Guide d'aide à l'interprétation et à l'amélioration des résultats des mesures sous les ciels et soleil artificiels du CSTC

Bodart Magali
Deneyer Arnaud

Centre Scientifique et Technique de la Construction
Division Physique du Bâtiment et Climat intérieur
Avenue Pierre Holoffe 21
B-1342 Limelette
Belgique
Tel : +32 2 655 77 11
Fax : +33 2 653 07 29
Website : www.bbri.be

Université Catholique de Louvain
Architecture et Climat
Place du Levant 1
B-1348 Louvain-la-Neuve
Belgique
Tel : +32 10 47 91 52
Fax : +32 10 47 21 50
Website : http://www-climat.arch.ucl.ac.be

Table des matières

1 FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR ET ECLAIREMENT 3
1.1 Le Facteur de lumière du jour 3
1.1.1 Définition 3
1.1.2 Valeurs recommandées 4
1.1.3 Impression visuelle ressentie 4
1.1.4 Evaluation de l'autonomie en éclairage – calcul des consommations d'éclairage artificiel 6
2 LUMINANCES 8
3 AMELIORATION DU PROJET 9
3.1 Diagnostic 9
3.2 Améliorations – Trop peu de lumière 10
3.2.1 La présence de masques solaires 10
3.2.2 L'inclinaison de la fenêtre 12
3.2.3 Le coefficient de réflexion du sol extérieur (albédo) 13
3.2.4 La taille de l'ouverture 13
3.2.5 La forme de l'ouverture 15
3.2.6 La position de l'ouverture 15
3.2.7 Le coefficient de transmission du vitrage 16
3.2.8 Les dimensions du local 17
3.2.9 L'aménagement intérieur du local 18
3.3 Améliorations – Mauvaise distribution de la lumière 19
3.3.1 La répartition des ouvertures 19
3.3.2 L'agencement des parois intérieures 20
3.3.3 Les matériaux utilisés 20
3.3.4 Les systèmes de distribution lumineuse 21
3.4 Améliorations- Luminances ou rapports de luminance trop faibles ou trop importants 21
4 BIBLIOGRAPHIE 25

1 FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR ET ECLAIREMENT

1.1 LE FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR

1.1.1 Définition

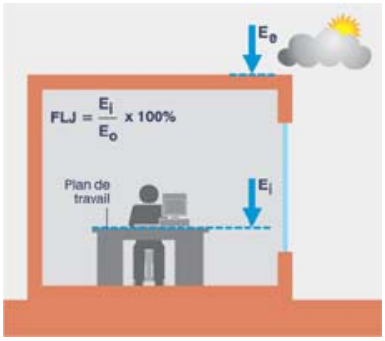

Figure 1 : FLJ

Le facteur de lumière du jour est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point d'un plan de référence à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé, par ciel couvert.

Ces deux valeurs d'éclairement (mesuré par un luxmètre) sont dues à la lumière reçue d'un même ciel dont la répartition des luminances est supposée ou connue, la lumière solaire directe en étant exclue. Le FLJ s'exprime en %.

$$FLJ = \frac{E_{\text{int érieur}} \times 100}{E_{\text{extérieur}}} \text{ (en \%)}$$

Sous les conditions de ciel couvert, les valeurs du facteur de lumière du jour sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison et de l'heure. Elles donnent ainsi une mesure objective et facilement comparable de la qualité de l'éclairement à l'intérieur d'un bâtiment (quelles que soient l'orientation, la localisation et la saison).

Une fois qu'on connaît le facteur de lumière du jour en un point d'un local, on peut calculer l'éclairement atteint en ce point, à n'importe quel moment de l'année, sous des conditions de ciel couvert, à partir de l'éclairement horizontal extérieur.

Au cours des mesures sous ciel artificiel, les éclairements intérieurs et extérieurs sont simultanément mesurés et ce, pour chaque mesure.

La raison pour laquelle l'éclairement extérieur sur une surface horizontale extérieure au modèle est mesuré au cours des essais sous ciel artificiel est qu'elle varie au cours du temps.

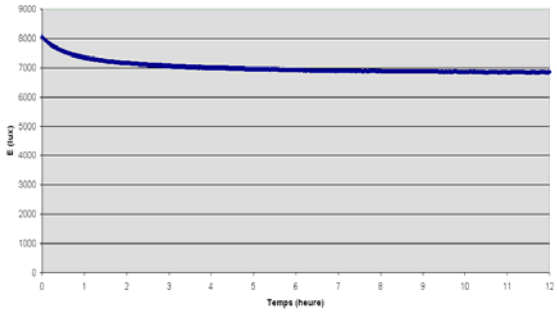

Figure 2 : Eclairement non corrigé d'une surface horizontale mesuré sous la Mirror Box

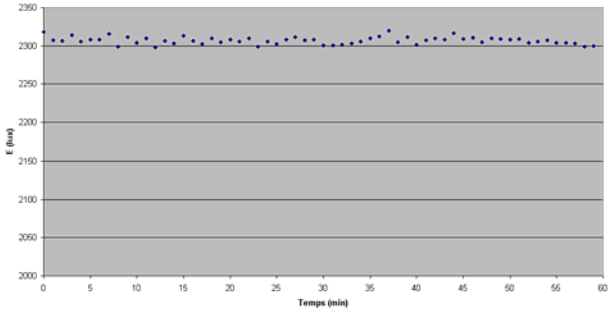

Figure 3 - Eclairement non corrigé d'une surface horizontale mesuré sous le ciel artificiel à une lampe

En effet, au cours des mesures, le flux lumineux délivré par les lampes n'est pas constant. Les tubes fluorescents de la Mirror Box ont un flux qui tend à se stabiliser une fois en régime alors que les lampes halogènes du ciel et du soleil artificiels à une lampe présentent un flux qui varie en fonction de leur temps de fonctionnement (légère diminution) ainsi que de la tension électrique délivrée par l'installation électrique.

La connaissance de la valeur de l'éclairement extérieur pour chaque mesure permet de calculer le facteur de lumière du jour pour chaque cas.

1.1.2 Valeurs recommandées

Les valeurs du FLJ d'un local peuvent alors être comparées aux valeurs de FLJ minimum de référence (voir Figure 5).

1.1.3 Impression visuelle ressentie

La Figure 4 [Rav 1993] donne un aperçu de l'impression visuelle ressentie en fonction de la valeur du facteur de lumière du jour mesurée.

FLJ	- de 1%	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très Elevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance env. 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		

Figure 4

La **Figure 4** donne des valeurs recommandées de facteur de lumière du jour minimum et moyen pour des espaces éclairé naturellement latéralement et dont la lumière du jour est la source principale de lumière durant une grande partie de la journée et pour une grande partie de l'année. Ces recommandations sont données en fonction du type de bâtiment et de local [CIB 1987].

Type de bâtiment	Activité	FLJ moyen (%)	FLJ minimum (%)	Endroit de la mesure
Aéroport et station de bus	Zone de réception	2	0.6	Bureaux
	Douane et zone d'immigration	2	0.6	Comptoirs et bureaux
	Zones de circulation, salons	2	0.6	Plan de travail
Salles de concert et de séminaires	Foyer, auditoire	1	0.6	Plan de travail
	Couloir	2	0.6	Sol
	Escaliers	2	0.6	Sol
Banques	Comptoirs, comptabilité, dactylographie	5	2	Bureaux
	Zones de lecture			
	Zones publiques	2	0.6	Plan de travail
Eglises	Corps de l'église	5	1	Plan de travail
	Chaire, cœur	5	1.5	Bureau
	Autel	5	2	Table
Bureaux de dessin	Général	5	2.5	Sur les tables
L'intérieur des bâtiments en général	Hall d'entrée et zones de réception	2	0.6	Plan de travail
Hôpitaux	Réceptions et salles d'attente	2	0.6	Plan de travail
	Salles de consultation	5	1	Hauteur du chevet
	Pharmacies	5	3	Plan de travail
	Salles de lecture	5	1.5	Tables
Bibliothèques	Etagères (rayonnages)	5	1.5	Plan vertical
Musées et galeries d'art	Général	5	1	Plan de travail
Bureaux généraux	Equipement de bureautique, contrôlé manuellement	5	2	Clavier de contrôle
	Ordinateurs	5	2.5	Clavier
Ecoles	Salles de réunion	1	0.3	Plan de travail
	Salles de classe	5	2	Bureaux
	Salles de cours d'art	5	2	Chevalets
	Laboratoires	5	2	Plan de travail
	Salles des professeurs, locaux communs	5	1.5	Plan de travail
Halls de sport	Général	5	3.5	Plan de travail
Chirurgie (médicale et dentaire)	Salles d'attente	2	0.6	Plan de travail
	Salles d'opération	5	2.5	Plan de travail
	Laboratoires	5	2	Plan de travail
Piscines	Piscine	5	2	Surface de l'eau
	Espaces environnants	1	0.5	Plan de travail
Habitations	Salon et pièces à multiples activités	1.5	0.5	
	Chambres à coucher	1	0.3	
	Cuisine	2	0.6	

Figure 5

1.1.4 Evaluation de l'autonomie en éclairage – calcul des consommations d'éclairage artificiel

Les abaques CIE – Commission Internationale de l'Eclairage (Figure 6) permettent de calculer l'autonomie en éclairage naturel en tout point dont la latitude varie entre 5° et 75° nord. L'autonomie en éclairage est le pourcentage d'heure de la journée (entre 9 et 17 heures dans le cas de ces abaques) pendant lesquelles l'éclairage naturel suffit à lui seul pour apporter l'éclairement nécessaire au local considéré.

