

1 Introduction

1.1 La lumière dans l'architecture

Dans l'architecture contemporaine, on constate un usage exagéré de systèmes artificiels, et la conceptualisation d'une architecture de géométrie vitrée avec l'usage de murs rideaux qui, paradoxalement, au lieu de faciliter la communication avec l'extérieur créent des barrières infranchissables. On arrive ainsi à un point où l'ambiance intérieure théoriquement contrôlée devient fréquemment plus inconfortable que l'extérieur : une architecture qui fonctionne moins bien que le climat.

Éclairer naturellement un bâtiment est plus qu'une solution technique à un problème d'efficacité énergétique ou bien même qu'une solution esthétique d'intégration à l'architecture. La lumière naturelle doit être un composant essentiel d'une philosophie qui reflète une attitude plus responsable et plus sensible de l'être humain par rapport au milieu où il vit.

2 Principes physiques de base

2.1 Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est une forme de transport d'énergie qui se caractérise par des variations périodiques de l'état électromagnétique de l'espace, interprétable également par le mouvement de particules élémentaires: les photons.

Un rayonnement électromagnétique se caractérise par sa fréquence (f en Hertz). Sa longueur d'onde (λ en mètre), plus fréquemment utilisée, caractérise à la fois le rayonnement et le milieu au sein duquel s'effectue le transfert ($\lambda = c/f$ où c représente la vitesse de propagation dans le milieu considéré). Dans ce spectre très ample qui s'étend des rayonnements cosmiques dont la longueur d'onde dans le vide est de l'ordre de l'Angström, jusqu'aux ondes radio de plusieurs centaines de mètres de longueur d'onde, le rayonnement visible n'occupe qu'une plage très étroite comprise entre 0,4 et 0,8 μm .

Les rayonnements électromagnétiques ont pour origine la variation de la structure atomique des corps, produisant des modifications de la position orbitale des électrons, ce qui provoque l'émission de photons.

On distingue deux types principaux de sources de rayonnement visibles : les sources thermiques et les sources agissant par décharges, bien que du point de vue de l'architecture on puisse se limiter aux sources thermiques.

Tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu émettent du rayonnement à cause de l'agitation thermique de la matière. Ce rayonnement thermique se caractérise par la continuité du spectre dans le domaine de longueur d'onde dans lequel il se situe (entre 0,1 et 100 μm).

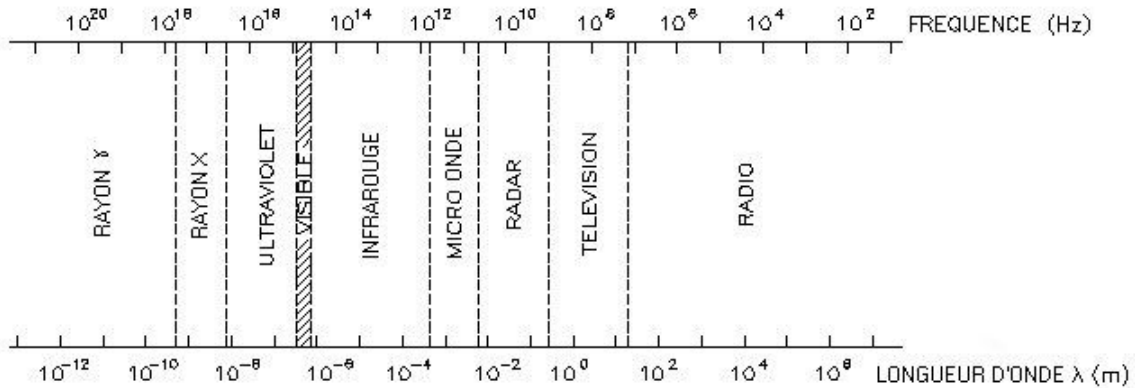


Figure 4.1.- le spectre électromagnétique

A la température ambiante (300 K) les corps émettent essentiellement dans les longueurs d'onde correspondant à l'infrarouge (entre 5 et 50 μm). Si leur température augmente, la puissance émise augmente et la longueur d'onde d'émission diminue et se déplace vers le domaine visible. Pour le soleil dont la température de surface est proche de 6000 K, le maximum d'émission se situe aux environs de 0,5 μm , au milieu du spectre visible. La vision humaine s'est ainsi adaptée à la source principale de rayonnement rencontrée sur la terre.

2.2 Unités et grandeurs fondamentales

En éclairage, on utilise principalement quatre grandeurs

Flux lumineux :

Le flux lumineux mesure la puissance lumineuse. Noté Φ , son unité est le lumen (lm).

Intensité lumineuse :

L'intensité lumineuse mesure la densité spatiale de flux dans une direction déterminée. Notée I_{ox} , elle a comme unité la candela (1cd = 1lm/str) où le stéradian (str) est l'unité de mesure de l'angle solide.

Luminance :

La luminance L_{ox} représente l'intensité d'une surface par unité d'aire apparente pour un observateur situé dans la direction Ox . Son unité est la candela par mètre carré (cd/m^2).

L'éclairement :

L'éclairement E d'une surface représente la densité surfacique de flux lumineux reçu par une surface. L'éclairement s'exprime en lux (1 lx = 1 lm/ m^2).

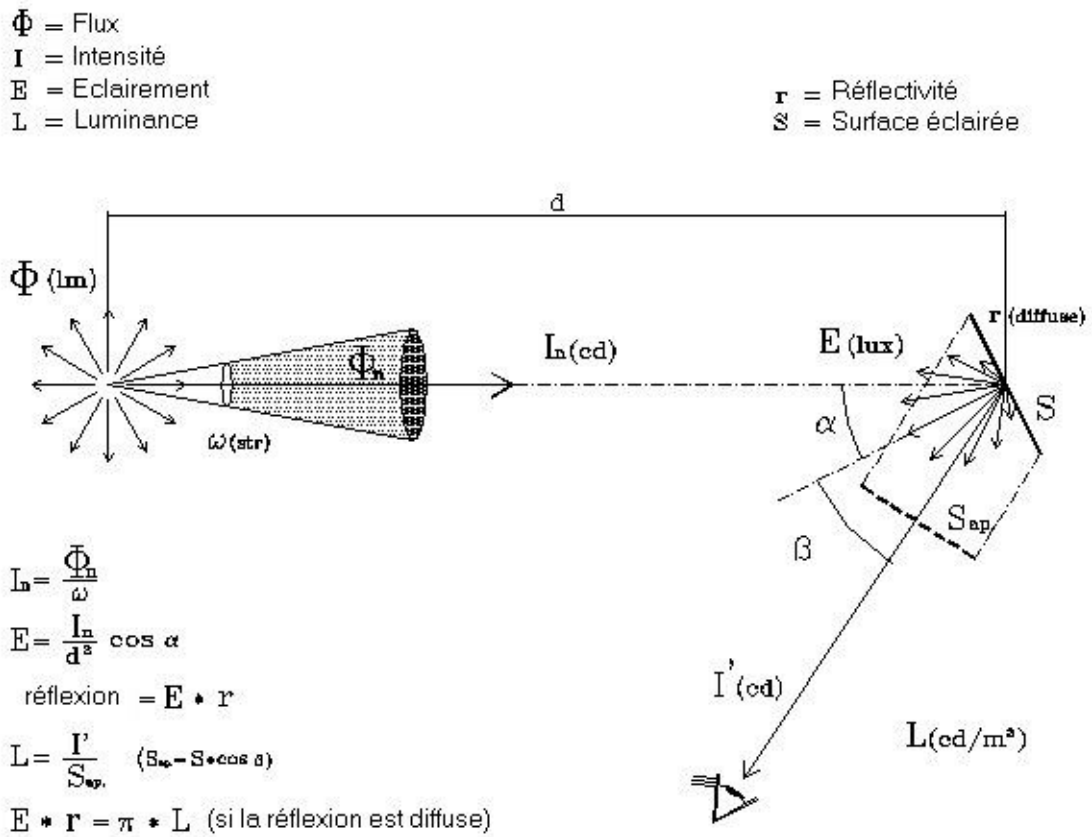


Figure 4.2.- Les quatre grandeurs principales en éclairage

Dans tous les phénomènes lumineux, on peut vérifier que l'éclairage dû à une source ponctuelle sur une surface perpendiculaire au rayon lumineux est proportionnel à l'intensité de la source dans la direction considérée et décroît avec le carré de la distance à la source. Si la surface n'est pas orthogonale au rayon incident, l'éclairage varie en fonction de l'angle d'incidence α mesuré entre la normale à la surface et le rayon lumineux. On obtient alors:

$$E = (I/d^2) \cos(\alpha)$$

Pour le rayonnement solaire direct, si E_0 représente l'éclairage d'une surface perpendiculaire aux rayons solaires, l'éclairage d'une surface quelconque s'écrira :

$$E = E_0 \cos \alpha .$$

2.3 Le spectre visible

La lumière n'est pas seulement un vecteur énergétique, mais elle est également colorée en fonction des longueurs d'onde qu'elle comporte dans le domaine visible.

