
Principes de base de l'éclairage naturel et du confort visuel

Magali Bodart - UCL

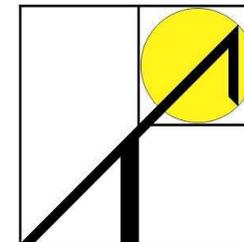
Arnaud Deneyer - CSTC



CSTC

Centre Scientifique et Technique de la
Construction
*Division Physique du Bâtiment et Climat
Intérieur*

Ministère de la Région Wallonne
DGTRE
Division Energie



UCL

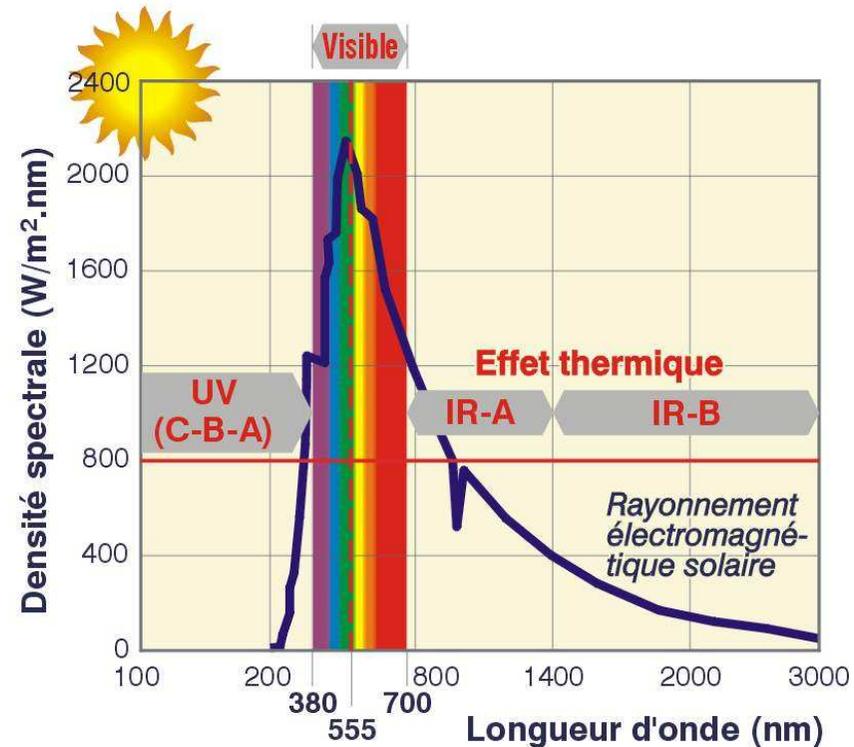
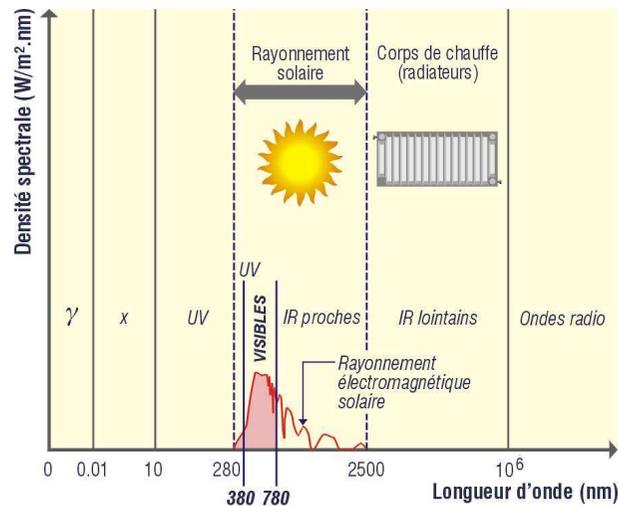
Université Catholique de Louvain
Architecture et Climat

A. Notions de base

- Le rayonnement solaire visible
- Les grandeurs photométriques
- Le Facteur de lumière du jour
- Les instruments de mesure
- Les composantes de l'éclairage
- La propagation de la lumière
- Les facteurs de transmission et de réflexion des différents matériaux

