

« 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 jour 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.

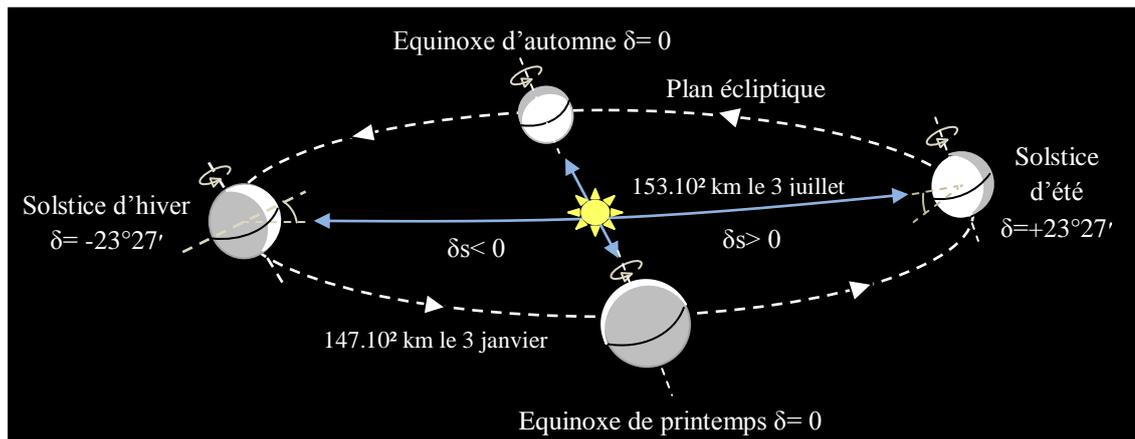


Figure 4 : La position géographique du soleil (Source : Auteur)

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.

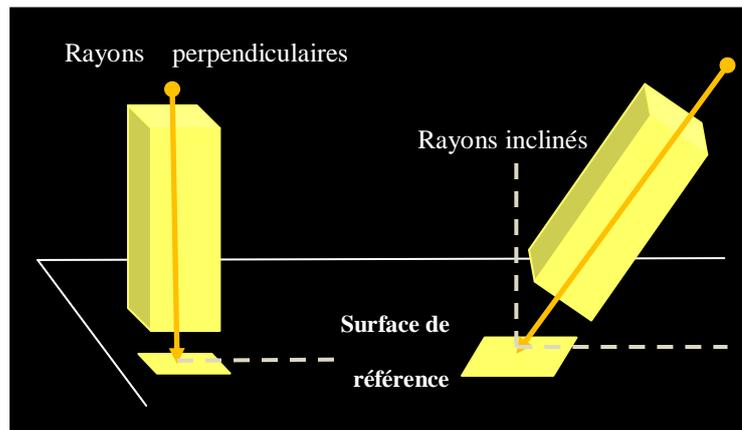


Figure 5 : La densité énergétique (Source : Auteur)

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.

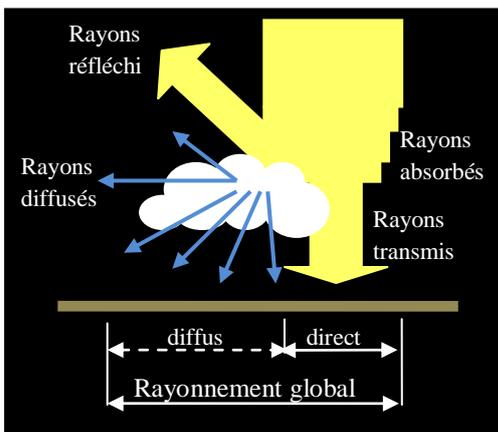


Figure 6 : L'éclairage solaire global
(Source : Auteur)

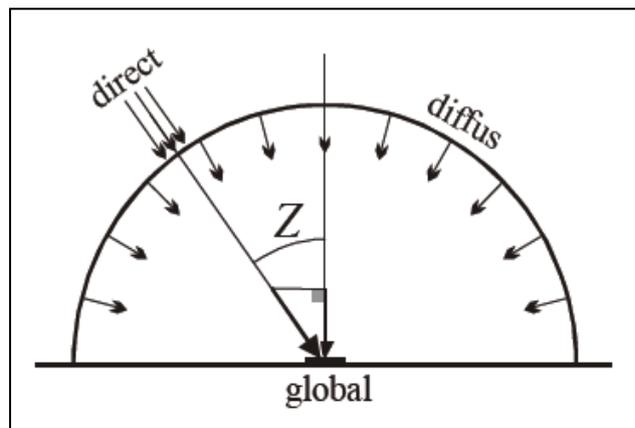


Figure 7 : L'angle zénithal du soleil
(Source : Francis Miguet)

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 :

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

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

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, L_z représente la luminance au zénith selon l'équation suivante :

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

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.