En effet, à chaque longueur d'onde du spectre visible correspond une couleur différente. La lumière solaire qui contient toutes les longueurs d'onde du domaine visible et dont la répartition spectrale du rayonnement correspond à celle du corps noir sert de référence est souvent appelée lumière blanche.

En éclairage, pour prendre en compte l'efficacité de l'œil à interpréter l'excitation due au spectre visible, on définit des grandeurs spécifiques, les grandeurs lumineuses. De plus, on caractérise les sources vis à vis de la sensation lumineuse qu'elles procurent.

La température de couleur (T_c) :

(T_c) représente la température du corps noir qui donnerait globalement la même répartition spectrale du flux émis que la source réelle. Son unité est le Kelvin (K). La lumière naturelle aura par conséquent une température de couleur voisine de la température de surface du soleil (environ 6000). Une source de lumière par incandescence dont lumière tire sur le jaune rouge aura une température de couleur plus basse (3500 à 4000 K), par contre un arc électrique bleuté aura une température de couleur supérieur à 6500 K.

L'indice de rendu des couleurs (IRC) :

L'indice de rendu des couleurs représente la capacité d'une source lumineuse à reproduire la sensation colorée de la lumière naturelle sur des objets quelconques. On le définit comme IRC et il s'exprime en pourcentage, 100% correspondant à la lumière naturelle.

2.4 La lumière et les limites spatiales

Réflexion- Transmission- Absorption :

La lumière se propage dans l'espace à une telle vitesse qu'à l'échelle des bâtiments on peut raisonnablement la considérer comme instantanée. Quand elle rencontre un corps réel, une partie du rayonnement incident est transformée en chaleur, c'est le phénomène d'absorption, une partie peut être réfléchi, et si le corps est transparent, une autre peut-être transmise. On définit ainsi trois coefficients, l'absorptivité α , la réflectivité ρ et la transmittivité τ qui représentent respectivement les pourcentages du flux incident qui sont absorbé, réfléchi ou transmis. Par définition, la somme de ces trois coefficients est toujours égale à l'unité. Ils peuvent être défini de façon spectrale (pour une longueur d'onde déterminée), globale (pour tout le spectre

du rayonnement incident), directionnelle (pour une direction déterminée de l'espace) ou hémisphérique (pour toutes les directions).

a) Du point de vue spectral, les surfaces peuvent avoir des comportements différents selon la longueur d'onde. Ainsi, la lumière réfléchie ou transmise par ses corps peut-elle prendre des colorations différentes. On caractérisera alors les surfaces par leur réflectivité ou leur transmittivité spectrale (ρ_λ , τ_λ). Pour la plupart des surfaces rencontrées dans les bâtiments, ces caractéristiques radiatives sont constantes dans une plage plus ou moins importante de longueur d'onde, on parlera alors de surfaces grises par bande et on pourra affecter une valeur constante à ses caractéristiques pour un domaine plus ou moins large de longueur d'onde. C'est en particulier le cas pour le spectre visible (0,4 à 0,8 μm) où on considérera souvent les surfaces comme grises en réflexion et en transmission. En ce cas, le spectre de la lumière incidente ne sera pas modifié par une réflexion ou une transmission par de telles surfaces. Pour toutes les autres surfaces, ce spectre sera modifié lors d'une réflexion ou une transmission comme le présente la figure la figure 4.3 pour un vitrage teinté.

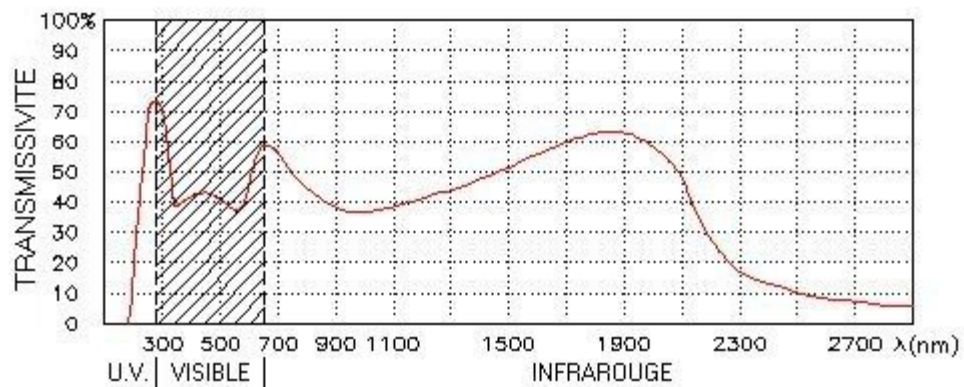


Figure 4.3.- Transmittivité spectrale d'un vitrage teinté.

b) Du point de vue géométrique, l'état de surface et les caractéristiques intrinsèques des corps font que leurs caractéristiques de réflexion et de transmission peuvent être profondément différentes d'un corps à l'autre. Par exemple, chaque fois que les irrégularités géométriques sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement incident, on constatera un phénomène de réflexion diffuse (la réflectivité ne dépend alors pas de la direction d'incidence), la surface apparaît mate. Au contraire, si les irrégularités géométriques sont très petites par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on obtiendra une réflexion ou une transmission spéculaire (l'aspect directionnel du rayonnement incident est alors conservé et la surface apparaît brillante). Dans la pratique, on a entre ces deux extrêmes toute sorte de comportements (Figure 4.4).

Pour les longueurs d'onde du rayonnement visible, la plupart des surfaces rencontrées dans les bâtiments auront des comportements diffus. Seules les surfaces polies et les corps à structure interne très ordonnée (structures cristallines) auront un comportement spéculaire.

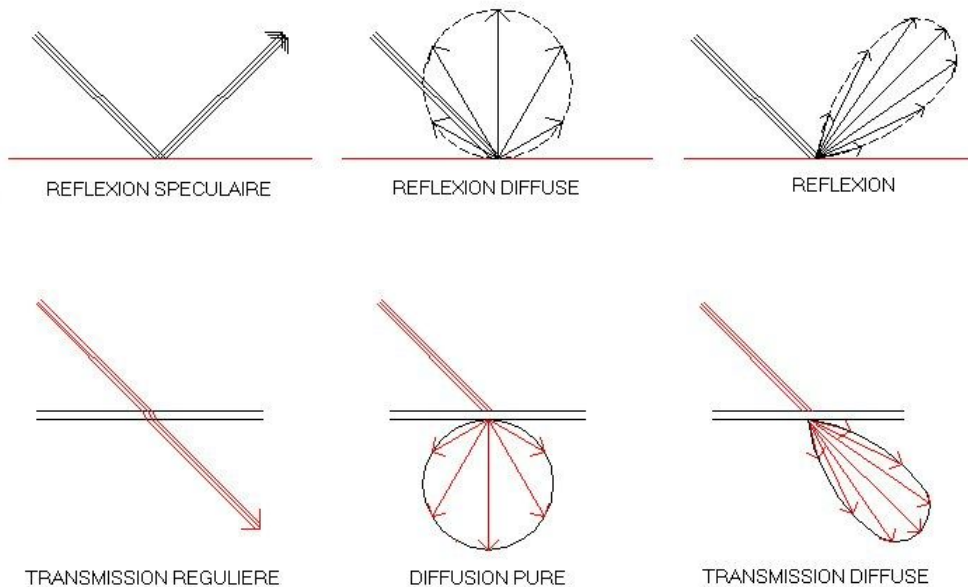


Figure 4.4.- Comportement des surfaces réelles en réflexion et transmission

Dans le cas de réflexion et/ou de transmission diffuse, la luminance des surfaces considérées est constante quelque soit la direction d'observation. Ses surfaces seront appelées lambertiennes et si E est l'éclairement de ces surfaces, leur luminance est alors donnée par :

$$L = (\rho E) / \pi \quad \text{pour une réflexion}$$

ou

$$L = (\tau E) / \pi \quad \text{pour une transmission}$$

En architecture, où la plupart des surfaces ont des caractéristiques lumineuses diffuse, ce comportement conduit à ce que la lumière se répartisse de façon quasi uniforme dans les espaces intérieurs. Les surfaces spéculaires peuvent avoir un intérêt spécifique pour réfléchir la lumière et plus particulièrement le rayonnement solaire direct dans des directions spécifiquement intéressantes. De plus, les surfaces transparentes (verre) sont en général peu diffusantes, ce qui permet de conserver d'une part la direction des rayonnements solaires directs,

mais aussi de tout rayonnement visible, et donc de permettre la vision sans déformation de la géométrie, effet tout à fait déterminant.