Le rayonnement solaire visible

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique



Répartition du spectre solaire

Classification des rayonnements électromagnétiques



CSTC



UCL



DGTRE

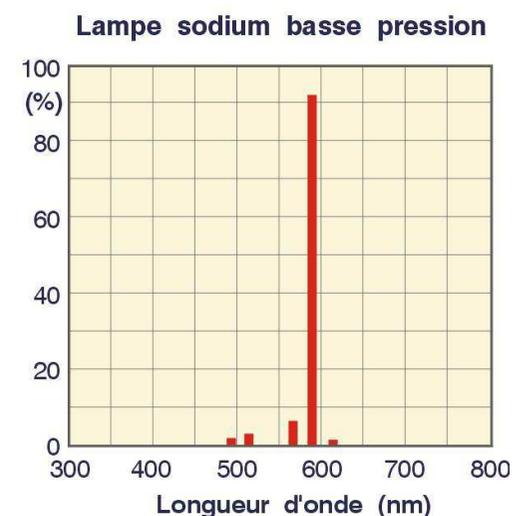
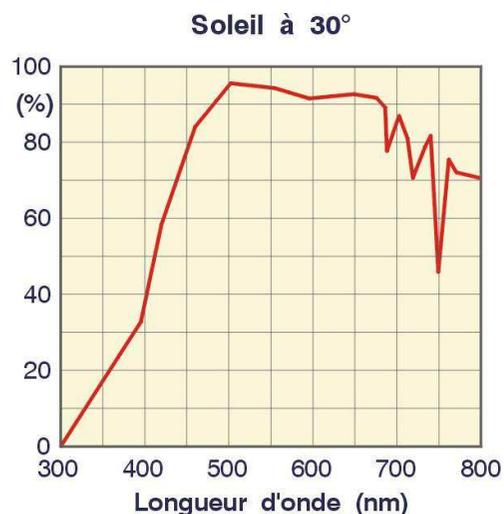
Définition des grandeurs photométriques (1)

Le but de la photométrie est de quantifier les grandeurs relatives au rayonnement en fonction de l'impression visuelle produite. Il est dès lors nécessaire de définir ces grandeurs.

Sources lumineuses	Efficacité lumineuse (lm/W)
Rayonnement solaire direct	52 à 97
Ciel couvert	110 à 140
Ciel clair (sans soleil)	125 à 155
Ciel clair avec soleil	105 à 115

Lumière naturelle	Température de couleur (K)
Soleil levant ou couchant	1000 à 2500
Clair de lune	4000 à 4400
Soleil à midi en été	5800 à 6500
Ciel couvert	7000
Ciel clair du Nord	15000 à 20000

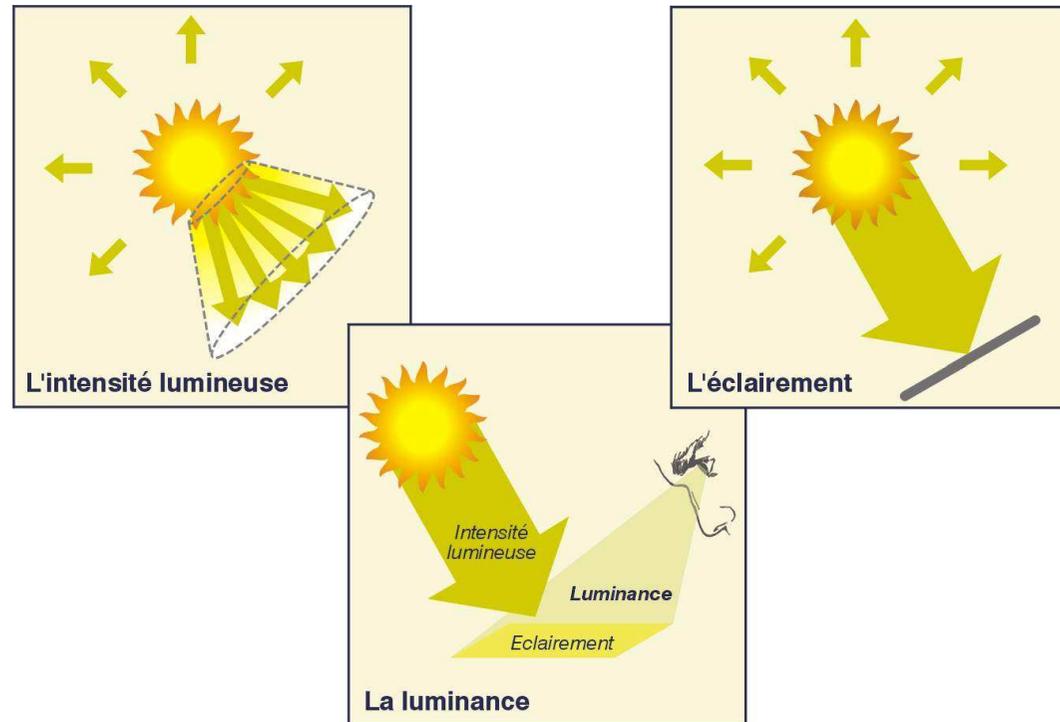
Exemples de valeurs d'efficacité lumineuse