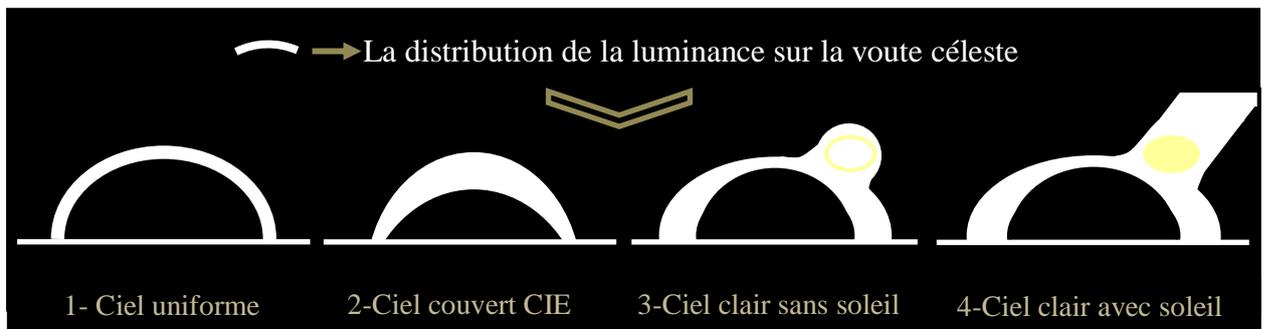


Figure 8 : Les quatre types de ciel standard (Source : Auteur)

- 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 :

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

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 ou 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 :

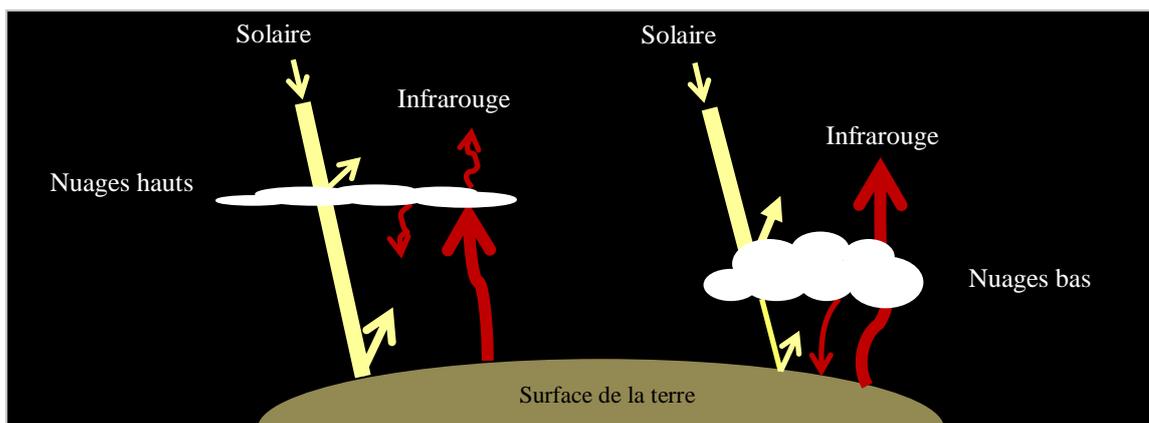


Figure 9 : Les effets de nuages sur le rayonnement solaire (Source : Auteur)

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).

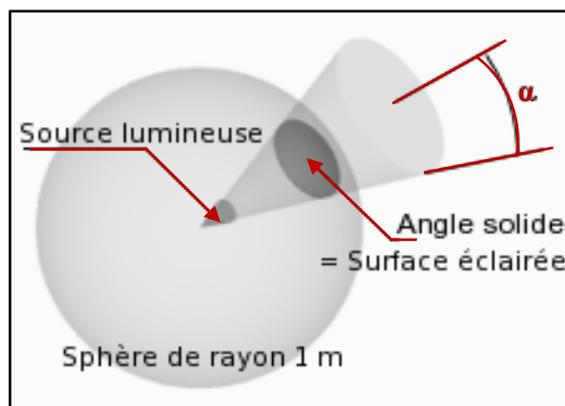


Figure 10 : L'angle solide
(Source : Auteur)

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.