3 Physiologie de la vision

3.1 L'œil et la vision: notion de perception visuelle

Le sens de la vue est basé sur le fonctionnement d'un organe spécialisé, l'œil, qui agit comme un capteur physique. Cet organe (figure 4.5) est muni d'un diaphragme, la pupille, qui régule le flux lumineux qui pénètre dans l'œil en modulant la surface de l'ouverture dans un rapport de 1 à 16. Plus la pupille est fermée, moins le flux entrant est important, mais plus la profondeur de champ de vision nette est grande. Le cristallin joue le rôle d'une lentille qui se déforme pour assurer la mise au point et focalise l'image sur la rétine. Après avoir traversé le corps vitreux qui emplit le globe oculaire, l'image focalisée arrive sur la rétine où elle est interprétée par des cellules sensibles à la fois au niveau de l'éclairement et à la longueur d'onde. Deux types de cellules recouvrent la rétine. Les bâtonnets peu sensibles à la longueur d'onde mais sensibles à des niveaux d'éclairement faibles sont surtout présent dans la partie périphérique. Ils permettent la vision nocturne ou à faible niveau d'éclairement mais ils interprètent mal les couleurs (la nuit tous les chats sont gris). Au contraire les cônes sensibles à la longueur d'onde mais nécessitant un niveau d'éclairement plus élevé se trouvent principalement en partie centrale et notamment au centre même dans une petite concavité appelée fovéa.

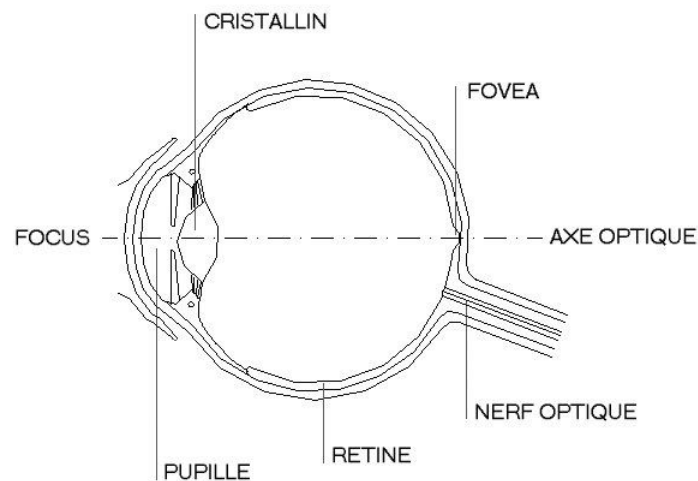


Figure 4.5.- Structure de humain

Comme la plupart des organes sensitifs, l'œil humain ne répond pas de manière linéaire à une excitation lumineuse. Il suit une loi logarithmique (loi de Stevens) selon laquelle le stimulus S est proportionnel au logarithme de

l'excitation. Dans le cas de l'œil, si l'excitation est mesurée par le niveau d'éclairement E , on obtient :

$$S = K \log E + B$$

où S est le stimulus, E l'éclairement et B et K des constantes physiologiques.

Ce type de réaction permet aux sens de traiter des signaux dans une gamme importante d'ordres de grandeurs. Cependant, elle signifie aussi qu'une augmentation de niveau d'une valeur constante sera ressentie différemment suivant le niveau de départ. Par exemple, si on augmente à des fins d'éclairage naturel, de 1 m^2 , la surface d'une ouverture existante de 1 m^2 , l'effet ressenti par un observateur est important alors que si on augmente de 1 m^2 une surface d'une ouverture de 10 m^2 l'effet ressenti est minime.

En plus de ce mécanisme sensoriel de base, la vue a la capacité de s'adapter à des niveaux d'éclairement différents de plusieurs façons. Outre la pupille qui joue le rôle d'un diaphragme et qui s'adapte de façon rétroactive aux niveaux de luminance reçus par la rétine, les cellules qui recouvrent la rétine travaillent dans des plages de luminances distinctes. Les bâtonnets peuvent interpréter des signaux pour des luminances inférieures à 10 cd/m^2 , alors que les cônes ont besoin de luminances élevées et interprètent des signaux pour des luminances supérieures à 300 cd/m^2 . Entre ces deux extrêmes, les deux types travaillent conjointement à l'élaboration de la sensation lumineuse.

Les cônes permettent la vision des couleurs ou vision photopique avec une sensibilité qui varie avec la longueur d'onde, avec un maximum qui se situe dans le jaune vert ($0,55 \mu\text{m}$). La vision fournie par les bâtonnets (vision scotopique) en permet pas la vision colorée, et le maximum de sensibilité se situe pour une longueur d'onde légèrement inférieure. Les courbes de sensibilités de l'œil appelées courbes de visibilité spectrale relative sont données sur la figure 4.6.

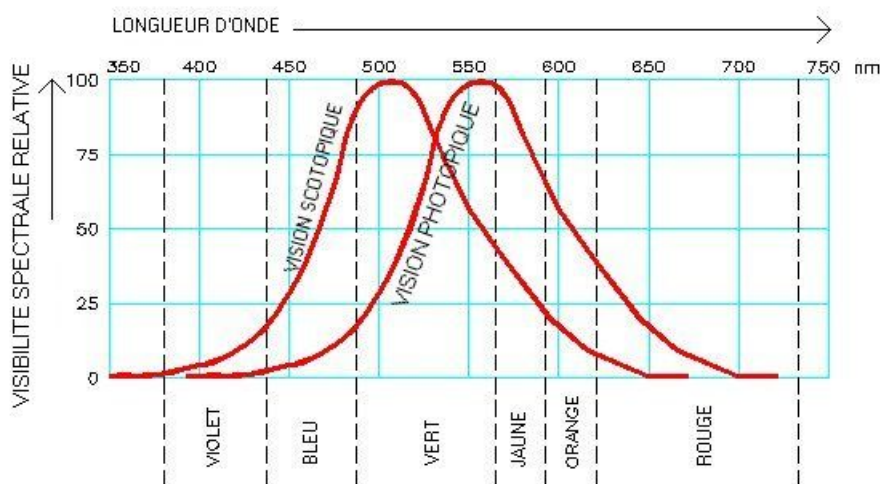


Figure 4.6.- Courbes de visibilité spectrale relative de l'œil humain

La courbe de visibilité spectrale relative en vision photopique V_λ est la référence qui permet de passer d'un flux énergétique pour une longueur d'onde λ déterminée au flux monochromatique lumineux. En effet la sensibilité spectrale maximum de l'œil pour une longueur d'onde de $0,55 \mu\text{m}$ est de 680 lm/W . Cette constante notée K représente l'efficacité lumineuse maximum de l'œil humain. Ainsi pour un flux énergétique Φ_λ , le flux lumineux associé F_λ sera :

$$F_\lambda = K \Phi_\lambda V_\lambda$$

3.2 Sensibilité temporelle de la vue

En général les sens tendent à s'adapter aux stimuli constants ou aux valeurs moyennes des grandeurs qu'ils évaluent. Pour s'adapter à un changement de conditions de luminance moyenne du champ visuel, l'œil a besoin d'un certain temps d'adaptation variable selon qu'il s'agisse du passage de l'obscurité à la lumière ou de l'inverse. Ces constantes de temps sont très différentes, on considère généralement qu'il faut environ 30 minutes pour une bonne adaptation à l'obscurité et seulement 30 secondes pour le passage de l'obscurité à la lumière. En réalité on devrait considérer que ces courbes d'adaptation sont des exponentielles décroissantes avec une réponse rapide dès les premiers instants, mais une amélioration lente de la vision avec le temps. Ainsi, pour une adaptation parfaite à l'obscurité, des heures sont nécessaires, mais les premiers instants sont les plus importants.

Pour la conception architecturale, ce phénomène est primordial du fait que la perception correcte de la lumière dépend davantage de l'équilibre des luminances dans le champ visuel que de leur niveau absolu, de par l'adaptation de la vue au niveau à partir de luminances faibles (de l'ordre de 50 cd/m^2 jusqu'à 25.000 cd/m^2). Pour cette raison, l'équilibre des luminances que l'utilisateur en mouvement va rencontrer dans les espaces architecturaux est plus important que le niveau moyen lui-même, et on devra favoriser les transitions lentes.

3.3 La perception spatiale de l'œil humain

Comme le représente la figure 4.7, l'œil humain a un champ visuel à peu près hémisphérique (2π stéradians), avec un angle solide central beaucoup plus petit pour la vision précise qui correspond en fait à la position de la cornée sur la rétine. Aux limites extérieures du champ visuel, la vision devient floue, perdant rapidement la perception des formes et conservant par contre très bien la perception des mouvements.

En temps normal, nos yeux sont animés d'un mouvement perpétuel faisant en sorte que la vision précise passe d'un objet à un autre, le champ visuel étant globalement contrôlé par la périphérie de la rétine. Les mouvements de la tête complètent les possibilités de perception visuelle de l'espace qui nous entoure, mais il reste toujours une zone postérieure imperceptible par la vue et qui nécessite l'aide de l'ouïe pour nous permettre de contrôler vraiment l'espace qui nous entoure. Pour cette raison, et tout particulièrement dans les locaux où l'acoustique n'est pas très bonne, la position relative des personnes par rapport à l'espace qu'elles occupent peut devenir quelque chose d'important.