Exemple de répartition spectrale de 2 sources différentes

Définition des grandeurs photométriques (2)

La sensation de luminosité ressentie par l'œil est la mieux représentée par la notion de luminance. Cependant, les recommandations sont souvent données en terme d'éclairement, plus facilement mesurable que la luminance



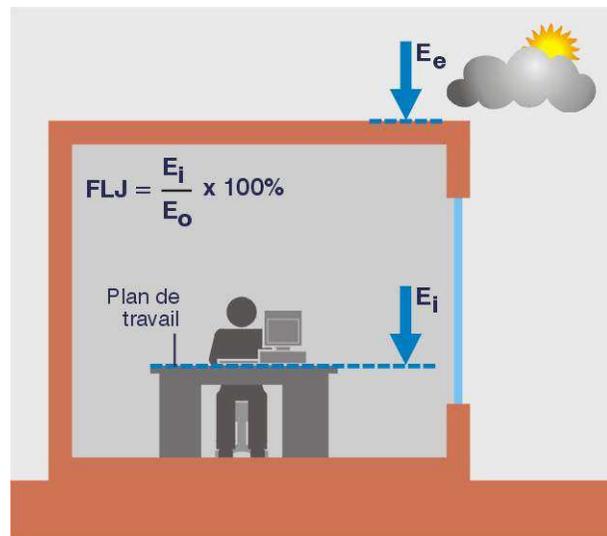
Sources lumineuses	Eclairement (lx)
Pleine lune	0.2
Ciel couvert	5000 à 20000
Ciel clair (sans soleil)	7000 à 24000
Plein soleil d'été	100000

Environnement	Luminance (cd/m ²)
Paysage nocturne (limite de la visibilité)	10 ⁻³
Paysage par pleine lune	10 ⁻² à 10 ⁻¹
Papier noir mat éclairé par 100 lux	1,5
Parois intérieures éclairées	25 à 250
Papier blanc mat éclairé par 100 lux	30
Paysage par ciel couvert	300 à 5000
Paysage par ciel clair	500 à 25000
Lune	2500
Papier blanc au soleil	25000
Soleil	1,5 · 10 ⁹

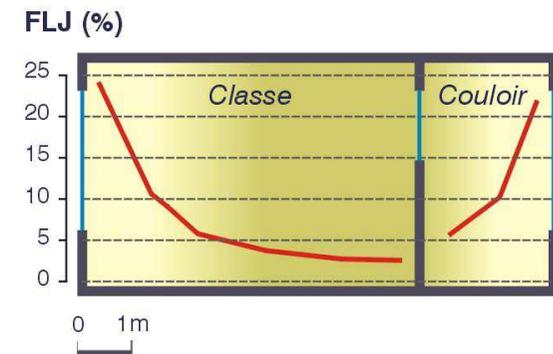
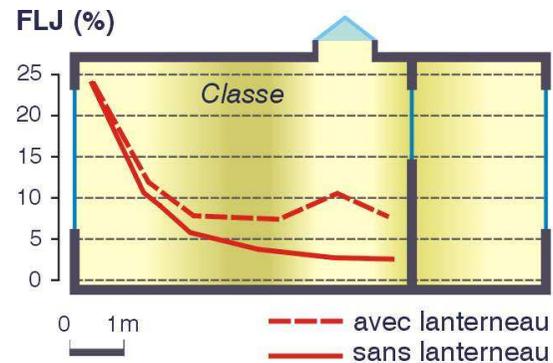
Eclairement et luminance de différentes sources de lumière naturelle