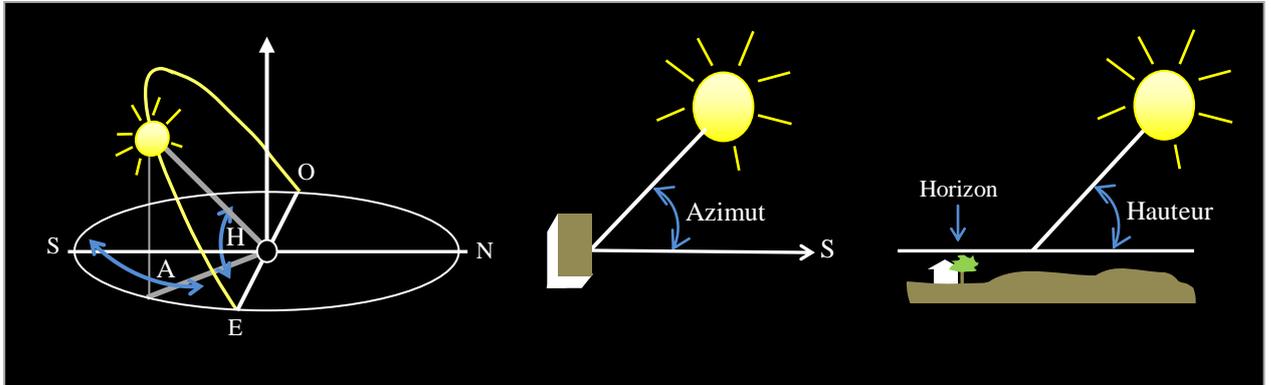


Figure 11 : Les coordonnées solaires : hauteur et azimut
(Source : Auteur)

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.

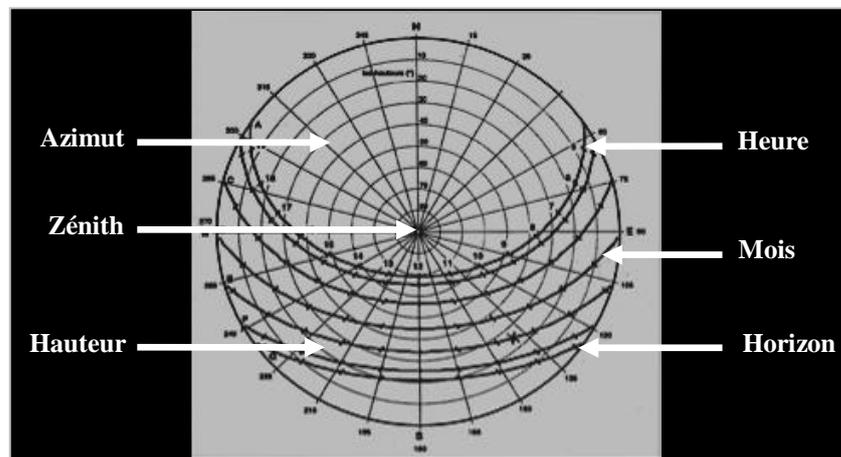


Figure 12 : Les différentes composantes de diagramme solaire
(Source : Auteur)

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°.

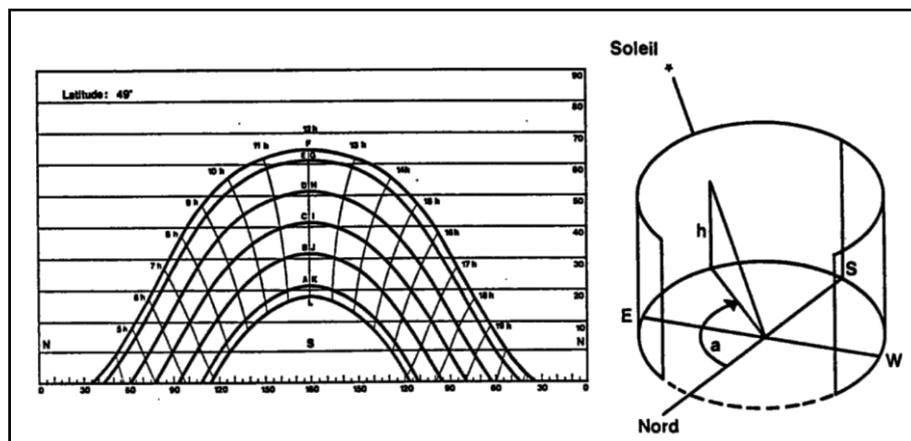


Figure 13 : Projection pseudo-cylindrique (Source : Les projections de la course solaire)

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.

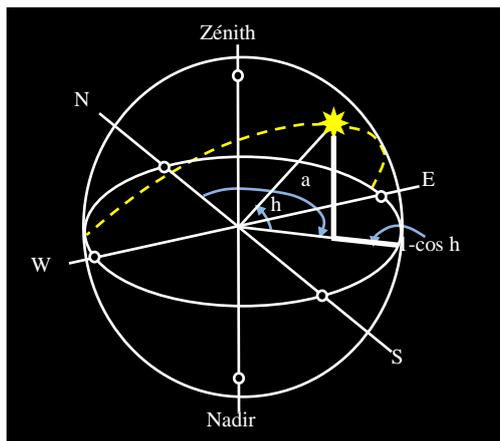


Figure 14 : Projection orthogonale
(Source : Auteur)