La position des objets qui nous entourent se définit par la vision en dirigeant la tête et les yeux vers ceux que nous observons. L'action des muscles informe le cerveau de la direction d'observation par rapport à notre corps à partir de l'expérience acquise et mémorisée.

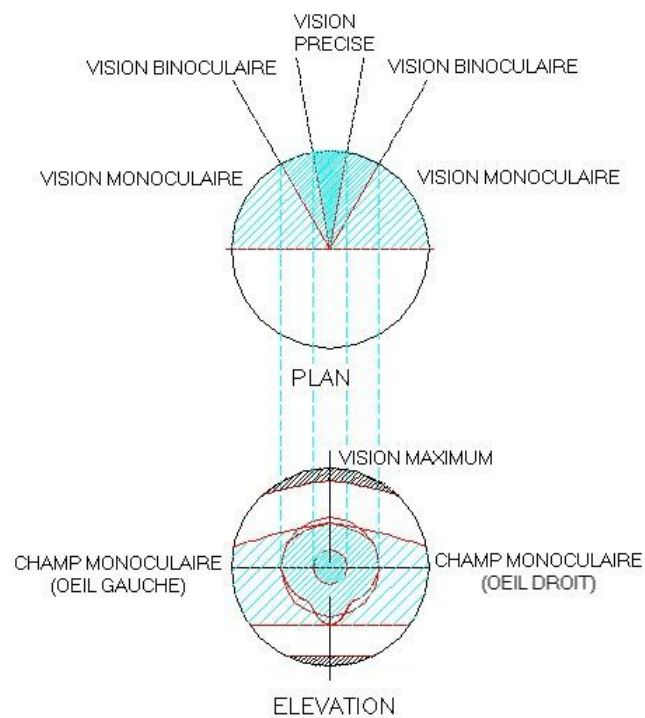


Figure 4.7.- Plan et élévation du champ visuel

L'appréciation de la distance est plus complexe et plusieurs mécanismes interviennent alors : d'une part la déformation du cristallin pour la mise au point de l'image permet l'évaluation de distances très courtes, d'autre part la vision binoculaire par l'interprétation des différences entre les images reçues par chaque œil permet le positionnement relatif des objets dans le champ visuel alors que la convergence des yeux nous aide à apprécier les distances. Finalement, c'est par un processus d'apprentissage que nous pouvons apprécier les distances à partir des tailles relatives des objets et des

expériences antérieures. Le seul inconvénient est que ce système est peu fiable, surtout dans des espaces nouveau ou d'échelle différente de la normale. Cet effet a été utilisé souvent en architecture pour produire des sensations particulières chez le spectateur ou l'utilisateur.

3.4 Le confort visuel

On entend par confort visuel la facilité d'observation ou l'absence de gêne dans un environnement déterminé. Interviennent dans ce concept des facteurs qui peuvent stimuler d'autres sens, aussi bien que des éléments difficiles à identifier isolément. De façon classique, on évalue cependant le confort de chaque sens de façon indépendante, et c'est bien évidemment le cas de la vue.

Il est important de distinguer ici les paramètres ou les variables d'état physiques qui caractérisent l'état d'un environnement, de leur interprétation en terme de confort par l'usager. Le confort ressenti dépendra bien évidemment des deux et de leur relation, mais bien que la conception architecturale soit ici essentielle, les caractéristiques de l'usager (âge, type d'activité, condition sociale,...) seront déterminantes pour adapter la conception à ses objectifs propres.

Eclairement :

La commodité d'interprétation visuelle dépend logiquement de la facilité de perception des détails de l'objet sous notre regard. En ce sens, la première condition est d'avoir un éclairage suffisant pour que notre acuité visuelle nous permette de percevoir sans effort les éléments intéressants. Ainsi, le premier paramètre permettant de qualifier une ambiance lumineuse sera le niveau d'éclairage, qui devra correspondre à la tâche visuelle à effectuer. On a ainsi des recommandations internationales de niveaux d'éclairage pour un certain nombre de tâches correspondant à des activités professionnelles ou personnelles.

Eblouissement :

Bien que considéré comme un "paramètre de confort", l'éblouissement est essentiellement un élément d'inconfort créé par un contraste excessif des luminances situées dans le champ visuel. En général, cet effet est dû à l'existence dans le champ visuel d'une luminance relativement basse, d'une tache de luminance importante souvent liée à la présence d'une source lumineuse ou à la réflexion spéculaire sur une surface polie.

Dans la conception architecturale, l'éblouissement par adaptation est le plus fréquent. Il se produit quand l'œil doit s'adapter sans cesse à un champ de luminances très hétérogène, avec des extrêmes qui sont hors de la capacité d'adaptation visuelle, et qui de ce fait ne peuvent être visualisés.

Une autre classification des divers types d'éblouissement peut également être faite en considérant la position du rayon lumineux gênant impactant l'œil. On distingue ainsi l'éblouissement direct (aussi appelé incapacitant du fait qu'il ne permet pratiquement aucune vision) de celui qui arrive directement sur la fovéa. Si le rayon arrive sur un autre point de la rétine, on parle d'éblouissement indirect qui peut perturber la vision, mais sans la rendre impossible (on le dénomme également éblouissement gênant ou perturbateur). Il faut remarquer ici que cette classification direct/indirect s'utilise également dans bien des cas pour distinguer les éblouissements produits directement par une source située dans le champ visuel de ceux qui proviennent d'une réflexion sur une surface brillante (par exemple une table revêtu d'une surface vitrée).

L'éblouissement est un phénomène difficile à évaluer précisément, bien qu'on puisse le faire à partir de l'analyse des diverses luminances présentes dans le champ visuel. En première approximation, on recommande comme valeurs acceptables dans un environnement de travail, des contrastes de 1 à 3 entre l'objet observé et son fond proche, de 1 à 5 avec le plan de travail en général, et de 1 à 10 avec les autres surfaces présentes dans le champ visuel. Pour une analyse plus précise, on utilise les concepts suivants :

La constante d'éblouissement, g telle que :

$$g = \frac{L_s^a \omega^b f(\theta)}{L_B}$$

avec

L_s : luminance de la source lumineuse

ω : angle solide sous lequel on voit la source depuis l'œil

$f(\theta)$: fonction de pondération qui dépend de la direction d'incidence du rayon issu de la source (1 s'il arrive dans l'axe de l'œil, 0 s'il arrive latéralement)

L_B : luminance du fond

a et b : coefficients dont les valeurs habituelles sont 1.8 et 0.8

La sensation d'éblouissement croît avec l'augmentation de cette constante d'éblouissement g . Comme, de façon subjective, les augmentations de la gêne due à l'éblouissement suivent approximativement une loi sensorielle logarithmique, on définit un indice d'éblouissement G tel que :

$$G = 10 \log_{10} g$$

A partir d'une valeur de $G=10$, l'éblouissement devient perceptible, de 16 à 22 il est supportable, de 22 à 28 il devient inconfortable et pour les valeurs supérieures, il est considéré comme intolérable.

Couleur de la lumière :

Un troisième paramètre de confort visuel est le rendu coloré de la lumière que l'on peut définir à partir de la température de couleur et de l'indice de rendu des couleurs. De plus, on montre que le choix optimal de ces caractéristiques colorimétriques de la lumière dépend aussi des niveaux d'éclairement. L'abaque de Kruithof fournit cette relation. Une lumière froide (de courtes longueur d'onde) est souhaitable pour des niveaux d'éclairements importants alors qu'une lumière chaude (de longueur d'onde plus grande) est plus appréciée pour des niveaux faibles.

A partir de toutes ces caractéristiques, il est ainsi possible de définir en fonction de l'activité et de la tâche visuelle à effectuer, des valeurs recommandées pour l'ensemble des critères énoncés. Les tables 4.1 à 4.5 en fournissent quelques exemples.