Le Facteur de Lumière du jour (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



Définition du Facteur de Lumière du Jour



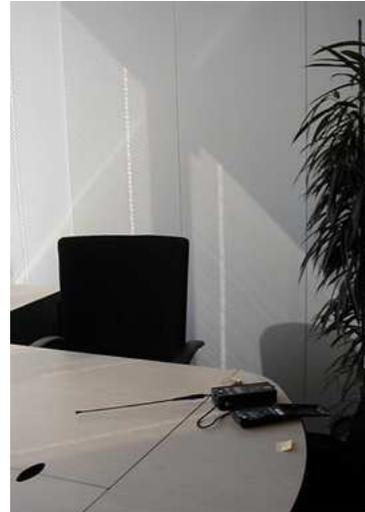
Exemple d'un local de classe

Les instruments de mesure (1)

Mesure de l'éclairement Calcul FLJ

⇒ **Luxmètre**

- $V(\lambda)$
- Correction cosinus



intérieur



extérieur



Tête de luxmètre

→
Acquisition



Les instruments de mesure (2)

Mesure des luminances

⇒ Luminance-mètre

⇒ Vidéoluminance-mètre

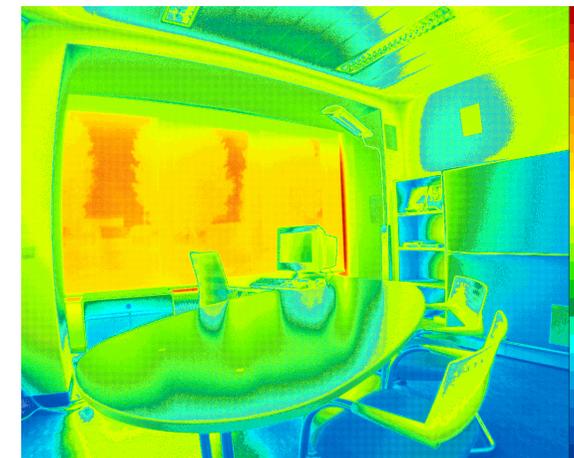
- $V(\lambda)$



Mesure point par point

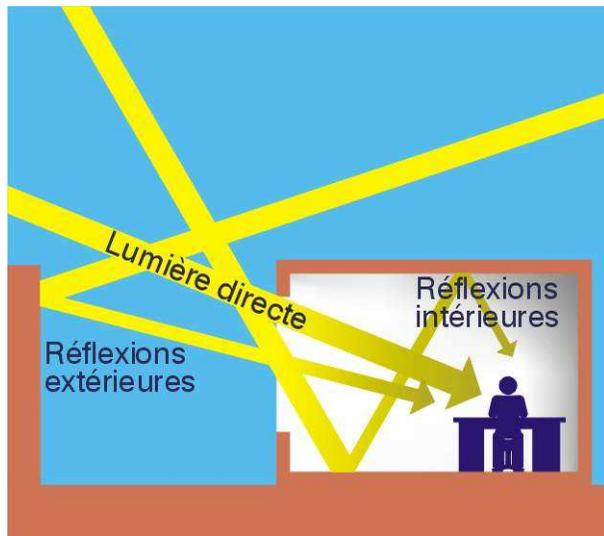


Tout le champ visuel

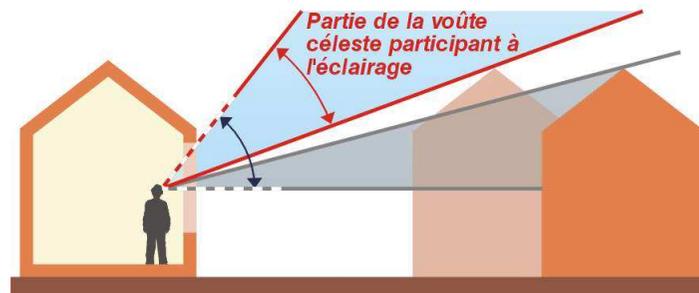


Les composantes de l'éclairage

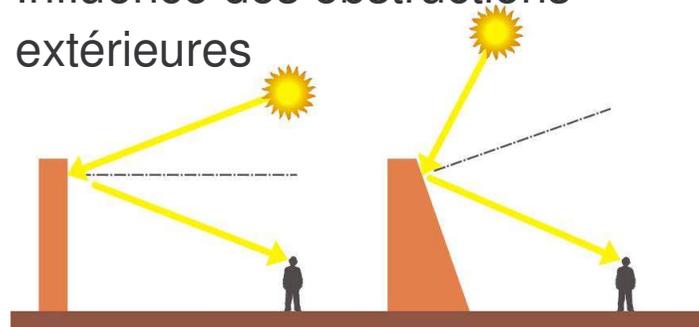
La lumière naturelle perçue à l'intérieur d'un bâtiment est la résultante de trois composantes : la lumière directe due au ciel et au soleil, la partie de la lumière réfléchie sur les surfaces extérieures et celle provenant des inter réflexions dans le local