Par exemple, pour un bâtiment de bureau situé à Uccle (50.8° Nord). L'éclairement total doit valoir 500 lux. Supposons qu'on mesure un facteur de lumière du jour de 6 % en un point. La valeur d'éclairement extérieur nécessaire pour atteindre 500 lux vaut donc 8333 lux (= 500/0.06).
Si on trace une ligne horizontale à 8333 lux, celle-ci rencontre la ligne verticale correspondant à la latitude au point A. Ce point est situé sur une courbe (non dessinée) qui correspond environ à 73 %.
Ce qui veut dire qu'un point d'un local ayant un facteur de lumière du jour de 6 % disposera de 500 lux pendant 73 % du temps de travail, en moyenne sur l'année.

Notons que cet abaque est relativement pessimiste puisqu'elle ne tient compte que d'un ciel couvert. On peut dire qu'elle convient assez bien pour des ouvertures orientées au nord. Elle n'est pas très satisfaisante mais il n'existe rien d'autre actuellement.

Il est difficile de prévoir les consommations d'éclairage artificiel d'un local en fonction des disponibilités d'éclairage naturel. Les consommations dépendent bien entendu de la disponibilité d'éclairage naturel dans le local mais aussi du système d'éclairage artificiel (tubes TL munis de ballast électronique ou magnétique, lampes halogènes,..) et du mode de gestion de l'éclairage artificiel (dimming en fonction de la lumière naturelle, détection de présence,…). Actuellement, on ne peut pas prédire ces consommations à partir de mesures réalisées en laboratoire. Des travaux sont en cours sur ce sujet.

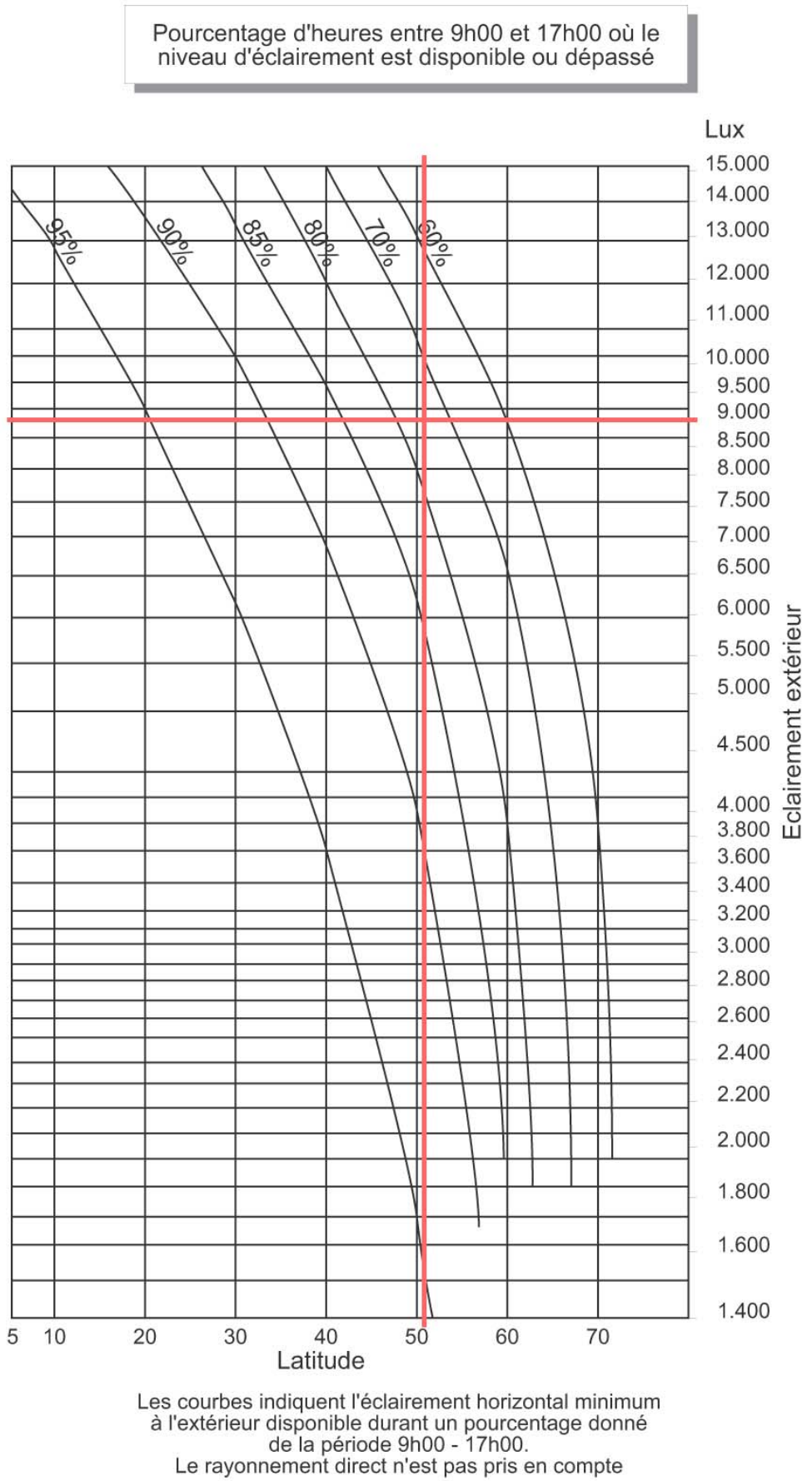
Pourcentage d'heures entre 9h00 et 17h00 où le niveau d'éclairement est disponible ou dépassé
Lux
15.000
14.000
13.000
12.000
11.000
10.000
9.500
9.000
8.500
8.000
7.500
7.000
6.500
6.000
5.500
5.000
4.500
4.000
3.800
3.600
3.400
3.200
3.000
2.800
2.600
2.400
2.200
2.000
1.800
1.600
1.400
95%
90%
85%
80%
70%
60%
Eclairement extérieur
5
10
20
30
40
50
60
70
Latitude
Les courbes indiquent l'éclairement horizontal minimum à l'extérieur disponible durant un pourcentage donné de la période 9h00 - 17h00.
Le rayonnement direct n'est pas pris en compte

Figure 6

2 LUMINANCES

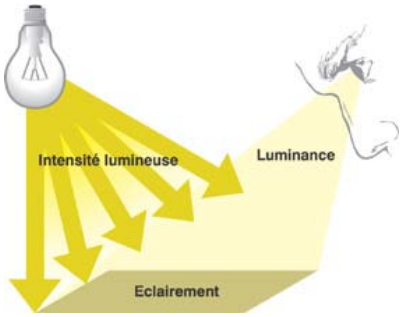

Figure 7 : Luminance

La luminance (mesurée par un luminancemètre) est la quantité qui décrit la clarté d'une surface, comme un mur, un bureau ou une fenêtre translucide. Il est en effet parfois intéressant de mesurer la luminance de surfaces, selon différentes directions du champ visuel d'un observateur, de manière à caractériser l'homogénéité ou la non-homogénéité de l'environnement lumineux.
Il est important de rappeler que la sensibilité de l'œil de l'observateur à la lumière est logarithmique.
Les luminances typiques de surfaces intérieures d'un bâtiment varient entre 1 et 100 cd/m^2 ou entre 100 et 1000 cd/m^2 pour les surfaces d'apparence lumineuse. Les sources lumineuses (ciel, réflexion du soleil sur des éléments de constructions et luminaires), quand à elles, ont une luminance variant entre 1000 à 10000 cd/m^2. Ces sources sont en général éblouissantes si elles se situent dans le champ de vision. Le filament d'une lampe incandescente ou le soleil peuvent atteindre des luminances supérieures à 100000 cd/m^2. [Fon 99]

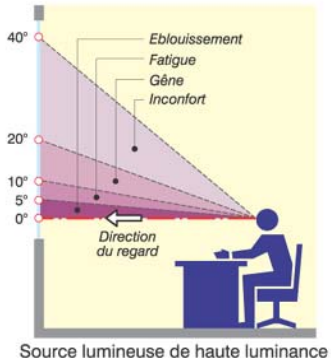

Figure 8 : Luminance

Les mesures de luminances permettent également de repérer les sources éventuelles d'éblouissement se trouvant dans le champ visuel d'un observateur. L'éblouissement apparaît soit lorsque la luminance est trop importante (comme pour lors de la vision directe d'une source), soit lorsque les variations de luminance (dans le temps ou dans l'espace) sont trop fortes.