Table 4.1

| <i>Tâches visuelles</i> | <i>niveaux d'éclairement moyen</i> |
|---|------------------------------------|
| Activités nécessitant un effort visuel important: dessin de précision, bijouterie 1000 lux | |
| Activités nécessitant un effort visuel soutenu mais de courte durée: dessin, lecture , etc. | 750 lux |
| Activités nécessitant un effort visuel moyen mais de longue durée: travaux généraux, reunions, | 500 lux |
| Activités nécessitant un effort visuel médiocre et de courte durée: stockage, réunion, circulation. | 250 lux |
| — | |

Table 4.2

facteurs modificateurs des valeurs d'éclairement:

| <i>x 0.8</i> | <i>x 1</i> | <i>x 1.2</i> |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|
| Age < 35ans | Age de 35 à 55 ans | Age > 55 years |
| Activité faible | Activité importante | Activité inhabituelle ou critique |
| Tâche facile | Tâche moyenne | Tâche de précision |
| — | | |

Table 4.3

Valeurs de luminance et leurs correspondances en éclairement

| <i>Code visuelle</i> | <i>Luminance (cd m⁻²)</i> | <i>Eclairement horizontal (lux)</i> |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Visage humain très peu visible | 1 | 20 |
| Vision correcte du visage | 10- 20 | 200 |
| Vision normale pour des travaux ordinaires | 100- 400 | 2000 |
| Surfaces de réflectivité >0,2 très éclairées | > 1000 | 20,000 |
| — | | |

Table 4.4

Indices d'éblouissement (G)

| | |
|---|---------------|
| Conditions très critiques (travail difficile, situations dangereuses, etc. Inappréciable < 13 | |
| Conditions de travail de longue durée et de difficulté normale, espaces de repos, etc. | Bas: 13- 16 |
| Conditions de travail léger ou de courte durée, espaces de rencontres, etc. | Moyen: 16- 19 |
| Conditions peu critiques, espaces de passage, occupation de courte durée, etc. | Haut: 19- 22 |
| Absences de contraintes visuelles 22 | Très haut > |

—

Table 4.5

Aspect coloré de la lumière (recommandations suivant l'usage)

| Type d'espace | Conditions | I RC (%) | T _c (K) |
|--|----------------|-------------------------------|--------------------|
| Espace où l'aspect coloré est très important: 2500- 4000 | <i>travail</i> | >85 <i>repos ou séjour</i> | 4500- 6000 |
| Espaces où la couleur est important mais non critique 4000 | | <i>travail</i> | 70- 85 |
| < 4000 | | <i>repos ou séjour</i> | > |
| Espaces où la reconnaissance des couleurs est peu importante 4500 | <i>travail</i> | <70 | > |
| > 4500 | | <i>repos</i> | |
| Espace sans nécessité de vision colorée Indifférente | | | 40 |

—

Effets biologiques

Les besoins lumineux dépendent de deux aspects : la perception visuelle et les effets biologiques. En effet, plus l'éclairage est important, plus il est facile de réaliser des tâches visuelles délicates et pour une même tâche, les gens âgés ont besoin d'un niveau d'éclairage plus important que les jeunes. D'après Lange, l'éclairage maximal accepté par un usager varie entre 2000 Lux(lx) et 4000 lx. Les valeurs minimales sont fournies par des normes (EN 12464).

Depuis la découverte en 2002 d'un troisième récepteur sur la rétine, en plus des cônes et des bâtonnets, on pense que les effets biologiques de la lumière sur le corps humain, que l'on suspecte depuis longtemps, pourraient être évalués concrètement. Comparé à la sensibilité spectrale de l'œil définie précédemment pour des fonctions optiques, la sensibilité de ce nouveau récepteur serait optimale dans les bleus. De plus, des études ont montré que des niveaux d'éclairage supérieurs à 1000 lx influencent l'horloge biologique des êtres humains pour les cycles journaliers et annuels avec leurs périodes de veille et de sommeil, et peuvent donc perturber l'activité du cerveau, le bien

être et la santé. Ces constats nécessitent de nouvelles approches pour définir un bon éclairage.

On définit également des besoins minimum pour les protections solaires et les niveaux d'isolation nécessaires en été pour éviter des températures intérieures trop importantes ou limiter les charges de climatisation tout en essayant de ne pas nuire à l'éclairage naturel. Compte tenu des avancées récentes sur l'impact biologique de la lumière, ces dimensionnement deviennent de vrais enjeux pour la définition des ouvrants de façon à limiter la pénétration solaire directe tout en souhaitant des niveaux d'éclairement importants.

4 L'éclairage naturel en architecture:

4.1 La lumière intérieure et extérieure

A la base, l'architecture résulte d'un antagonisme entre l'intérieur et l'extérieur, entre les espaces protégés et les espaces exposés, entre le contrôle et l'insécurité, entre le domaine privé et la société. Pendant le jour, la lumière naturelle expose totalement l'espace extérieur, remplit tous les recoins et révèle de façon crue la peau des bâtiments dans toute sa dimension, sa forme et ses détails.

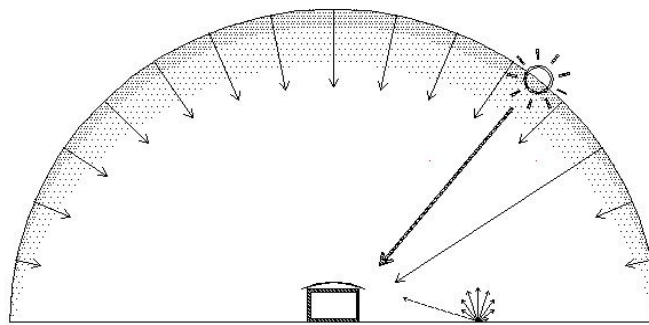
Ainsi, très fréquemment, l'architecture pour laquelle la lumière est bien traitée a les entrées de lumière en dehors du champ visuel du spectateur, avec des ouvertures hautes souvent situées au dessus de l'entrée. Cette récupération d'une lumière intérieure propre à l'espace considéré a un certain aspect magique du fait que l'on n'identifie pas son origine. Le paysage extérieur est oublié au profit de la réorganisation d'un espace intérieur qui n'est plus secondaire.

Ce discours change radicalement la nuit quand les rôles entre l'intérieur et l'extérieur sont inversés, mais là n'est pas l'objet de notre intervention, bien qu'il nous permette deux commentaires rapides sur la lumière naturelle et artificielle dans l'architecture :

1. En premier lieu, l'architecture et les êtres qui l'habitent sont différents de jour et de nuit. Ainsi essayer d'imiter la lumière naturelle diurne par la lumière artificielle n'a pas de sens, les résultats seront toujours médiocres.
2. Deuxièmement, il est toujours difficile de combiner les deux types de lumière. Cette difficulté est due à leur spectres différents et au fait que l'œil, habitué à des niveaux d'éclairement naturels trouve pauvre et triste une lumière artificielle qui la nuit lui paraîtra parfaite.

Considérant la lumière naturelle dans son action de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment, il faut tenir compte du fait que sa pénétration est conditionnée par son origine qui peut être triple.

Figure 4.8.- Trois types d'origine de la lumière: soleil direct, voûte céleste et albédo du sol



La lumière solaire directe, fréquente dans les pays méditerranéens, est caractérisée par des rayons parallèles, de forte intensité (jusqu'à 100.000 cd/m^2) qui génèrent dans les espaces intérieurs des taches lumineuses de contour nets dont la position géométrique varie avec la position du soleil dans la voûte céleste. Il s'agit d'une lumière qui crée des conditions visuelles intérieures peu confortables par excès de contraste et qui peut de plus très facilement générer des surchauffes au sein des espaces intérieurs. Son action thermique et sa répartition de luminance très spéciale sont bénéfiques en hiver dans les climats rigoureux, mais peuvent être très désagréables en été ou dans des climats plus chauds.

La lumière issue de la voûte céleste est la plus fréquemment utilisée dans les climats atlantiques et nordiques qui correspondent à des ciels le plus souvent couverts, encore qu'il faille tenir compte des ciels clairs pour les directions opposées au soleil. Il s'agit d'un éclairage plus faible (de 5 à 10% de celui correspondant au soleil direct) et qui présente un caractère diffus. Cette lumière est souvent celle que l'on utilise pour les conditions de base, mais il faut être conscient que dans les climats chauds, même privée du rayonnement solaire direct, elle peut créer des problèmes de surchauffe.

La lumière réfléchiée par les surfaces extérieures, également appelée albédo, peut devenir importante quand les deux autres sources sont faibles, soit qu'elles soient éliminées pour éviter des surchauffes, soit que la configuration du local ne permet pas l'accès direct à la lumière du ciel. Dans ces circonstances, et dans le cas où les surfaces extérieures, le sol et les autres bâtiments ont des réflectivités importantes, la lumière réfléchiée peut donner des éclairages intérieurs utiles en tenant toujours compte du fait que cette lumière ne provenant pas du haut peut générer des phénomènes d'éblouissement.

4.2 La perception de la lumière en architecture

Quand un architecte imagine l'architecture qu'il commence à projeter, il représente mentalement les formes du bâtiment auquel il pense, depuis des visions générales de formes et de volumes, jusqu'à des détails concrets de ses façades.

Connaissant les œuvres des maîtres de l'architecture antique et contemporaine, on peut comprendre comment, dans la majorité des cas, la lumière naturelle était présente depuis les premières images du projet qu'ils concevaient.