Réflexion du soleil sur des parois d'inclinaisons différentes



Influence des obstructions extérieures



ρ des parois intérieures

Les composantes de la lumière naturelle à l'intérieur d'un local



CSTC



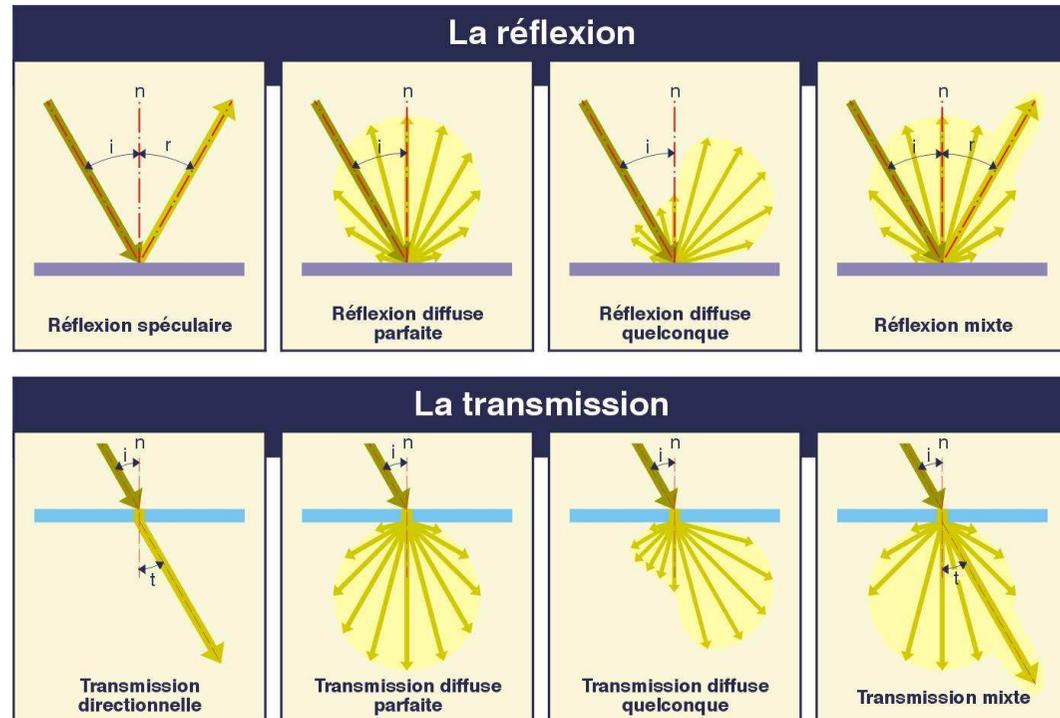
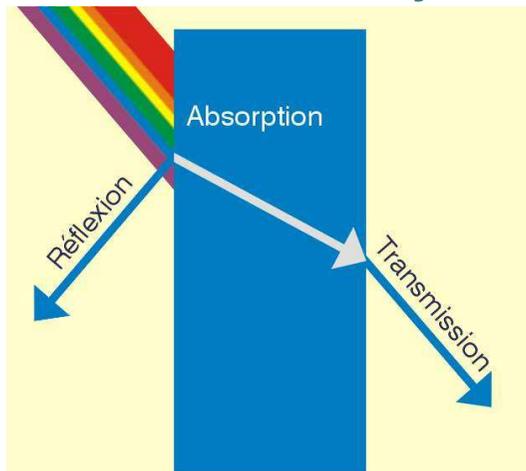
UCL



DGTRE

La propagation de la lumière

Quelle que soit la couleur de la lumière émise, les objets ne font que l'absorber, la réfléchir ou la transmettre sélectivement. Les effets produits par chacun de ces phénomènes dépendent de la longueur d'onde de la lumière et sont à l'origine de la couleur des objets



Les différents modes de réflexion et de transmission

La propagation de la lumière



CSTC



UCL



DGTRE

Facteurs de transmission et de réflexion de différents matériaux

Le facteur de réflexion (ρ) d'une surface est la quantité d'énergie lumineuse qu'elle réfléchit par rapport à celle qu'elle reçoit.