Les valeurs admissibles sont difficiles à quantifier. Elles dépendent de l'endroit du champ visuel dans lequel elles apparaissent. La Figure 8 montre qu'une source lumineuse intense causera un éblouissement si elle est située dans un angle compris entre 0° et 5° par rapport à la direction du regard alors qu'elle ne causera qu'un inconfort si elle est située dans un angle compris entre 20° et 40 °.

En ce qui concerne les rapports de luminance, la pratique générale veut qu'on prenne les rapports maximaux admissibles suivants :

- 1/3 dans l'ergorama
- 1/10 dans le panorama
- 1/40 dans l'ensemble du local

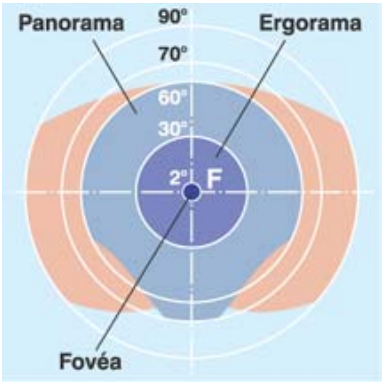

Figure 9 : Champ visuel humain

Il semblerait cependant que ces rapports ne soient pas très satisfaisants. Des études actuelles ont montré qu'ils sont très difficiles à respecter et que leur dépassement n'implique pas toujours des problèmes d'éblouissement. Des études internationales actuelles réalisées au sein de l'AIE tentent de démontrer que ce critère n'est pas ou plus tout à fait d'actualité. Il n'existe actuellement aucun autre critère satisfaisant qui permettrait d'évaluer le confort visuel atteint dans un local à partir de mesures de luminances.

3 AMELIORATION DU PROJET

3.1 DIAGNOSTIC

A partir des mesures (éclairements, FLJ et luminances) réalisées sous le ciel et/ou le soleil artificiels en fonction des désidératas, il s'agit d'évaluer le projet.

Deux axes principaux peuvent être différenciés au niveau de l'analyse :

- Un axe que l'on pourrait qualifier de plus objectif et qui prend en compte les mesures des niveaux d'éclairement, de FLJ et de luminance.
- Un axe que l'on pourrait qualifier de plus subjectif et qui prend en compte l'impression visuelle obtenue.

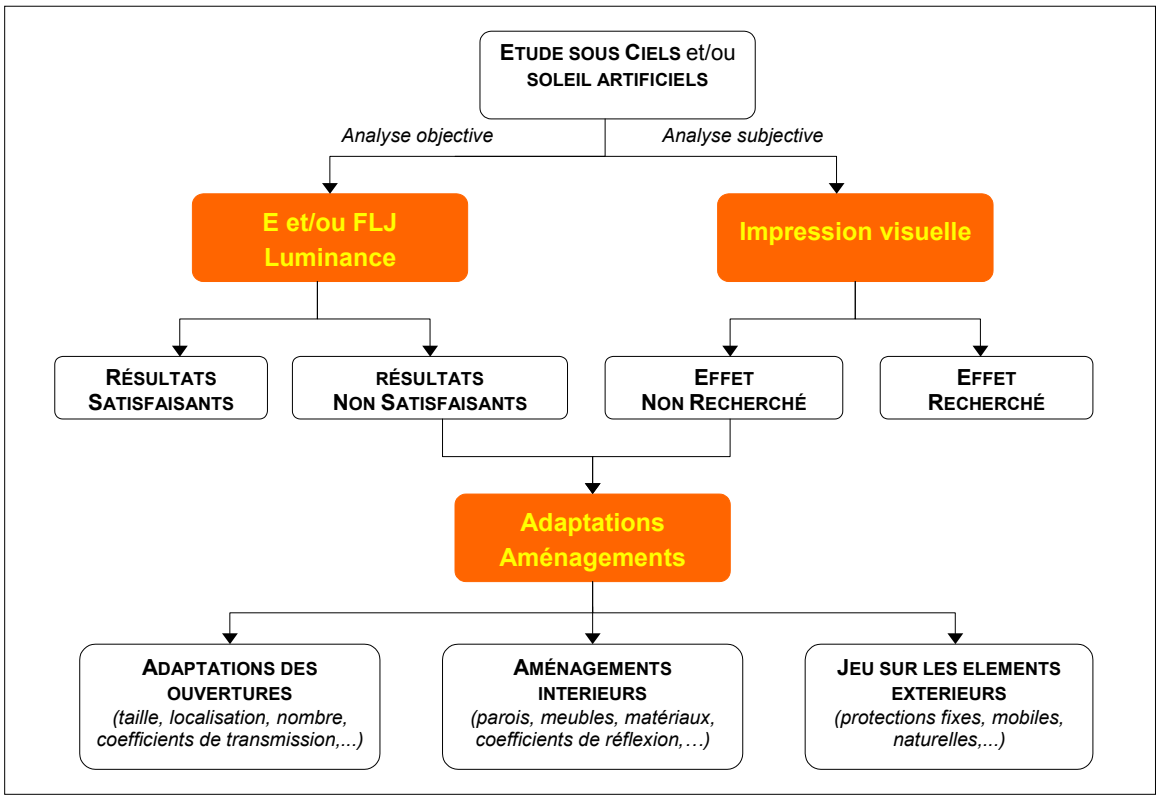

Figure 10 : Schéma d'analyse

Le premier axe intègre un ensemble de valeurs aisément quantifiables que l'on peut mesurer avec les appareils adéquats. Les valeurs obtenues peuvent être comparées à celles données dans les normes, règlements...

Le second axe intègre une dimension plutôt esthétique voire artistique qu'il est beaucoup plus difficile de traiter.

C'est pourquoi nous ne retiendrons à partir d'ici que la première dimension. Les problèmes traités seront exclusivement basés sur des carences ou défauts quantifiables, indépendamment de tout effet esthétique.

Le schéma suivant donne un aperçu de l'analyse à effectuer permettant d'étudier les niveaux d'éclairements

Trois types de problèmes peuvent apparaître :

- Le local est trop peu éclairé : la valeur moyenne du facteur de lumière du jour ou de l'éclairement est trop faible par rapport aux attentes.

- On observe une mauvaise répartition de la lumière : la valeur moyenne du facteur de lumière du jour ou de l'éclairement est bonne mais on observe une grande différence entre le maximum et le minimum, c'est-à-dire qu'on a une alternance de zone(s) d'ombre et de zone(s) de lumière.

- Les luminances ou rapports de luminance trop faibles ou trop importants.

Pour chacun de ces problèmes, il existe diverses solutions. Celles-ci sont décrites aux points 3.2, 3.3 et 3.4

3.2 AMELIORATIONS – TROP PEU DE LUMIERE

Si le local jouit de trop peu de lumière, c'est-à-dire que la valeur moyenne du facteur de lumière du jour est trop faible, il convient d'étudier si on ne peut pas augmenter la quantité de lumière **captée** par le local. Celle-ci est principalement influencée par :

- La présence de masques solaires,
- L'inclinaison de la fenêtre,
- Le coefficient de réflexion du sol extérieur (albédo).