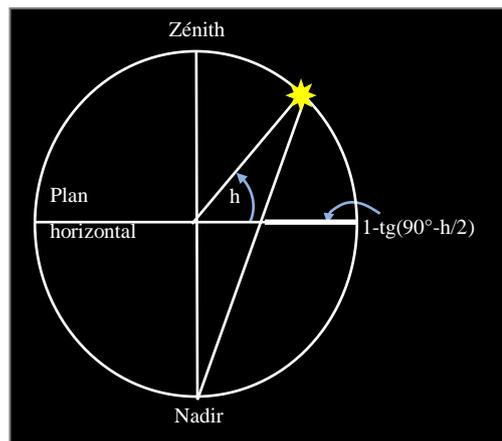


Figure 15 : Projection stéréographique
(Source : Auteur)

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.

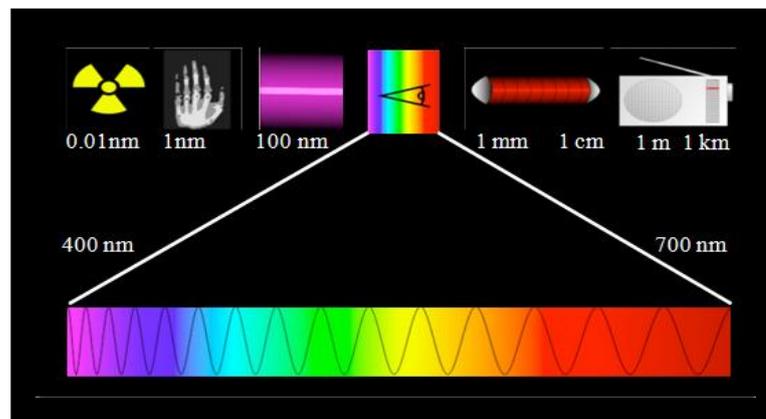


Figure 16 : La lumière visible par l'œil humain
(Source: Marcial CARDO-SABAN)

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.

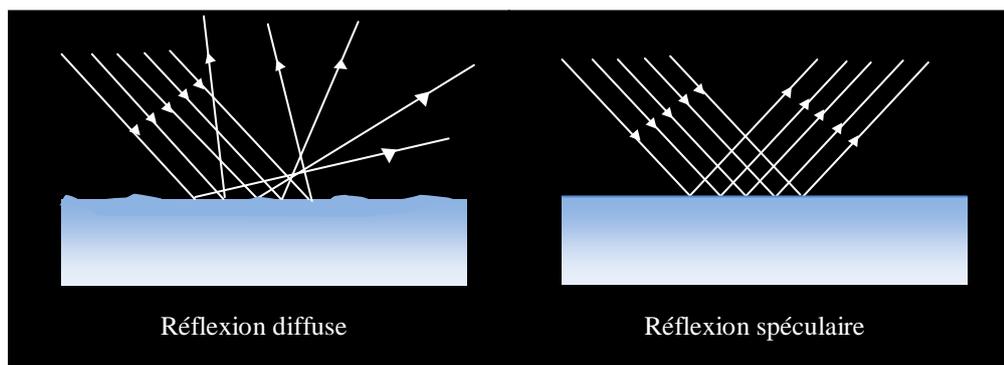


Figure 17 : Les deux types de réflexion
(Source: Auteur)

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.

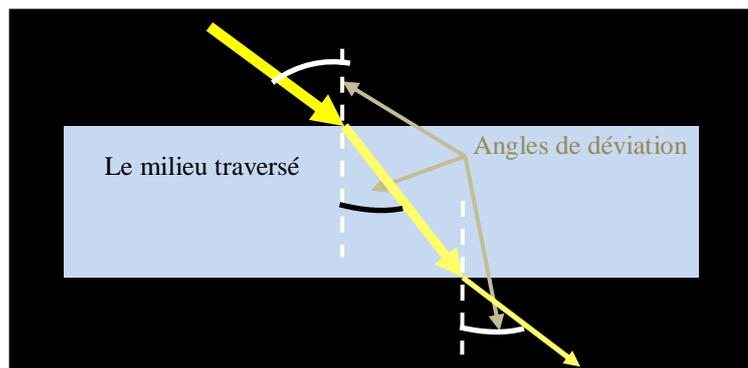


Figure 18 : La réfraction (Source: Auteur)

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.