Le facteur de transmission lumineuse (TI) est le pourcentage de rayonnement solaire visible transmis au travers d'une paroi



Nature du sol	Facteur de réflexion	Peintures	Facteur de réflexion
Pelouse	0,18 à 0,23	Couleurs claires (forte teneur en blanc)	
Herbe sèche	0,28 à 0,32	blanc	0,8
Sable	0,09 à 0,55	jaune	0,7
Plan d'eau (h. soleil : 40° à 10°)	0,1 à 0,47	beige	0,65
Prairie	0,14 à 0,18	vert	0,6
Arbre à feuilles caduques	0,15	gris	0,6
Conifère	0,05	rose, brun, bleu	0,5
Neige fraîche	0,8 à 0,9	rouge	0,35
Neige ancienne	0,45 à 0,7	Couleurs moyennes (saturation moyenne)	
Terre	0,26	blanc	0,7
Macadam	0,18	jaune	0,5
Gravier	0,15 à 0,35	beige	0,45
Matériaux de construction		gris, rose	0,35
Vitrage	0,08 à 0,4	vert	0,3
Brique rouge	0,05 à 0,2	brun	0,25
Béton neuf	0,4 à 0,5	bleu, rouge	0,2
Béton vieux	0,05 à 0,15	noir	0,04
Ciment	0,2 à 0,4	Couleurs foncées (forte teneur en noir)	
Ardoises	0,1 à 0,15	jaune	0,3
Aluminium	0,55 à 0,75	beige	0,25
Tôles de zinc (après usage)	0,08 à 0,2	gris, rose	0,2
Asphalte	0,08 à 0,12	vert	0,12
Nickel	0,48 à 0,63	rouge	0,1
Cuivre	0,48 à 0,5	brun	0,08
Chrome	0,52 à 0,7	bleu	0,05

Facteurs de réflexion de différents matériaux

Local équipé de vitrages spéciaux (TI = 89 % et TI = 15 %)

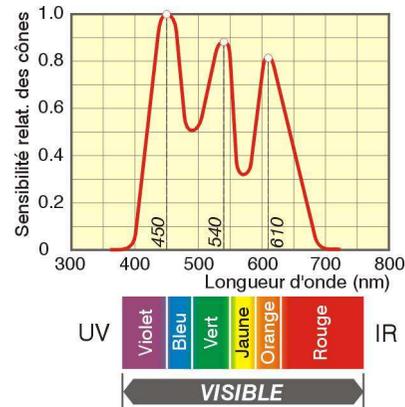
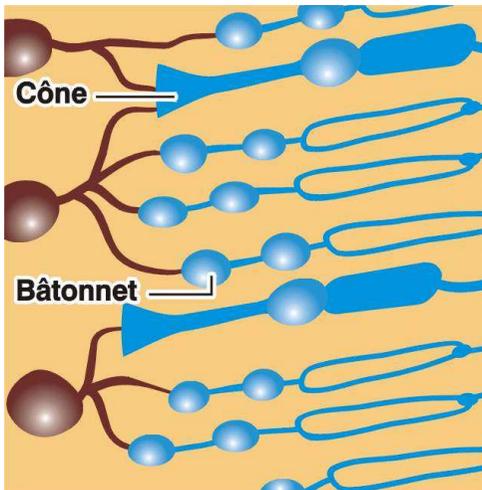
B. La perception visuelle

- La perception de l'intensité lumineuse :
 - *La rétine*
 - *L'éblouissement*
 - *La sensibilité au contraste*
- L'appréciation de l'espace
 - *Le champ visuel*
 - *La perception des distances*
- La distinction des couleurs
- L'acuité visuelle