Il est intéressant d'observer les différentes perceptions de la lumière naturelle qu'ont eu ces grands projeteurs. En laissant de côté la connaissance plus ou moins importante qu'ils avaient des principes de base de la photométrie, et sans mettre en exergue les résultats obtenus, on peut cependant apprécier comment chacun a conçu intuitivement le phénomène lumineux de manière distincte et comment cela reflète le fait que la lumière définit et modèle les espaces de leur architecture.

Très fréquemment, la lumière est imaginée comme un fluide, comme un liquide ou comme un gaz qui se répand et occupe tout l'espace extérieur et qui pénètre ou s'immisce selon les cas dans les espaces intérieurs.

Pour certains, la lumière s'interprète comme des rayons dans une image presque mythologique de force céleste qui traverse l'espace, pénètre à l'intérieur et rebondit sur les surfaces, leur donnant réalité par son action.

Dans d'autres cas enfin, la lumière naturelle écrit un jeu impressionniste à l'intérieur, les taches de lumière indépendantes se fondent seulement dans l'esprit de l'observateur avec la perception globale de l'espace. Dans ce cas, les couleurs jouent un rôle décisif et les éléments modifient la tonalité de la lumière qu'ils reçoivent.

4.3 L'éclairage des zones intérieures et périphériques

Pour poser le problème de l'utilisation de la lumière dans l'architecture, le premier point à considérer est la problématique de sa pénétration à l'intérieur d'espaces. En principe, étant séparés de l'extérieur par une façade, ils seraient obscurs. Seule la création d'ouvertures dans l'enveloppe d'un bâtiment permettra l'entrée de la lumière, de façon toujours limitée et contrôlable.

Dans n'importe quel bâtiment, on peut distinguer deux problèmes distincts. L'éclairage des zones ou des locaux périphériques, qui sont en contact avec la peau du bâtiment et qui peuvent ainsi avoir un accès direct à la lumière naturelle ; et les zones ou locaux centraux sans contact avec l'enveloppe, où le seul moyen d'accéder à la lumière sera à travers l'ajout d'un système de transport jusqu'à la zone intérieure.

Cependant, avant de traiter de systèmes concrets d'application à la périphérie ou au noyau, nous considérerons quelques caractéristiques générales du projet architectural qui ont des répercussions sur son comportement lumineux.

La compacité :

Un premier aspect à considérer est la compacité du bâtiment, qui établit une relation entre la surface de l'enveloppe du bâtiment et son volume, soit le

degré de concentration des espaces intérieurs. Logiquement, les bâtiments les moins compacts offriront de plus grandes possibilités d'éclairage naturel en réduisant de façon significative la zone centrale où il est plus difficile de faire pénétrer la lumière.

La porosité :

Un autre paramètre à considérer est la porosité du bâtiment, qui se réfère à l'existence au sein de son volume global d'espaces vides communicant avec l'extérieur, comme les patios par exemple. Un certain niveau de porosité correspond à une possibilité de créer un accès à la lumière (et aussi à la ventilation) dans les zones centrales d'un bâtiment.

La transparence :

La transparence à la lumière de la peau de l'édifice est un élément supplémentaire à considérer, qui peut aller de l'opacité la plus complète jusqu'à des façades totalement vitrées. Bien qu'une transparence importante augmente essentiellement les niveaux d'éclairage dans les zones périphériques, un bon éclairage résultera surtout d'une répartition harmonieuse de la lumière plutôt que de sa quantité. Souvent, les risques d'éblouissement rendent inadéquates l'éclairage naturel par de grandes ouvertures.

Les caractéristiques géométriques :

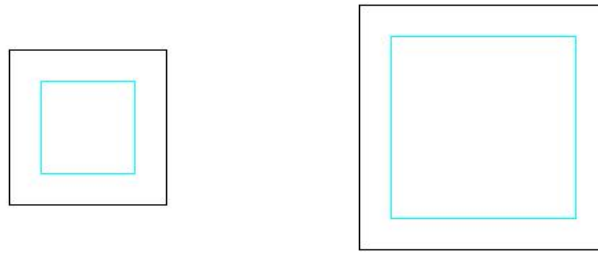
Il est également nécessaire de tenir compte des caractéristiques géométriques des espaces intérieurs. Les locaux peuvent s'analyser par leur taille, leur forme, leurs proportions et les différences de niveau qu'ils peuvent avoir entre eux.

• La taille :

La taille d'un local n'a pas en principe d'incidence sur la répartition de la lumière à l'intérieur, des espaces de forme identiques mais de taille différentes possédant des ouvertures respectant le même rapport d'échelle bénéficieront de la même distribution de lumière. Comme tous les phénomènes radiatifs en général et les phénomènes lumineux en particulier, ceci permet l'étude précise à l'aide de maquettes. Il faut simplement se rappeler que pour les espaces de grande surface au sol, il faudra donner des hauteurs importantes pour éviter des zones centrales obscures (Figure 4.9).

Figure 4.9.- Zone centrale obscure dans les espaces de grande surface au sol.





- La forme et les proportions :

La forme et les proportions d'un local sont des paramètres importants pour la qualité de son éclairage naturel en fonction de la position de l'ouverture. En général, les espaces irréguliers ou qui vont en s'élargissant à partir de l'ouverture où pénètre la lumière naturelle, conduisent à une répartition peu homogène comme le montre la figure 4.10.

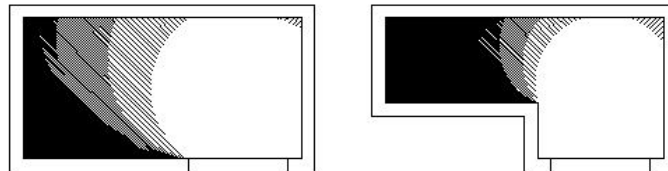


Figure 4.10.- Relation entre la forme et la distribution de la lumière naturelle

Il est nécessaire de prendre en compte le fait que la pénétration latérale de lumière dans un espace produit une décroissance rapide des niveaux d'éclairement quand on s'éloigne de l'ouverture, à cause d'une diminution rapide du facteur de forme du ciel vu de l'intérieur. Ceci fait que les zones et les locaux périphériques sont souvent mal éclairés bien que les niveaux d'éclairement soient globalement suffisants. C'est pour cette raison que l'éclairage zénithal est bien souvent le plus adéquat.

5 Amélioration de l'éclairage naturel dans les bâtiments

5.1 Éléments de transmission

Ce sont les espaces qui ont un contact direct avec un premier élément qui permet le passage de la lumière naturelle provenant de l'extérieur. Ils reçoivent la lumière et la conduisent jusqu'à l'élément de passage suivant et ainsi de suite. La forme propre de ces éléments est très importante au moment de les caractériser, car leur capacité à transmettre ou conduire la lumière dépend en grande partie de cette caractéristique géométrique.

De plus, les caractéristiques et la finition de leurs surfaces sont également primordiales car c'est sur celles-ci que la lumière sera reçue et c'est bien elles qui donneront le comportement lumineux selon qu'il s'agisse de surfaces à réflexion spéculaire, diffuse ou au contraire absorbantes.

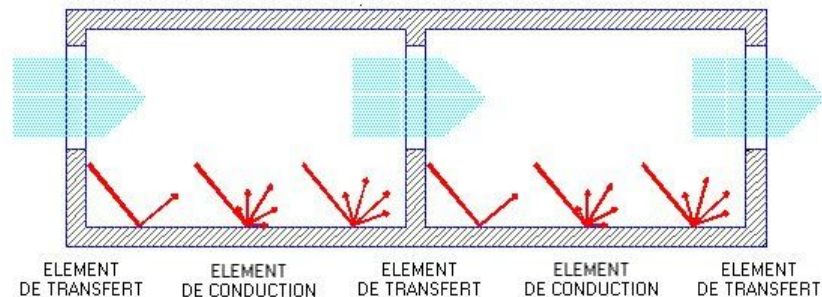


Figure 4.11.- Eléments d'éclairage naturel: éléments conducteurs et de transmission

5.1.1 Espaces lumineux intermédiaires

Ils sont situés dans la zone périphérique du bâtiment, et forment des tampons entre l'espace extérieur et les espaces habitables. Ils peuvent correspondre à des éléments régulateurs entre les caractéristiques des ambiances extérieures et intérieures. On les ferme par des éléments transparents ou translucides et ils peuvent intégrer des systèmes de contrôle, de façon à réguler l'apport lumineux et/ou énergétique. Les éléments les plus représentatifs de cette catégorie sont les galeries, les porches ou les serres.

5.1.2 Espaces lumineux intérieurs

Ils font partie de la zone interne d'un bâtiment et conduisent la lumière qu'ils reçoivent vers les espaces habitables intérieurs éloignés de la périphérie du bâtiment. On peut intégrer dans ce groupe les patios, les atriums et tous les systèmes appelés tubes de lumière ou de soleil.