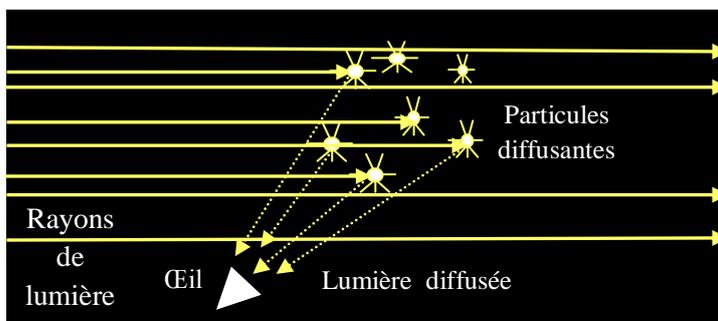


Figure 19 : La diffusion de la lumière par des particules diffusantes (Source: Auteur)

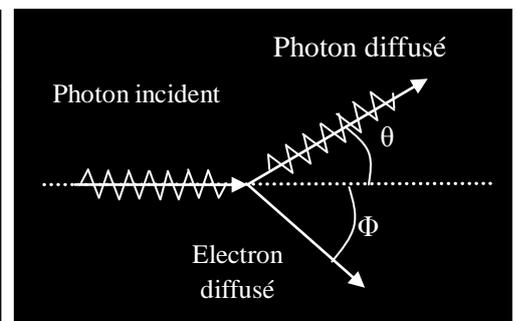


Figure 20 : Diffusion Compton (Source: Auteur)

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.

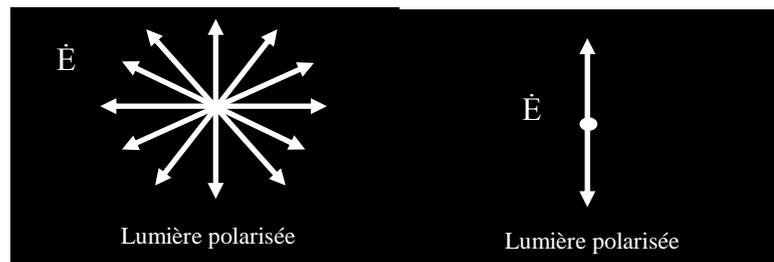


Figure 21 : La polarisation (Source: Auteur)

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.

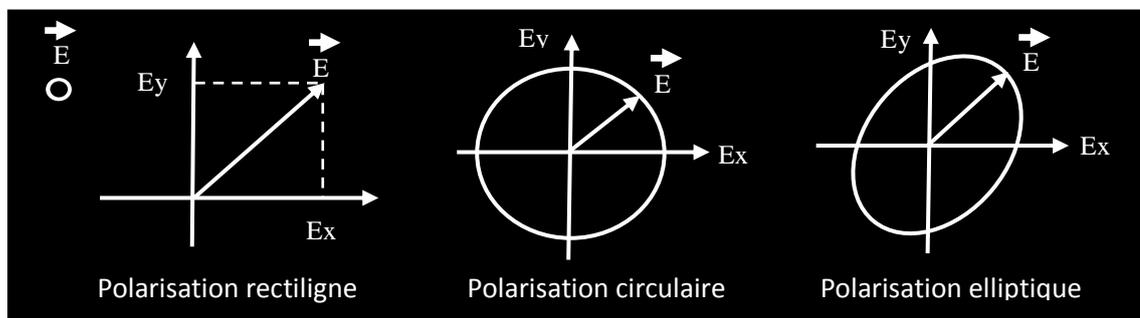


Figure 22: Les types de la polarisation (Source: Auteur)

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.

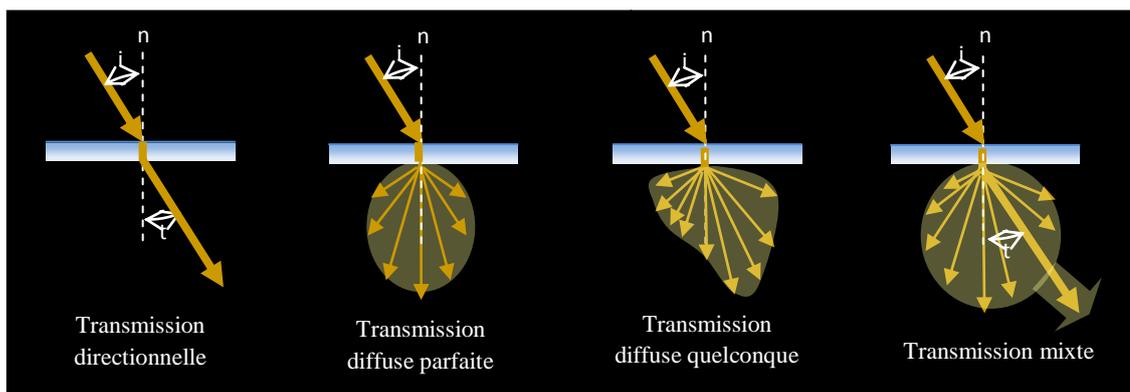


Figure 23 : Les types de la transmission (Source: Auteur)

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.