Ensuite, on peut également modifier la quantité de lumière **transmise** par la ou les fenêtres. Celle-ci dépend de :

- La taille de l'ouverture,
- La forme de l'ouverture,
- La position de l'ouverture,
- Le coefficient de transmission du vitrage,
- Les dimensions du local,
- L'aménagement intérieur du local.

3.2.1 La présence de masques solaires

3.2.1.1 Les masques lointains

On appelle masque solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface que l'on désire ensoleiller. Les masques lointains sont occasionnés par le relief, les bâtiments voisins ou encore la végétation.

La quantité d'énergie solaire reçue en un endroit dépend souvent de l'ombrage des bâtiments voisins. En Belgique, en hiver, la hauteur du soleil est très faible. Tous les masques de l'environnement, immeubles ou grands arbres, qui interceptent le soleil pendant cette période, gêneront grandement l'utilisation de la lumière naturelle.

Même s'il est difficile de modifier les masques lointains, il est important de mesurer leur impact sur le bâtiment étudié. Il existe diverses méthodes calculant la disponibilité de l'ensoleillement, et donc l'éclairage naturel, au cours de l'année.

Il est également important de tenir compte de l'impact de la végétation qui peut aussi réduire l'exposition d'un bâtiment au soleil. Les arbres à feuilles caduques sont particulièrement intéressants sur le plan du contrôle solaire puisqu'ils perdent leurs feuilles en automne et qu'elles repoussent au printemps, ce qui permet de profiter de la lumière naturelle en hiver tout en créant un ombrage en été. Les paramètres influençant les facteurs de transmission et d'absorption lumineuse d'un arbre sont sa hauteur à maturité, sa vitesse de croissance, l'apparence de ses feuilles et leur mode de chute, ainsi que la distance des branches au sol.

3.2.1.2 Les masques proches

Des éléments architecturaux liés au bâtiment lui-même, tels que des murs de refends, des surplombs, des light-shelves,... peuvent provoquer un ombrage qui dépend de leur taille, de leur réflectivité et de leur orientation. On les appelle les masques proches.

Ces masques proches, qui font partie intégrante du bâtiment, sont en général intégrés à celui-ci pour lutter contre les problèmes de surchauffe et d'éblouissement. Ils appartiennent donc à la grande famille des protections solaires.

La mise en place d'auvents ou de surplombs fixes destinés à réduire les problèmes d'éblouissement et de surchauffe pénalisera bien sûr la quantité de lumière captée par le bâtiment. En général, il est souhaitable en Belgique que les angles d'obstruction ne dépassent pas 45° pour l'angle horizontal et 25° pour l'angle vertical.
Le grand avantage de ce type de protection solaire est que, par ciel serein, elles protègent principalement des rayons directs du soleil, qui sont toujours les plus importants, alors que le rayonnement diffus n'en est que très peu affecté.
Cependant, une protection fixe efficace en été réduit l'éclairage naturel par ciel couvert. Notons que sous nos latitudes, la probabilité d'ensoleillement est inférieure à 20 % en hiver et à 50 % en été.

Les façades d'orientation proche du sud sont les plus faciles à protéger par cette technique. Une protection fixe est à même d'éliminer complètement le rayonnement direct estival sur une ouverture orientée au sud mais ne peut pas supprimer les risques d'éblouissement dus à un soleil bas en hiver. En revanche, aucune protection fixe, horizontale ou verticale, ne permet de résoudre le problème propre aux façades est et ouest.

3.2.2 L'inclinaison de la fenêtre

Pour capter le maximum de rayonnement solaire direct, l'ouverture doit être la plus perpendiculaire possible aux rayons du soleil. 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 zénithale 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.

Les ouvertures latérales ne voient qu'une partie du ciel. Par ciel couvert, ces ouvertures verticales ont donc des performances lumineuses nettement plus faibles que les ouvertures horizontales. En outre, 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 surchauffes qu'elles induisent.

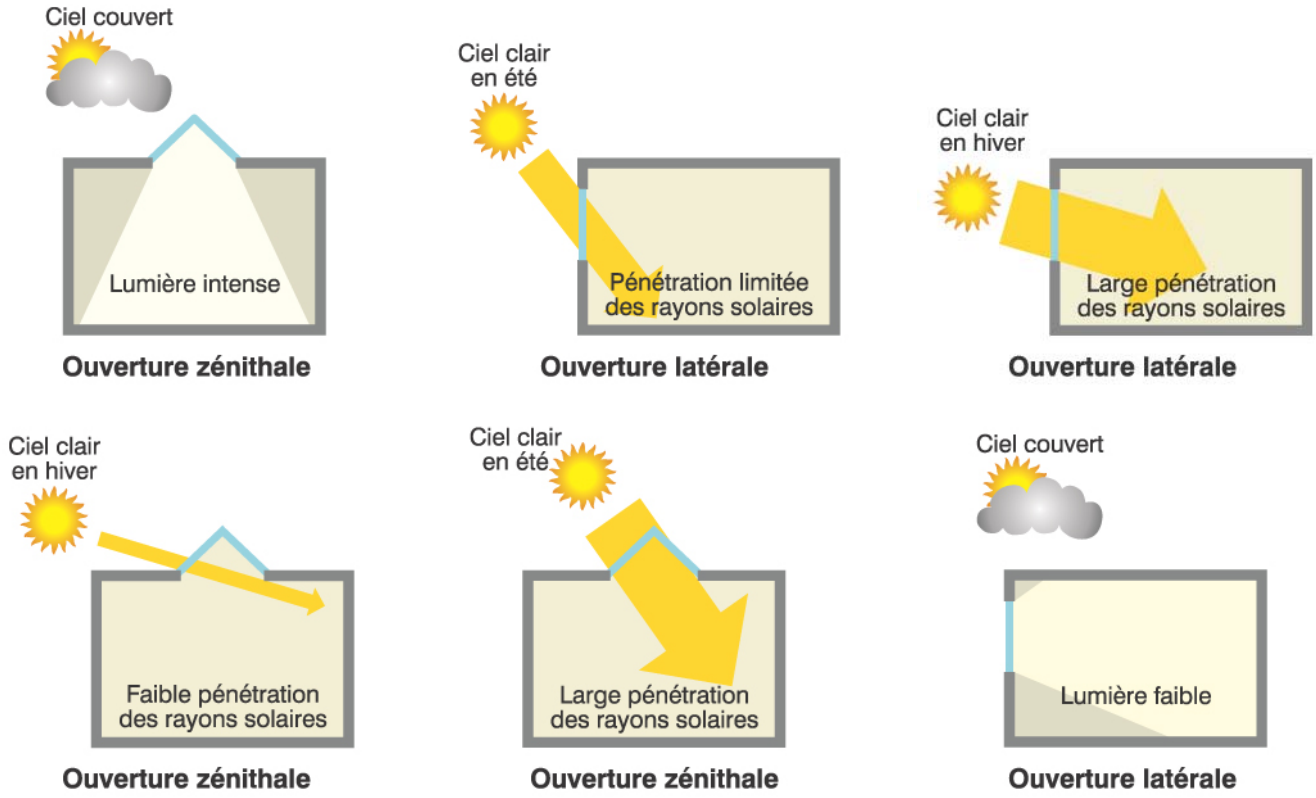

Figure 11 : Différents types d'ouvertures

Les ouvertures zénithales s'ouvrent sur la totalité de la voûte céleste; elles induisent donc une large pénétration de lumière diffuse. La distribution lumineuse obtenue par une ouverture horizontale est aussi beaucoup plus homogène que celle produite par une fenêtre verticale. De plus, la lumière entre dans les locaux par le plafond, ce qui limite a 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.

3.2.3 Le coefficient de réflexion du sol extérieur (albédo)

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.

Matériau	Albédo (%)
Prés, pelouse	0.18 à 0.23
Herbe sèche	0.28 à 0.32
Prairies au premier plan	0.14 à 0.18
Prairies à l'horizon	0.35
Neige fraîche	0.80 à 0.90
Neige ancienne	0.45 à 0.70
Champs non cultivés	0.26
Ciment – béton	0.55
Macadam	0.18
Gravier	0.15 à 0.35
Eau de mer	0.04

Figure 13 : Coefficients de réflexion de quelques sols extérieurs – NBN L13-002

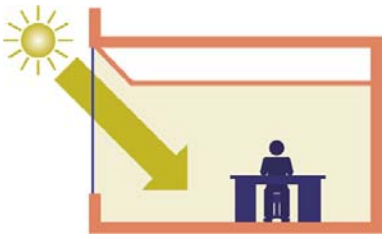

Figure 12

3.2.4 La taille de l'ouverture

La taille des ouvertures d'un bâtiment est un élément déterminant de la quantité de lumière extérieure qui parvient à l'intérieur des locaux. Il n'est cependant pas aisé de déterminer la taille nécessaire à l'apport d'éclairage naturel satisfaisant dans un local. Le point 3.2.4.1 donne une formule rapide permettant de déterminer grossièrement la taille de la fenêtre pour un local rectangulaire.
Notons également que pour maximiser les apports de lumière naturelle, on peut augmenter la prise de contact avec l'extérieur en créant des décrochements, des subdivisions, des ondulations de la façade, ...

