctionnement dépend de la quantité de l'éclairage extérieur qui change avec les saisons.

Le système transmet mieux la lumière au fond et augmente son niveau d'éclairage intérieur lorsque l'éclairage extérieur est fort. Dans les mois chauds, l'éclairage extérieur est important, ce qui augmente l'éclairage à l'intérieur du local de manière excessive (1500 lux) dans les zones profondes mais, il pose des problèmes d'éblouissement et de surchauffe, ce qui nécessite le contrôle de cette transmission. Pendant les mi-saisons, l'éclairage dans les zones profondes est fort et atteint (1300 lux), alors que pendant les mois froids, l'éclairage diffusé est de l'ordre de (700 lux) mais il permet de réduire l'éblouissement.

Enfin, pour étudier l'ambiance lumineuse qu'apporte le système light shelf à cet espace, nous avons utilisé le logiciel "Radiance", qui nous a permis de connaître les valeurs des luminances au niveau de la fenêtre et son périphérie. L'étude des luminances a montré que le système light shelf permet une répartition harmonieuse des luminances dans la périphérie de la fenêtre et ces dernières ont des valeurs qui ne présentent pas d'importantes différences et le contraste ne dépassent pas 1/20. Cette répartition permet d'avoir trois types d'ambiances lumineuses différentes : la première apporte la sensation d'imperceptibilité qui se situe entre la fenêtre et le plafond et le contraste est compris entre 1/1 et 1/2, la deuxième apporte une ambiance douce (fenêtre/sol) avec un contraste variant entre 1/4 et 1/6 alors que la troisième apporte une ambiance forte (fenêtre/parois) et un contraste compris entre 1/9 et 1/14.

Donc, la simulation du système light shelf dans des conditions climatiques spécifiques de la ville Biskra, nous a conduit à déduire que l'ajout à la fenêtre d'un système light shelf de

type droit intérieur-extérieur de (2m) de largeur, installé à une hauteur de (2.2m) du sol, avec un plafond incliné et orienté vers le nord est une solution efficace pour concevoir un bon éclairage dans des espaces de grande profondeur et d'optimiser la distribution de la lumière dans tout le local. Ce réflecteur donne un bon rendement et éclaire le fond de l'espace deux fois plus fort qu'un espace éclairé par une fenêtre seulement allant jusqu'à 12m de profondeur. L'éclairement durant toute l'année n'est pas inférieur à (700 lux) et excède (1000 lux) en été. L'apport du système light shelf change au cours de l'année ; son rendement à l'intérieur de l'espace augmente avec l'augmentation de la quantité d'éclairement extérieur.

L'installation du système light shelf sous des conditions climatiques et environnementales de la ville de Biskra permet à la fois d'éclairer en profondeur, d'avoir une bonne répartition de la lumière dans tout le local et un facteur de lumière de jour modéré, des ambiances lumineuses différentes, d'ombrer la fenêtre des rayons directs, de réduire le risque d'éblouissement, d'empêcher la pénétration de la tache solaire surtout en été, de réduire l'utilisation de l'éclairage électrique pendant le jour et, par conséquent, maintenir les occupants dans une situation de confort visuel et même thermique.

La deuxième partie

La première partie

Développement futur du travail

L'objectif voulu par ce travail est de simuler un système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques à la ville de Biskra afin de choisir le type de système le plus performant qui puisse assurer le confort visuel et optimiser l'utilisation de la lumière naturelle dans l'espace architectural de grande profondeur afin de bien l'éclairer et de réduire l'utilisation de l'éclairage électrique pendant la journée.

Cette recherche a été concentrée sur le choix de la configuration du système light shelf qui assure le mieux le confort visuel. Pour cela, seule une étude quantitative a été entamée pour évaluer la quantité de lumière captée par la fenêtre et celle transmise par le système light shelf au fond de l'espace sans chercher à connaître ce que peut donner réellement ce système en termes de qualité d'espace ainsi que les différentes ambiances qu'il peut offrir. Les recherches antérieures ont montré que le système light shelf apporte à l'intérieur de l'espace des ambiances lumineuses particulières qui diffèrent selon le type de système choisi, la région, l'heure de la journée ainsi que les saisons. L'étude des ambiances lumineuses dans un espace équipé d'un système d'éclairage naturel (light shelf) est un complément pour une recherche bien approfondie et détaillée de l'éclairage naturel dans le bâtiment. Cette piste de recherche peut être faite par la formulation d'un questionnaire et/ou par des logiciels.

De plus, une autre piste de recherche qui apparaît importante à étudier est celle qui consiste à assembler l'étude de confort visuel avec le confort thermique, surtout que l'installation de système light shelf (type droit intérieur-extérieur) a montré au cours de notre recherche qu'il a la capacité d'empêcher les rayons solaires de rentrer à l'intérieur du local ce qui peut réduire la température intérieure du local de quelques degrés et par conséquent, éviter ainsi la surchauffe durant la période d'été. La connaissance du fonctionnement du système light shelf ainsi que les caractéristiques climatiques de cette ville peuvent nous aider à étudier le confort thermique, surtout en été, ainsi que les différentes ambiances thermiques ressenties afin de vérifier si le système light shelf a vraiment une double fonction qui assure réellement à la fois le confort visuel et le confort thermique. Cette piste de recherche peut être réalisée par le recours à la simulation informatique.