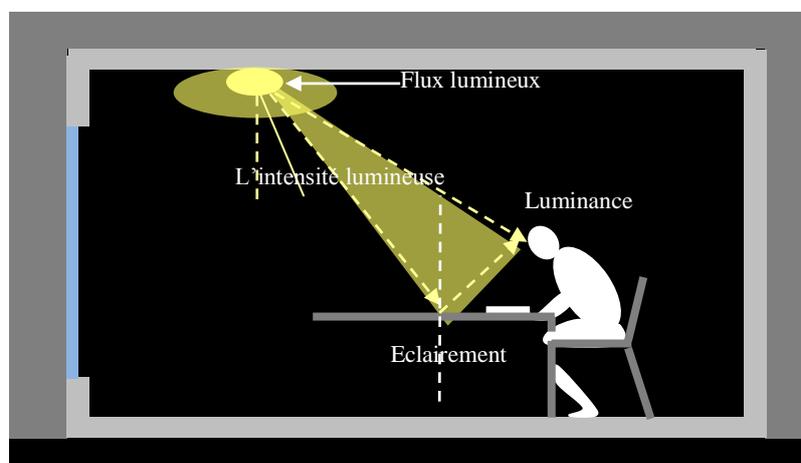


Figure 24: Les quatre notions de la photométrie
(Source: Auteur)

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.

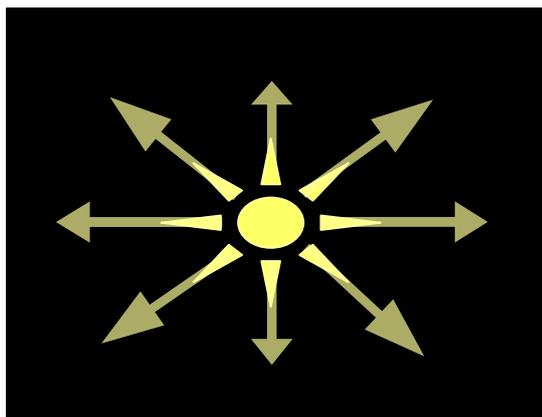


Figure 25 : Le flux lumineux (Source: Auteur)

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.

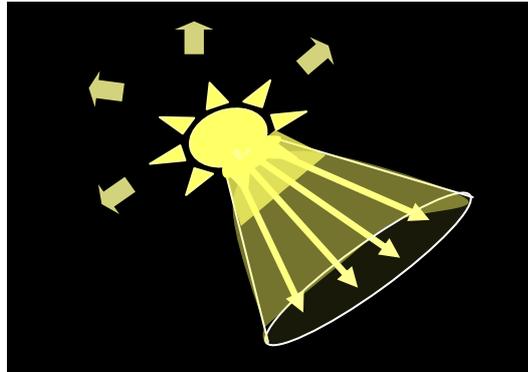


Figure 26 : L'intensité lumineuse (Source: Auteur)

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.

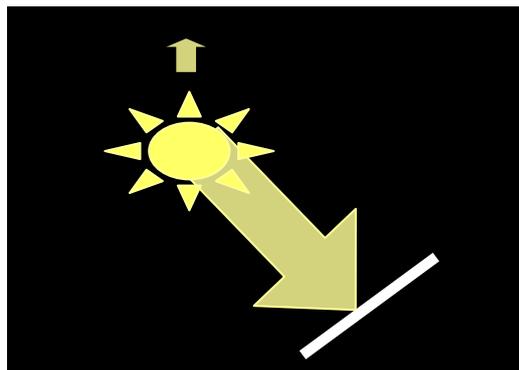


Figure 27 : L'éclairement (Source: Auteur)

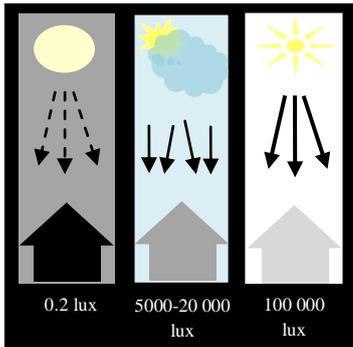


Figure 28 : L'éclairage
(Source: Auteur)

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.