Signalons que le fait d'interrompre un faux-plafond à proximité de la fenêtre permet d'augmenter la hauteur du vitrage et donc de favoriser la pénétration de la lumière naturelle par cette ouverture. Ce procédé est connu sous le nom de plafond biaisé (Figure 12).

3.2.4.1 Calcul de la surface nette requise [Tips for daylighting]

Si l'on veut obtenir un facteur de lumière du jour déterminé, on peut calculer la surface de vitrage nette à atteindre en utilisant la formule simplifiée suivante :

$$SR = \frac{2 \times FLJ_{moy} \times S_{tot} \times (1 - \rho_{moy})}{Tl \times \alpha}$$

SR = surface nette requise,

La surface nette de vitrage est la surface de la fenêtre à laquelle on a enlevé la surface des châssis. Les concepteurs de la formule conseillent de multiplier la surface nette par 1.25 pour obtenir la surface totale de la fenêtre. Cette valeur devrait être adaptée en fonction du type de châssis.

Le choix du matériau utilisé pour le châssis détermine l'encombrement de celui-ci par rapport à la lumière naturelle. En général, un châssis en bois est plus mince qu'un cadre en aluminium à coupure thermique. Les châssis en PVC sont les plus larges.

FLJ_{moy} = Facteur de lumière du jour moyen,

Les concepteurs de la formule simplifiée préconisent d'utiliser FLJ = 1 si un faible apport lumière du jour est désiré, FLJ = 2 si l'on désire un espace moyennement éclairé et FLJ = 4 si on désire un espace très largement éclairé.

S_{tot} = Surface totale des parois intérieures (toutes les parois : murs, sol plafond,…)

ρ_{moy} = Coefficient de réflexion moyen pondéré des parois intérieures,

Il s'agit d'un ratio compris entre 0 et 1. Il convient de tenir compte des coefficients de réflexion des parois intérieures au local et du mobilier, ainsi que de celui des fenêtres. (les coefficients de réflexion des parois sont pondérés en fonction de leurs surfaces)

Tl = Coefficient de transmission lumineuse du vitrage,

α = angle vertical de vue du ciel à partir du centre de la fenêtre.
Cette valeur est comprise entre 0 et 90°. S'il n'y a pas d'obstruction, α vaut 90°.

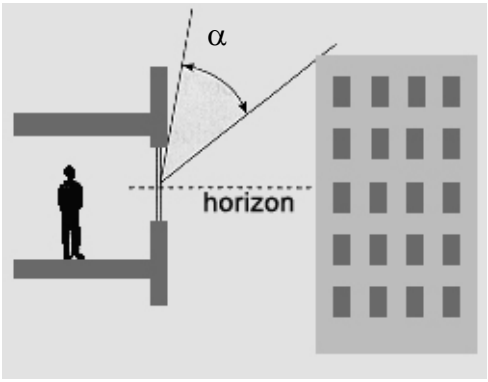

Figure 14

Si la surface nette de l'ouverture réelle est inférieure à SR, il convient de l'augmenter.

Remarque : ce calcul simplifié suppose que le local est rectangulaire et que sa profondeur n'est pas plus importante que 2,5 fois la hauteur du linteau de la fenêtre (par rapport au sol). Il est valable pour un ciel couvert. Dans les climats à prédominance de ciel clair, la surface vitrée nette peut donc être inférieure à celle calculée ici.

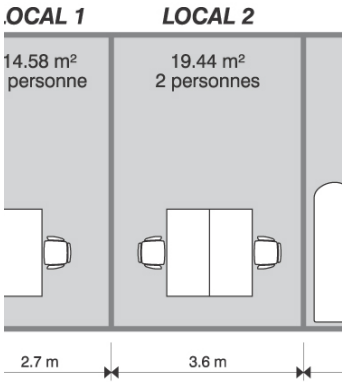

Figure 15

3.2.4.1.1 Exemple

Considérons un local de 3,6 m de largeur sur 5,4 m de profondeur et 2,7 m de hauteur. Les coefficients de réflexion des parois sont respectivement de 20%, 50% et 60% pour le sol, les murs et le plafond. Le local est équipé d'un double vitrage ordinaire de 81 % de Tl. La vue est complètement dégagée (pas d'obstruction extérieure).

Supposons qu'on veuille un local moyennement éclairé : FLJ = 2.
Comme il n'y pas d'obstruction devant la fenêtre, α vaut 90°.

La première ligne de la Figure 16 donne un résultat de 3,27 m2 de surface vitrée. Si on désire un espace très largement éclairé, il faudra dès lors 5,23 m^2 de surface vitrée.

FLJ (%)	Tl	S totale (m^2)	R moyen	SR (m^2)	S brute (m^2)
2	0.81	87.48	0.46	2.61	3.27
4	0.81	87.48	0.46	5.23	6.53

Figure 16

3.2.5 La forme de l'ouverture

Lorsque la largeur de la fenêtre diminue, la répartition devient moins uniforme, bien que l'éclairement moyen ne varie pratiquement pas (à surface vitrée constante). Par contre, l'éclairement du fond du local augmente avec la hauteur de la fenêtre. Pour une même surface vitrée, une fenêtre haute éclaire davantage en profondeur. L'idéal réside donc en une fenêtre horizontale mais dont le linteau est relativement élevé.

Si l'on recherche un éclairement uniforme, il est préférable de créer une longue fenêtre continue plutôt que plusieurs petites fenêtres alignées sur la même façade (pour une même surface vitrée totale). Bien que l'interruption de pénétration de lumière entre chaque fenêtre soit à l'origine de zones sombres créant ainsi des contrastes lumineux gênants, on peut accepter cette configuration tout en gardant à l'esprit deux point importants : il est impératif de coupler les zones de travail avec les fenêtres et il convient de prendre des mesures de limitation de l'éblouissement

.

3.2.6 La position de l'ouverture

Plus l'allège de la fenêtre est haute, mieux le fond du local est éclairé et plus la

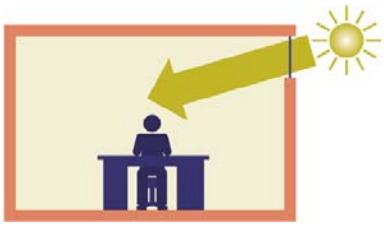

Figure 17

zone éclairée naturellement est profonde. Il y a cependant création d'une zone d'ombre à proximité de la fenêtre. Cette zone est d'autant plus importante que l'allège de la fenêtre est haute.

L'utilisation d'un clerestory (fenêtre dont le seuil se trouve au-dessus du niveau de l'œil) permet donc d'éclairer naturellement un local en profondeur (voir Figure 17).

Cette fenêtre en hauteur procure les avantages suivants :

- une répartition relativement uniforme de la lumière dans l'espace ainsi qu'un bon éclairage du fond du local.
- une source de lumière au-dessus de la ligne de vision, ce qui réduit les risques d'éblouissement direct.
- une limitation du risque d'éblouissement par effet de voile pour les tâches particulièrement sensibles à ce problème.

Cependant, un clerestory seul supprime la vue sur l'extérieur et ne joue ainsi que faiblement son rôle de lien entre le local et son environnement. C'est pourquoi, en général, il est préférable de coupler un clerestory avec une fenêtre classique, équipée de protections solaires.
Il est également intéressant de noter que la zone de la fenêtre située en dessous du plan de travail n'a pratiquement aucun impact sur l'éclairage naturel du local. La présence d'une allège opaque est donc thermiquement préférable (présence d'une isolation diminuant les pertes thermiques en hiver et limitant les gains solaires en été).