5.2 Composants intérieurs et périphériques

Ce sont des dispositifs ou des ensembles d'éléments qui permettent de connecter entre elles deux ambiances lumineuses séparées par une paroi où se situe le composant. Ils sont définis par leurs caractéristiques géométriques telles que leur taille relativement à la paroi dans laquelle ils sont implantés, leur emplacement dans la paroi (haut, bas, central ou latéral) et la forme de l'ouverture. Leur composition dépend des éléments contenus pour contrôler et réguler les actions lumineuses, visuelles et de passage de l'air.

5.2.1 Composants de pénétration latérale de la lumière

Ils sont situés dans les parois verticales, aussi bien dans la peau du bâtiment que dans des cloisons intérieures, et ils relient deux ambiances de caractéristiques différentes pour permettre la pénétration latérale de la lumière dans l'espace récepteur. Les plus caractéristiques sont les fenêtres, les balcons, les murs translucides et les murs rideaux.

5.2.2 Composants de pénétration zénithale de la lumière

Situés au sein des parois horizontales de la couverture ou de l'intérieur d'un bâtiment, ils relient des ambiances lumineuses différentes en permettant le passage de la lumière zénithale vers le local récepteur situé au dessous de la paroi. Les plus caractéristiques en architecture sont les lucarnes, les couvertures transparentes ou en dents de scie, les lattis translucides et les claires-voies, les coupoles et les lanternes.

5.2.3 Composants de pénétration globale

Le composant le plus caractéristique de ce type est la membrane, translucide ou transparente, qui entoure globalement une ambiance intérieure. Ces dispositifs permettent l'entrée généralisée de la lumière et créent un niveau d'éclairement élevé et uniforme, proche des conditions extérieures.

5.3 Eléments de contrôle

5.3.1 Eléments séparateurs

Se sont des éléments de matériaux transparents ou translucides, qui s'incorporent à un composant de pénétration de la lumière reliant deux ambiances déterminées. Ils permettent le passage de la lumière et parfois la vision extérieure tout en empêchant les transferts aérauliques. Parmi les nombreux types d'éléments séparateurs qui existent en architecture, on trouve les éléments transparents conventionnels, ceux dont les surfaces sont traitées chimiquement ou mécaniquement, ceux qui ont une certaine forme géométrique et ceux inclus dans les parois actives.

5.3.2 Ecrans souples mobiles

Ce sont des éléments qui peuvent limiter partiellement ou totalement la transmission du rayonnement solaire et rendent diffuse la lumière qui les traverse. Selon leur intégration, ils peuvent permettre ou non la ventilation et préserver la privauté visuelle. En général ils peuvent s'éliminer soit par enroulement, soit par pliage, pour supprimer leur action si nécessaire. Les formes les plus communes sont les toiles et les rideaux extérieurs.

Les toiles et les rideaux sont généralement constitués de matériau opaques ou au moins diffuseur de la lumière. Ils peuvent être situés sur la face extérieure d'un élément permettant le passage limité de la lumière, ou bien sur la face

intérieure d'un élément séparateur pour limiter dans l'espace concerné la lumière qui a déjà traversé le composant.

5.3.3 Ecrans rigides

Ce sont des éléments opaques qui peuvent rediriger la lumière par réflexion ou tout simplement limiter son passage. Généralement ils sont fixes et non réglables, bien qu'il existe des exceptions. Leur caractéristique principale est en fait leur position par rapport à l'ouverture qu'ils protègent. Parmi les différents types, on peut considérer les casquettes, les consoles, les appuis de fenêtre, les ailettes et les réflecteurs.

5.3.4 Les filtres solaires

Ce sont des éléments superficiels qui peuvent recouvrir tout ou partie d'un élément de la surface extérieure d'une ouverture, le protègent du rayonnement solaire et permettent la ventilation. Ils peuvent être fixes ou mobiles, réglables quand on peut changer l'orientation des lames qui les composent. Les types les plus courants en architecture sont les persiennes de tout type et les jalousies.

5.3.5 Les obturateurs solaires

Ce sont des éléments superficiels construits avec des matériaux opaques à la lumière et qui peuvent équiper une ouverture pour la fermer complètement si nécessaire. On les appelle généralement volets ou contre-fenêtres et ils peuvent être situés soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du vitrage.

6 Les conditions de ciel

6.1 Luminance du ciel

Les conditions de luminance du ciel sont des caractéristiques fondamentales à considérer pour étudier le potentiel d'un site. Le climat local en est un paramètre important avec notamment la nébulosité.

Il existe différents modèles possibles de luminance du ciel à prendre en compte comme données de site d'un lieu déterminé. En général on prend comme cas le plus défavorable les conditions de ciel couvert et c'est le seul cas étudié. Ceci est logique dans les climats du nord, mais l'est moins dans les climats tempérés ou l'on devrait prendre en compte également le cas du ciel nuageux ou dégagé, ainsi que la position du soleil pour contrôler de manière efficace aussi bien les protections que les apports solaires.

Il faut tenir compte du fait que les climats méditerranéens ont des conditions de soleil direct beaucoup plus fréquentes (70% du temps) que les climats plus

nordiques (30% du temps), chose que l'on oublie assez souvent quand on étudie l'éclairage naturel des bâtiments.

6.1.1 Ciel couvert uniforme

Il s'agit du premier modèle utilisé dans les études d'éclairage naturel, il se caractérise par une luminance uniforme. Dans ce cas, la relation entre la luminance uniforme du ciel et l'éclairement d'une surface horizontale sans obstruction de quelque sorte que ce soit sera :

$$E_h = \pi L$$

avec: E_h : éclairement du plan horizontal (lux)

L : luminance moyenne du ciel (cd / m²)

Table 5.6: valeurs de luminance de la voûte céleste pour une latitude de 40° pour différentes conditions climatiques et époques de l'année (Cd/m²)

| Heures | Solstice d'hiver | | | Equinoxes | | | Solstice d'été | | |
|-----------|------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|----------------|--------|--------|
| | 08:00 | 10:00 | 12:00 | 08:00 | 10:00 | 12:00 | 08:00 | 1:00 | 12:00 |
| | 16:00 | 14:00 | | | 16:00 | 14:00 | | 16:00 | 14:00 |
| Luminance | 1,750 | 3,200 | 4,700 | 3,200 | 4,600 | 6,200 | 6,000 | 7,600 | 8,600 |
| | 4,600 | 21,000 | 24,000 | 22,000 | 28,000 | 30,000 | 27,000 | 31,000 | 32,000 |

Les valeurs de la ligne supérieure correspondent à des luminances moyennes par ciel couvert alors que la ligne inférieure correspond à un ciel clair. En général on prend comme valeur minimale sous nos latitudes un ciel couvert avec 3.200 cd/m², qui correspond à un éclairement de 10.000 lux sur un plan horizontal sans obstruction.

6.1.2 Ciel couvert standard C.I.E

C'est le modèle de ciel couvert standard qui est le plus proche de la réalité. Pour celui-ci, la luminance varie avec l'altitude et sa valeur au zénith est trois fois plus élevée qu'à l'horizon. Cette relation de définition de la luminance en fonction de la hauteur est connue sous le nom de formule de Moon & Spencer:

$$L_\alpha = L_z \frac{(1 + 2 \sin \alpha)}{3}$$

avec: L_α : luminance du ciel à une hauteur angulaire α par rapport à l'horizontale

L_z : luminance zénithale

Si on fait l'intégration sur l'ensemble de la voûte céleste, on montre que la luminance zénithale L_z est égale à 9/7 de la luminance moyenne du ciel uniforme.

Une autre correction qui devrait être systématiquement apportée est la variation de la luminance du ciel suivant l'orientation, qui peut être prise en compte non seulement pour le ciel clair ou nuageux, mais aussi pour le ciel couvert. Cette variation de la luminance peut se représenter simplement pour la luminance de l'horizon par un accroissement de 20% quand on regarde vers l'équateur et une diminution de 20% quand on s'oriente vers le pôle. Ces variations diminuent quand la hauteur augmente, pour s'annuler au zénith. L'expression de Moon & Spencer corrigée pour tenir compte de ces variations s'écrit :

$$L_{\alpha, \beta} = \frac{(L_z(1 + 2 \sin \alpha))}{3(1 + 0,2 \cos \beta)}$$

avec: $L_{\alpha, \beta}$: luminance du ciel pour un azimut β par rapport à la direction de l'équateur et une hauteur α par rapport à l'horizontale

L_z : luminance au zénith

6.1.3 Ciel clair

Dans le cas du ciel clair, la meilleure stratégie consiste à ne considérer que le rayonnement direct du soleil, avec une luminance de l'ordre de 100.000 cd/m² et une position qui correspond à l'heure et au jour. De plus, il faut alors considérer aussi comme sources indirectes le reste de la voûte céleste et l'albédo du sol ou des surfaces extérieures proches.

Avec un ciel clair la luminance de la voûte céleste décroît à mesure que l'on s'éloigne du soleil, avec des valeurs qui peuvent varier entre 2000 et 9000 cd/m².