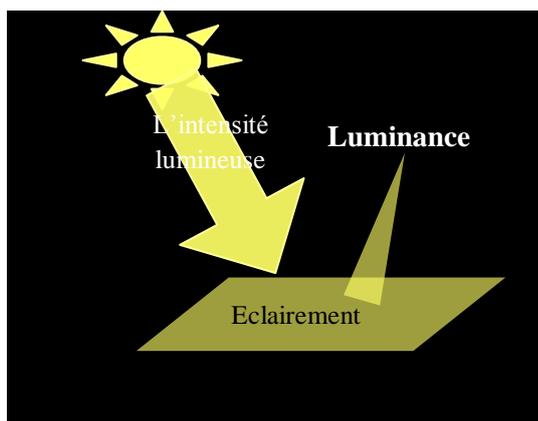


Figure 29 : La luminance (Source: Auteur)

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

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

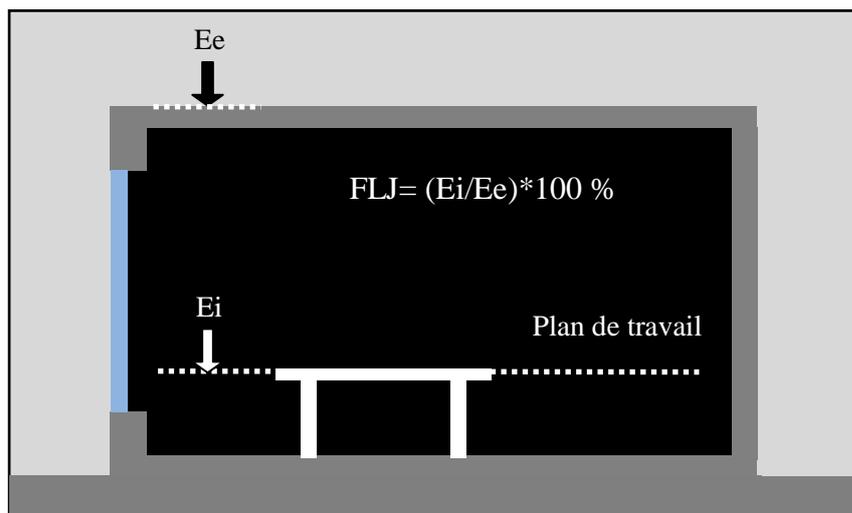


Figure 30 : Le facteur de lumière du jour (FLJ) (Source: Auteur)

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'éclairément 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.

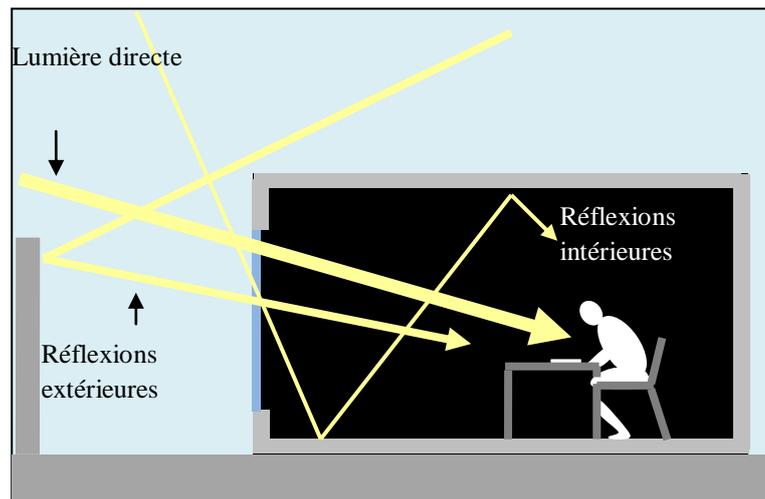


Figure 33 : Les trois composantes de la lumière naturelle
(Source: Auteur)

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- Capturer, 2- transmettre, 3- distribuer, 4- se protéger, 5- contrôler :

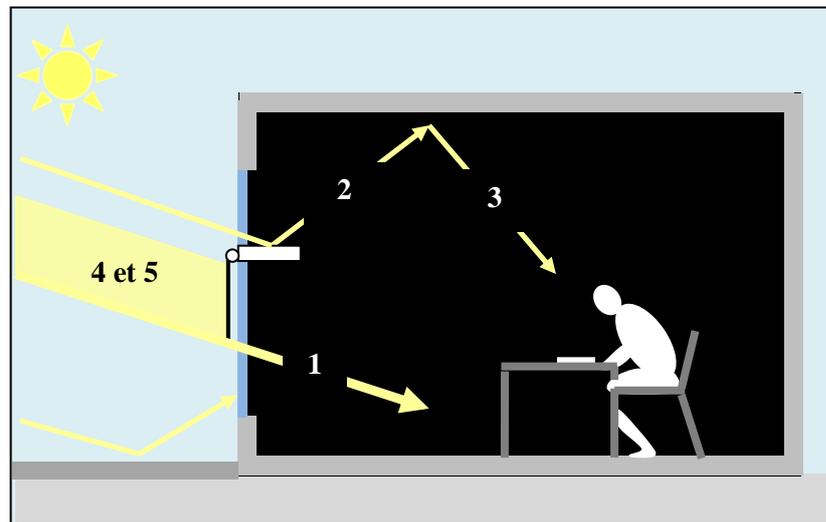


Figure 34 : La stratégie de la lumière naturelle (Source: Auteur)

IV.2.1. Capturer: 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 : Capturer 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'éclairement 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.