3.2.7 Le coefficient de transmission du vitrage

La lumière qui rencontre un vitrage est transmise, absorbée et réfléchie, selon des proportions qui tiennent en grande partie au type de vitrage. Le choix du vitrage influence non seulement la lumière transmise mais aussi les gains solaires et les pertes de chaleur à travers la fenêtre.
La transmission lumineuse et énergétique d'un vitrage peut être caractérisée par trois paramètres :

- son facteur de transmission lumineuse,
- son facteur solaire,
- son coefficient de conduction thermique.

L'influence du vitrage sur le bilan énergétique d'un local peut se résumer de la façon suivante :

- plus le coefficient de transmission lumineuse est élevé, moins l'éclairage électrique est nécessaire pendant la journée.
- plus le facteur solaire est bas, plus faibles sont les risques de surchauffe et les possibilités de gains solaires en hiver.
- plus le coefficient de conduction thermique est bas, plus faibles sont les déperditions thermiques à travers sa surface.

Le facteur de transmission lumineuse d'un vitrage ou TL est le pourcentage du rayonnement solaire visible transmis à travers ce vitrage. La quantité de lumière qui pénètre dans le bâtiment est d'autant plus grande que le facteur de transmission lumineuse des vitrages est élevé.

Le type de vitrage (simple, double, absorbant, réfléchissant, ...) affecte directement la transmission lumineuse à travers la fenêtre. Les vitrages clairs sont connus pour leur haute capacité à laisser passer la lumière à l'intérieur des bâtiments. Le tableau 1 donne des exemples de vitrages ainsi que leur coefficients de transmission lumineuse.

Type de vitrage	Coefficient de transmission lumineuse
Simple vitrage clair 6 mm	89%
Simple vitrage teinté 6 mm Bronze Gris Vert	 49 % 41 % 73 %
Double vitrage 6 mm clair et 6 mm :	
Clair Basse émissivité neutre Réfléchissant Fortement réfléchissant	79 % 67 % 30 % 7 %

Figure 18

Signalons que la transmission lumineuse d'un vitrage dépend fortement de son facteur de maintenance.

Un compromis doit être recherché entre la transmission lumineuse, la protection contre les surchauffes et l'isolation des éléments vitrés.

La Figure 19 reprend les valeurs calculées au point 3.2.4.1. La troisième ligne correspond au même cas que la seconde ligne mais en prenant un vitrage réfléchissant (Tl = 60 %). Pour atteindre 4 % de FLJ, la surface brute de la fenêtre doit passer de 6.53 m^2 à 8.82 m^2. Ce changement est relativement important et montre donc rapidement l'impact du choix du vitrage sur l'éclairage naturel.

FLJ (%)	Tl	S totale (m^2)	R moyen	SR (m^2)	S brute (m^2)
2	0.81	87.48	0.46	2.61	3.27
4	0.81	87.48	0.46	5.23	6.53
4	0.60	87.48	0.46	7.06	8.82

Figure 19

3.2.8 Les dimensions du local

Le niveau d'éclairement est d'autant plus élevé dans un local que celui-ci est large (pour un rapport de surface vitrée/surface au sol constant).

La lumière diffuse ne pénètre significativement qu'à environ une distance de une fois et demi la hauteur du linteau de la fenêtre par rapport au sol (voir Figure 20).

Dès lors, au-delà d'une certaine profondeur, les niveaux d'éclairement chutent au fond de la pièce. Dans le cas d'une fenêtre orientée au sud et équipée d'un lightshelf, cette valeur peut atteindre 2 fois la hauteur de la fenêtre (Figure 21).

Pour éclairer naturellement toute la surface d'un local, il est donc préférable d'adopter une faible profondeur. Il faut encore souligner pour des locaux de dimensions différentes que plus leurs parois intérieures sont foncées, plus grand est l'écart entre les niveaux d'éclairement de ces pièces.

Si la profondeur du local a une grande influence sur la quantité de lumière naturelle, sa hauteur sous plafond en a beaucoup moins.

3.2.9 L'aménagement intérieur du local

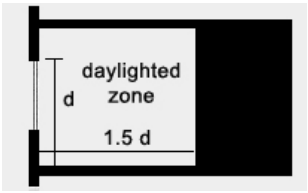

Figure 20

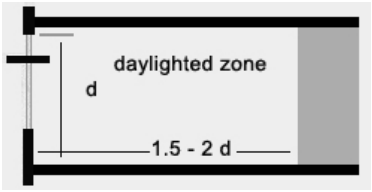

Figure 21

La nature et la couleur des surfaces intérieures (paroi et mobilier) influencent directement l'éclairage naturel dû aux réflexions intérieures. Ainsi, une bonne distribution de la lumière dans tout l'espace nécessite l'utilisation de parois de couleurs claires (pour des parois beige clair, on atteint un coefficient de réflexion de l'ordre de 60%).
En général, tout système d'éclairage naturel donne de mauvais résultats lorsque les surfaces de la pièce sont sombres. L'utilisation de parois et de meubles de couleur claire influence fortement la luminosité d'un local.

L'importance de la clarté de la finition des surfaces est due à un double effet:

- les facteurs de réflexion (des parois et des meubles) plus élevés permettent à la lumière d'être davantage réfléchie.
- l'oeil humain analyse des niveaux de luminance. Sous les mêmes conditions d'éclairage, une surface claire est donc subjectivement perçue comme mieux éclairée qu'une surface foncée.

Lorsque les matériaux de revêtement d'un local quelconque présentent une certaine brillance, on constate que la lumière arrive plus facilement en fond de pièce. En contrepartie, les surfaces en question acquièrent une luminance élevée et peuvent donc devenir des sources d'éblouissement pour l'utilisateur. De manière générale, les surfaces brillantes sont donc à conseiller comme moyen de transmission de la lumière naturelle mais elles sont à éviter dans les locaux de travail dans la mesure où les activités effectuées (lecture, écriture,...) peuvent être fortement perturbées lorsque l'environnement lumineux est fort contrasté.

Généralement, les coefficients de réflexion des murs, du plancher et du mobilier (surfaces de travail, armoires,...) situés à proximité de la fenêtre jouent un rôle principal dans le jeu des réflexions intérieures. Dans une moindre mesure, les réflexions sur le plafond et les murs plus éloignés des ouvertures peuvent aussi améliorer la répartition lumineuse.

On peut dire que si le facteur de réflexion moyen des murs d'un volume quelconque est inférieur à 50%, la lumière pénétrera difficilement en profondeur dans cet espace.

Notons également que, sous ciel couvert, la photométrie des murs a une influence sur la répartition de la lumière qui peut être qualifiée de moyenne.

En revanche, dès que des rayons solaires frappent directement un mur intérieur, le comportement photométrique de celui-ci va jouer un rôle essentiel sur la répartition des éclairements.

La plupart des matériaux architecturaux ont cependant de faibles facteurs de réflexion. Un plancher clair peut avoir un facteur de réflexion de 30%, mais pas beaucoup plus, ce qui est nettement plus bas que les murs (~50%) et que les plafonds (~70%). Seules les surfaces extrêmement claires, comme une peinture blanche très propre, ont un facteur de réflexion supérieur à 70%.
En général, comme le plafond ne reçoit la lumière naturelle que de manière indirecte, son influence sur la répartition de la lumière est relativement faible. En revanche, lorsqu'un dispositif de distribution lumineuse dévie la lumière vers le haut, par exemple à l'aide d'un light shelf, le plafond reçoit une grande quantité de lumière qu'il doit répartir dans toute la pièce; le facteur de réflexion de cette surface doit alors être élevé: $\rho_{plafond} \geq 70\%$, cette valeur correspondant à celle du plâtre blanc propre.

Par ciel couvert, la plus grande partie de la lumière provient du haut de la voûte céleste. En conséquence, les surfaces horizontales reçoivent une plus grande quantité de lumière que les surfaces verticales, ce qu'il faut impérativement prendre en compte lors de l'aménagement intérieur du local.

Le sol et le mobilier d'un espace quelconque constituent donc des plans et des surfaces très éclairés, notamment à proximité des ouvertures. Pour cette raison, toute variation du comportement photométrique de ces surfaces entraîne des répercussions importantes sur la distribution des éclairements intérieurs. Dès lors, si l'on désire favoriser la pénétration de la lumière en profondeur dans un local, il vaut mieux préconiser un revêtement du sol et du mobilier relativement clair, possédant donc un facteur de réflexion élevé. De plus, la clarté des tables de travail s'avère un élément favorable au confort visuel dans la mesure où la réduction du contraste entre le papier et le support de la table induit une diminution des efforts d'accommodation que l'oeil doit effectuer à chacun de ses mouvements.