On prend comme valeur typique de luminance de l'albédo le rayonnement réfléchi par les surfaces.

$$L_a = \rho E_h / \pi$$

avec: L_a : luminance de l'albédo

E_h : éclairement des surfaces considérées (les valeurs peuvent atteindre 100.000 lux pour un ciel clair)

ρ : réflectivité des surfaces

6.1.4 Ciel nuageux

Pour le ciel nuageux, entre ciel clair et ciel couvert, il faut faire des hypothèses qui correspondent à cette situation intermédiaire entre les cas précédents. En fait, si on connaît les deux situations extrêmes, il n'est pas nécessaire de connaître l'effet de ce type de ciel, sinon d'avoir sa fréquence d'apparition pour chaque époque de l'année.

7 Evaluation de la lumière naturelle en architecture:

L'objectif d'une méthode de dimensionnement de l'éclairage naturel dans un projet de bâtiment est de déterminer finalement les flux lumineux présents dans l'ambiance intérieure ainsi que leur distribution.

En éclairage naturel il existe tant d'incertitudes dans les facteurs qui déterminent les caractéristiques de l'ambiance lumineuse intérieure que les moyens d'évaluation demeurent peu précis. Le calcul permet la détermination des conditions intérieures en relation avec celles rencontrées à l'extérieur, que nous savons très variables dans le temps. C'est une des raisons pour lesquelles on a l'habitude de présenter les résultats obtenus en terme de pourcentage par rapport aux niveaux d'éclairement extérieurs. Ce sont les facteurs de lumière du jour ou "*Daylighting Factors*" (DF) :

$$DF = \frac{100 \times E_i(\text{intérieur})}{E_e(\text{extérieur})}$$

Les systèmes de représentation de l'éclairage naturel intérieur peuvent résulter d'une détermination manuelle point par point ou d'une simulation numérique. Le système de représentation de la lumière résultante pourrait se faire à partir de n'importe quelle méthode pouvant fournir des valeurs point à point. Si on réalise un maillage superficiel du local, on peut alors tracer des courbes d'égal éclairement (courbes isolux) ou d'égale luminance. Ces courbes semblables à des courbes de niveau fournissent une information visuelle de bonne qualité sur la répartition de la lumière dans l'espace considéré.

La figure 4.12 donne un exemple de représentation.

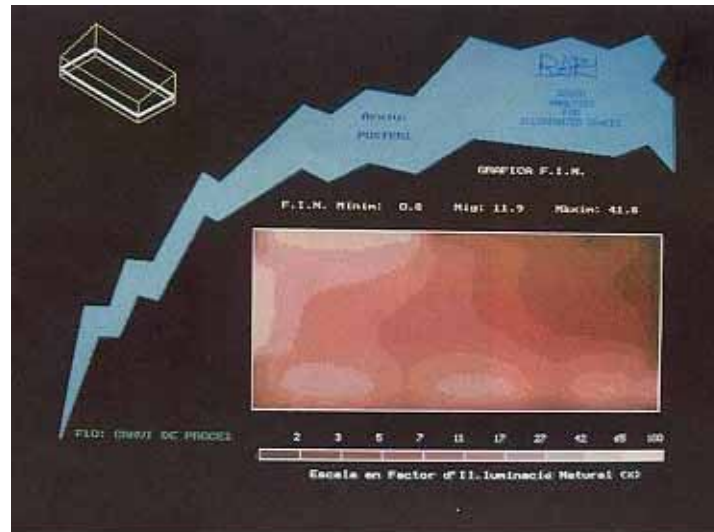


Figure 4.12.- Exemple de représentation de champ lumineux

On peut classer les méthodes d'évaluation de l'éclairage naturel en méthodes de prédimensionnement, méthodes point à point et méthodes de simulation numérique. Pour être exhaustif, Il faudrait ajouter les méthodes d'évaluation qui utilisent des maquettes à échelle réduite.

7.1 Méthode de pré- dimensionnement

Le résultat obtenu est la valeur moyenne de l'éclairage sur un plan utile situé généralement à la hauteur d'un plan de travail dans un espace intérieur. La formulation est la suivante :

$$E_i = \frac{E_e S_{pas} v t u}{S_l}$$

avec: E_i :éclairement du plan utile en lux

E_e : éclairage moyen extérieur sur un plan horizontal en lux (Normalement, on prend dans ce type de calcul 10.000 lx pour un ciel couvert d'hiver et 100.000 lx pour un jour dégagé d'été)

S_{pas} : surface brute des ouvertures permettant le passage de la lumière en m^2

v : facteur d'ouverture ou angle solide sous lequel on voit le ciel depuis l'ouverture divisé par l'angle solide total de l'hémisphère (2π),

τ : transmittivité global de la paroi transparente

u : facteur d'utilisation (rapport du flux arrivant sur le plan utile au flux total entrant par l'ouverture), valeur comprise entre 0,2 et 0,65

S_i : surface du plan utile en m^2

7.2 Méthode de calcul point à point

Cette méthode permet le calcul de l'éclairage résultant pour chaque point choisi dont l'ensemble forme un maillage régulier (en général de l'ordre du mètre) et pour chaque ouverture considérée comme une source d'émission diffuse. Les relations qui s'appliquent ici définissent l'éclairage à partir de l'intensité :

$$E = \frac{I \cos \alpha}{d^2}$$

avec: E : Eclairage résultant en lux

I : intensité du rayonnement incident en candelas

α : angle d'incidence mesuré entre la normale à la surface et le rayon incident

d : distance du centre de l'ouverture au point considéré en m

où,

$$I = L S_o$$

avec: L: luminance de la face interne de l'ouverture en cd / m^2

S_o : superficie de l'ouverture en m^2

et

$$L = \frac{E_o}{\pi}$$

avec: E_o : éclairage transmis par l'ouverture en lux

$$E_o = E_e v t$$

avec: E_e : éclairage extérieur moyen sur un plan horizontal en lux

v: facteur d'ouverture ou angle solide sous lequel on voit le ciel depuis l'ouverture divisé par l'angle solide total de l'hémisphère (2π)

t : facteur global de transmission de la paroi transparente

Il existe des tables et des abaques graphiques qui permettent le calcul du facteur d'ouverture et de l'éclairage moyen extérieur sur un plan horizontal.

7.3 Méthodes de calcul par simulation numérique

Ces méthodes sont basées sur la modélisation numérique des phénomènes de transfert lumineux. Elles peuvent prendre en compte les caractéristiques radiatives et spatiales des sources et de chaque surface. Elles permettent de calculer de façon précise les champs d'éclairement et de luminance dans un local. Souvent couplées à des méthodes infographiques, elles permettent une visualisation réaliste des scènes lumineuses.

Méthodes d'évaluation à l'aide de maquettes

Pour un projet architectural, une autre façon d'évaluer la qualité des ambiances lumineuses, qui a une longue tradition d'utilisation, est l'utilisation de maquettes à échelle réduite. Les phénomènes de transfert radiatif ayant la particularité essentielle de respecter les facteurs d'échelle géométrique, ces méthodes sont très utilisées.

Les maquettes permettent d'évaluer des configurations réalistes et complexes, ou des formes difficiles à représenter à l'aide d'outils numériques. De plus elles ont l'avantage de visualiser le résultat lumineux obtenu au sein de l'espace projeté. Elles permettent aussi l'utilisation de ciels réels ou artificiels.

Quoi qu'il en soit, il faut être conscient que n'importe quel outil d'évaluation, qu'il soit manuel, informatiques ou à l'aide de maquettes, ne remplacera jamais l'implantation correcte d'un projet qui dépend pour l'essentiel de l'approche faite par le concepteur, de sa compréhension et de son interprétation des phénomènes physiques et physiologiques qui définissent la lumière et la vision.

REFERENCES

Coch H. and Serra R. (1994) El disseny energètic a l'arquitectura. Barcelona Edicions UPC

Isalgué Buxeda A. (1995) Física de la llum i el so. Barcelona Edicions UPC

Coch H; Serra R; San Martin R. Arquitectura y control de los elementos (1996) Barcelona Ed. Balmes

Yáñez G; R. Arquitectura solar, aspectos pasivos, bioclimatismo e iluminación natural (1988) Madrid MOPU

W.J. M. van Bommel, G.J. van den Beld: Lighting for Work: Visual and Biological Effects, Philips Lighting, The Netherlands, April 2003.

Lange, H.: Handbuch für Beleuchtung, SLG, LiTG, LTG, NSVV, 5. Auflage (1999).

Berson, D.M., Dunn, F.A., Motoharu, Takao: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, Science, February 8, (2002).

Rea, M.S.: Licht – Mehr als nur Sehen, Lighting Researchcenter, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA,
(<http://www.lrc.edu/programs/lightHealth/pdf/moreThanVision.pdf>)