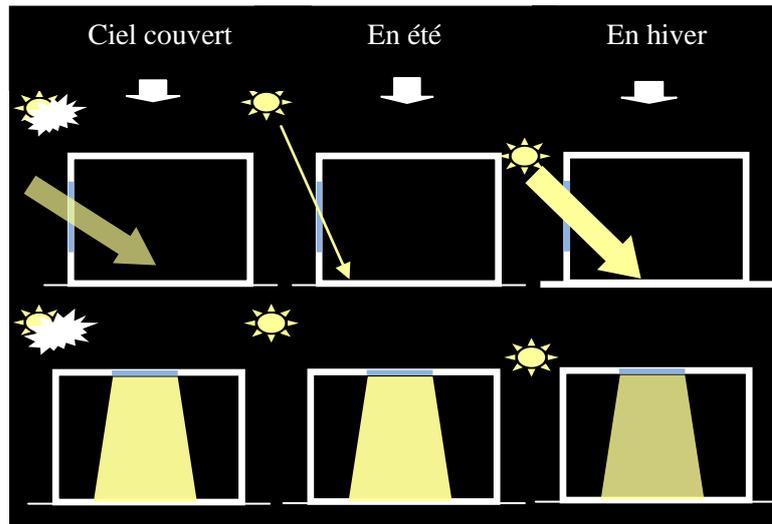


Figure 36 : Le rôle des ouvertures latérales (Source: Auteur)

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.

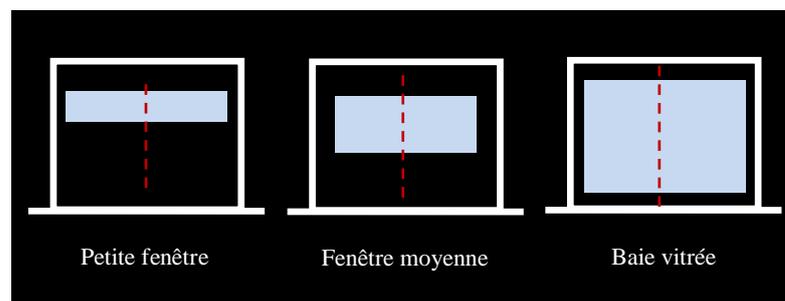


Figure 40 : Les dimensions de l'ouverture (Source: Auteur)

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.

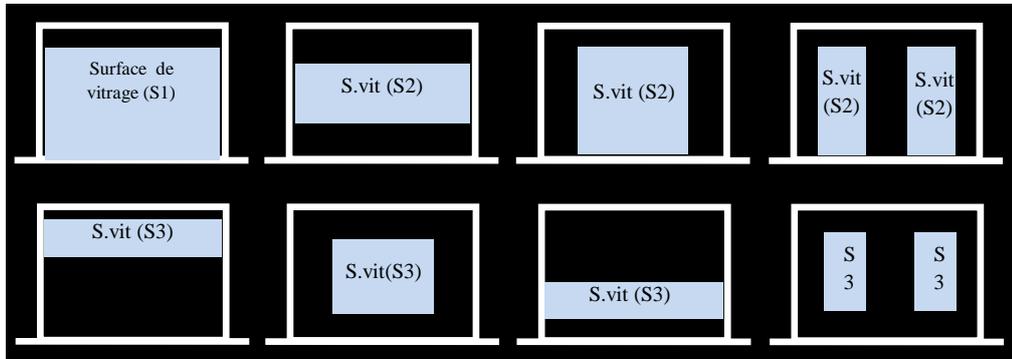


Figure 41 : Les dimensions de l'ouverture (Source: Auteur)

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.

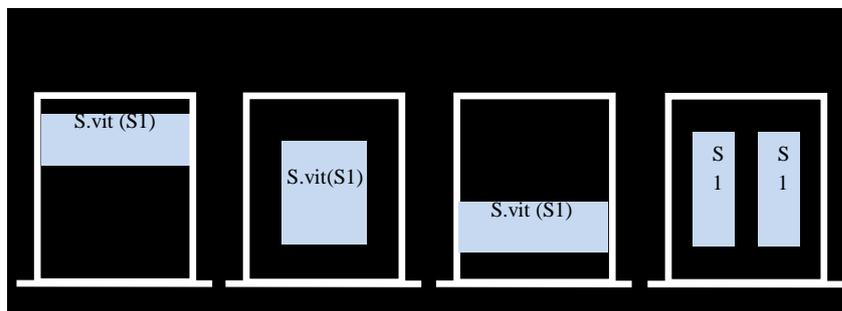


Figure 42 :L'influence de la forme de l'ouverture (Source: Auteur)

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.