A contrario, les sols sont souvent de couleur relativement sombre afin de faciliter leur entretien. Il faut donc envisager un compromis susceptible de satisfaire simultanément les exigences de confort et de maintenance.

Les meubles sont parfois de réels obstacles qui empêchent la transmission de la lumière vers certaines parties de la pièce. Il est donc essentiel de réfléchir aux types de meubles à choisir ainsi qu'à leurs emplacements de manière à favoriser la pénétration de la lumière naturelle.

3.3 Améliorations – Mauvaise distribution de la lumière

Pour travailler sur la distribution de la lumière, on peut agir sur :

- La répartition des ouvertures,
- L'agencement des parois intérieures,
- Les matériaux de surfaces utilisés,
- Les systèmes de distribution lumineuse.

3.3.1 La répartition des ouvertures

La lumière naturelle qui ne parvient dans un espace que par une de ses parois peut être unilatérale ou zénithale.

En éclairage unilatéral, la pénétration de la lumière est limitée en profondeur mais elle est directionnelle, ce qui est favorable à la perception du relief. Les ouvertures verticales captent au maximum les apports solaires hivernaux, tout en limitant les pénétrations solaires estivales. Elles peuvent créer de l'éblouissement et engendrent de forts contrastes dans l'espace.

L'éclairage zénithal fournit une distribution de lumière très uniforme et un niveau d'éclairement quasiment identique dans l'ensemble du local; il contribue à une meilleure répartition de la lumière dans l'espace. La lumière zénithale est cependant défavorable à la perception du relief et les ouvertures zénithales sont d'un entretien plus difficile que les fenêtres latérales. L'éclairage zénithal convient spécialement à la pénétration de la lumière naturelle dans les bâtiments bas et profonds.

L'éclairage naturel provenant de plusieurs ouvertures peut s'évaluer approximativement en additionnant les éclairements issus des différentes sources.

Avec l'éclairage bilatéral, on obtient un éclairage plus uniforme et mieux réparti que l'éclairage unilatéral. Lorsque la lumière entre par deux côtés opposés, elle contribue encore à une meilleure pénétration lumineuse dans l'ensemble de la pièce. En général, les effets de contre-jour disparaissent lorsque les fenêtres sont disposées bilatéralement. Signalons que l'association d'un éclairage latéral et d'un éclairage zénithal est un cas particulier qui offre un très bon éclairage général et une mise en relief tridimensionnelle des objets.

L'éclairage multilatéral est particulièrement indiqué dans les espaces nécessitant un éclairement très uniforme ainsi que dans les bâtiments assez profonds.

3.3.2 L'agencement des parois intérieures

Un autre paramètre de la distribution lumineuse dans un espace est l'agencement des cloisons et des ouvertures entre les pièces. La géométrie et la taille du local influencent directement l'éclairement dû aux réflexions intérieures. Utiliser des cloisons transparentes ou translucides permet à la lumière de se répandre dans les deux pièces séparées par la surface vitrée.

A l'intérieur d'un bâtiment, l'architecte est tributaire des effets de lumière qui se créent et dote les espaces intérieurs de l'atmosphère désirée par une disposition étudiée des ouvertures et des obstacles à la lumière. Par exemple, un local disposé à l'est peut, par le truchement des baies intérieures, recevoir un peu de lumière de l'ouest.
La distribution de l'éclairage dépend donc fortement de l'organisation des espaces intérieurs.
Signalons qu'un espace sans possibilité de contact direct avec l'extérieur peut recevoir la lumière naturelle par des vitrages entre ce local et d'autres pièces adjacentes éclairées directement par la lumière naturelle. Ces ouvertures peuvent être aussi bien horizontales que verticales; il faut souligner l'utilisation possible du verre dans les éléments de sol ou d'escalier.

3.3.3 Les matériaux utilisés

L'éclairement dû aux réflexions intérieures est généralement la composante principale de l'éclairement naturel au fond d'un local. La nature et la couleur des parois influencent donc fortement la distribution lumineuse dans un espace.

Des parois claires assurent une répartition plus homogène de la lumière dans l'ensemble de la pièce que des parois sombres. De plus, l'emploi de surfaces claires dans les locaux est bénéfique en terme de confort visuel car cela diminue le contraste entre la luminance des parois intérieures et la clarté extérieure.

La propriété de réflexion spéculaire de certains matériaux est particulièrement intéressante dans la mesure où elle aide fort à rediriger la lumière et à la transporter aux endroits où l'on en a le plus besoin. Pour un grand nombre d'applications, en ce qui concerne le transport de lumière d'un point à un autre, comme par exemple les lightshelves ou les conduits lumineux, il est indispensable de disposer de matériaux possédant un coefficient de réflexion très élevé.

En revanche, la lumière diffuse procure un éclairage plus uniforme et homogène mais moins intense que la lumière réfléchie de manière spéculaire. Ce type d'éclairage est donc idéal pour des locaux de travail où il est important d'avoir un éclairage constant, sans source d'éblouissement. La lumière naturelle peut être diffusée par réflexion, comme la lumière réfléchie sur des surfaces mates ou la lumière du nord. Rappelons que la lumière du ciel est une lumière diffusée par l'atmosphère. La lumière peut également être diffusée par transmission, en traversant par exemple un vitrage translucide. Ainsi, la présence de rideaux derrière un vitrage provoque une diffusion de la lumière dans toutes les directions.

3.3.4 Les systèmes de distribution lumineuse

Pour essayer de limiter les problèmes liés à une mauvaise répartition de la lumière naturelle dans un local, on peut employer certains systèmes de distribution lumineuse qui favorisent la pénétration de la lumière plus profondément dans la pièce.
Il existe de nombreux moyens pour transporter la lumière naturelle depuis la façade ou la toiture vers les zones les plus éloignées des ouvertures. Parmi ceux-ci on peut citer : les conduits solaires ou « light pipes », les stores réfléchissants, les panneaux prismatiques, les « laser-cut panels », les éléments acryliques et les systèmes optiques holographiques.

Cependant, ces systèmes de distribution affectent souvent la vue vers l'extérieur et sont donc uniquement à utiliser dans les espaces qui ont des demandes visuelles importantes, comme les locaux très profonds. De plus, ces systèmes d'éclairage naturel doivent être conçus dans le contexte de l'entièreté du bâtiment.

Il est important de comprendre que ces systèmes sont surtout intéressants en cas de rénovation, lorsque aucune autre stratégie n'est applicable. Cependant, ils sont en général fort coûteux et présentent souvent des inconvénients. Ces systèmes ne sont donc pas des solutions universelles aux différents problèmes liés à l'éclairage naturel. Une bonne conception architecturale est tout à fait possible sans recourir à l'utilisation systématique de tels systèmes. Notons également que ce genre de système est très difficile à modéliser à l'échelle et est donc quasi-impossible à intégrer dans un modèle réduit.

3.4 AMELIORATIONS- LUMINANCES OU RAPPORTS DE LUMINANCE TROP FAIBLES OU TROP IMPORTANTS

Lorsque les luminances ou rapports de luminance sont trop faibles, une sensation de monotonie peut apparaître dans le local.

Lorsque les luminances ou rapports de luminance sont trop importants, on risque de rencontrer des problèmes d'éblouissement.
L'éblouissement est l'effet de conditions de vision dans lesquelles l'individu subit une réduction de l'aptitude à percevoir les objets, pouvant aller jusqu'à un aveuglement temporaire.

L'éblouissement est dû à une luminosité trop intense de surfaces placées dans la direction de la vision ou à un contraste lumineux trop important entre surfaces contiguës. Il place l'individu dans des situations de grand inconfort visuel.

En éclairage naturel, les sources principales d'éblouissement sont :

- la vision directe du soleil ou du ciel au travers des fenêtres,
- la réflexion du soleil ou du ciel sur les bâtiments voisins,
- un contraste de luminance excessif entre une fenêtre et le mur dans lequel elle s'inscrit,
- un contraste de luminance excessif entre une fenêtre et son châssis,
- une surface de luminance trop élevée par rapport aux surfaces voisines.

Dans le cas particulier des écrans d'ordinateur, il convient de tenir compte des points suivants :

- Aucune fenêtre ne doit se trouver devant ou derrière l'écran.
- L'axe principal du regard doit être parallèle aux fenêtres.
- Les fenêtres doivent être équipées de protections solaires efficaces sur le plan visuel sur toutes les façades. Il est recommandé d'en confier la gestion aux occupants eux-mêmes.
- Les surfaces voisines de l'écran devraient être mates et avoir un facteur de réflexion de 0,2 à 0,5.
- La luminance de chaque partie de l'environnement que l'observateur peut voir par réflexion dans son écran doit être aussi uniforme et faible que possible.
- Pour réduire la différence de luminance entre l'écran et le ciel, il peut être utile de placer une rangée de luminaires le long de la fenêtre.
- Les réflexions sont plus perturbatrices sur écran à fond sombre que sur écran à fond clair. Si toutes les autres mesures ont échoué, il faut installer des écrans anti-reflets, bien qu'ils ne soient pas généralement recommandés parce qu'ils réduisent la visibilité des images. (Les écrans anti-reflets n'ont aucune influence lorsque l'on se trouve face à un écran à contraste positif – fond clair et caractères sombres alors qu'ils peuvent s'avérer utile dans le cas d'un contraste négatif).

La Figure 22 présente les différentes dispositions d'un écran par rapport à une ouverture à la lumière naturelle. La première configuration est optimale car elle permet de réduire le contraste de luminance dans le champ visuel de l'usager (écran, fond).

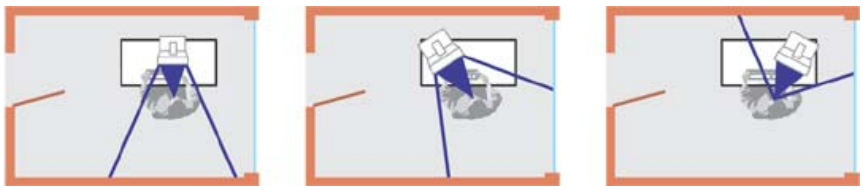

Figure 22

Différentes précautions peuvent être prises pour diminuer les risques d'éblouissement dus à l'éclairage naturel (Figure 23) :

On peut diminuer les risques d'éblouissement en prenant les précautions suivantes :

- Prévoir une grande fenêtre plutôt que plusieurs petites fenêtres. En effet, une grande ouverture à la lumière naturelle occasionne moins d'éblouissement qu'une petite car elle augmente le niveau d'adaptation des yeux et diminue le contraste de luminance et la sensation d'éblouissement qui lui est associée.
- Voiler le ciel par l'utilisation d'une protection solaire.
- Voiler en partie le ciel en assombrissant la fenêtre par un élément de type déflecteur (lightshelf, murs de refends, débords de toiture,...).
- Voiler en partie le ciel en disposant à l'extérieur des éléments moins lumineux que le ciel (atrium, cour intérieure).
- Situer les percements en hauteur (ouvertures zénithales, clerestories,…), afin de limiter l'éblouissement direct puisque la plupart des tâches visuelles nécessitent une vue horizontale ou vers le bas.
- Diminuer le contraste fenêtre-châssis en augmentant le coefficient de réflexion du châssis au moyen de couleurs claires et mates.
- Diminuer le contraste mur-fenêtre en éclairant le mur qui contient la fenêtre.
- Diminuer le contraste mur-fenêtre en augmentant le coefficient de réflexion du mur qui contient la fenêtre.
- Diminuer le contraste mur-fenêtre en augmentant la part indirecte de l'éclairage naturel au moyen de parois très claires.
- Favoriser les revêtements mats car ils diffusent la lumière.

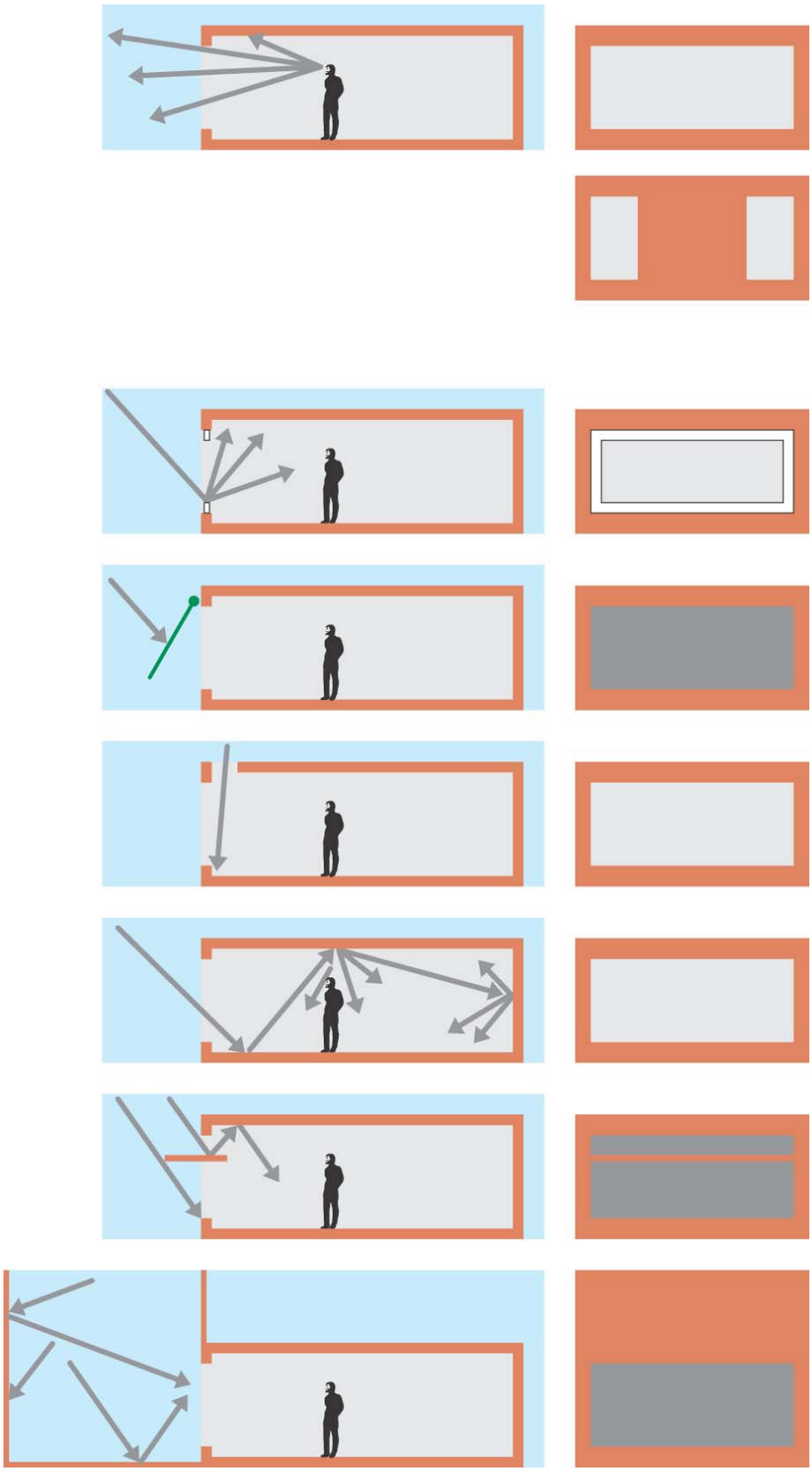

Figure 23

4 BIBLIOGRAPHIE

[Rav 1993] Office fédéral des questions conjoncturelles : « Eclairage : éléments d'éclairagisme », programme RAVEL, Suisse, 1993.

[O'Co 1997] O'Connor J., Lee E., Rubinstein F., Selkowitz S., "Tips for daylighting with windows, the intergrated approach", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Publication 790, USA, 1997.

[DeH 2001] L'éclairage naturel des bâtiments

[Fon 99] Fontoynont M., "Daylight performance of building"

[CIB 1987] CIBSE,"Window Design", applications manual, The Chartered Institution of Building Service Engineers, London, 1987.

Centre Scientifique et Technique de la Construction
Division Physique du Bâtiment et Climat intérieur
Avenue Pierre Holoffe 21
B-1342 Limelette
Belgique
Tel : +32 2 655 77 11
Fax : +33 2 653 07 29
Website : www.bbri.be

Université Catholique de Louvain
Architecture et Climat
Place du Levant 1
B-1348 Louvain-la-Neuve
Belgique
Tel : +32 10 47 91 52
Fax : +32 10 47 21 50
Website : http://www-climat.arch.ucl.ac.be