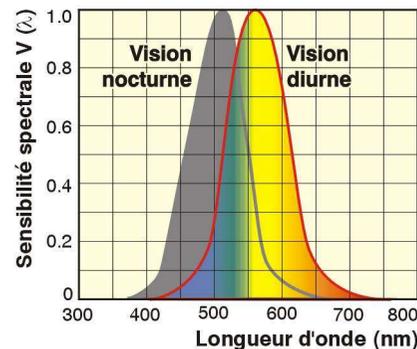


La perception de l'intensité lumineuse : la rétine

La rétine comporte deux types de cellules réceptrices: les cônes, sensibles à des intensités lumineuses moyennes ou fortes et permettant la vision des couleurs et les bâtonnets, sensibles à de faibles intensités



Chaque type de cône donne une réponse sélective au spectre de couleur et créent ensemble une impression de couleur

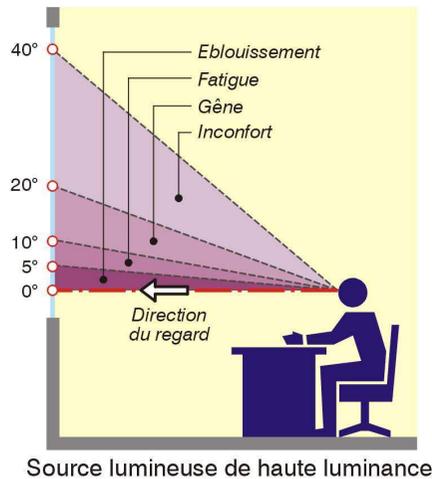


Les bâtonnets ont une sensibilité spectrale maximale aux alentours de 507 nm. Cette valeur vaut 555 nm pour les cônes

Les cônes permettent la vision diurne et les bâtonnets la vision nocturne

La perception de l'intensité lumineuse : l'éblouissement

L'éblouissement résulte de conditions de vision dans lesquelles l'individu est moins apte à percevoir les objets, suite à des luminances ou à des contrastes de luminance excessifs dans l'espace et dans le temps.



L'éblouissement indirect provient d'une réflexion perturbatrice des sources lumineuses sur des surfaces spéculaires ou brillantes telles que le papier, une table ou un écran d'ordinateur.

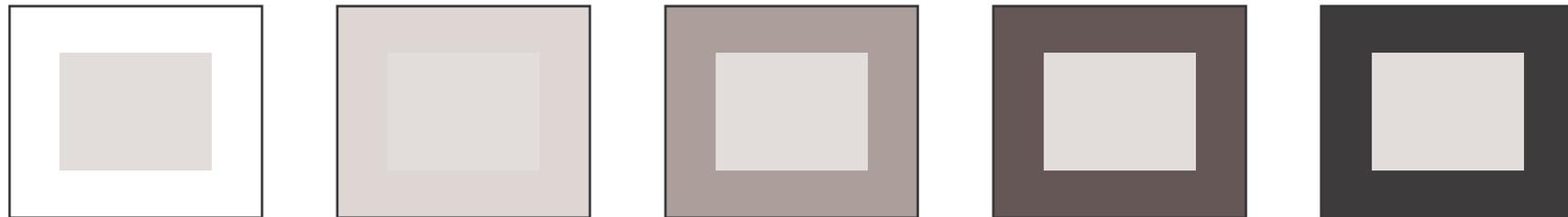
L'éblouissement direct est causé par la présence d'une source lumineuse intense dans le champ de vision.

La perception de l'intensité lumineuse : la sensibilité aux contrastes

La sensibilité aux contrastes est l'aptitude à distinguer des différences de luminance. Sous des conditions d'éclairage pauvres, il peut être impossible de distinguer de faibles contrastes.



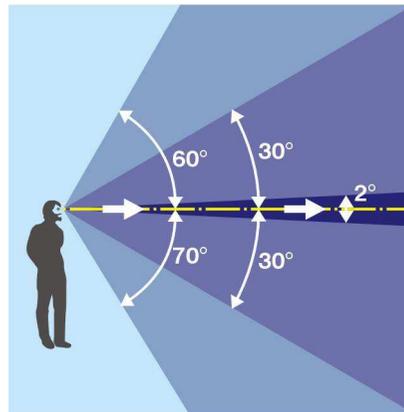
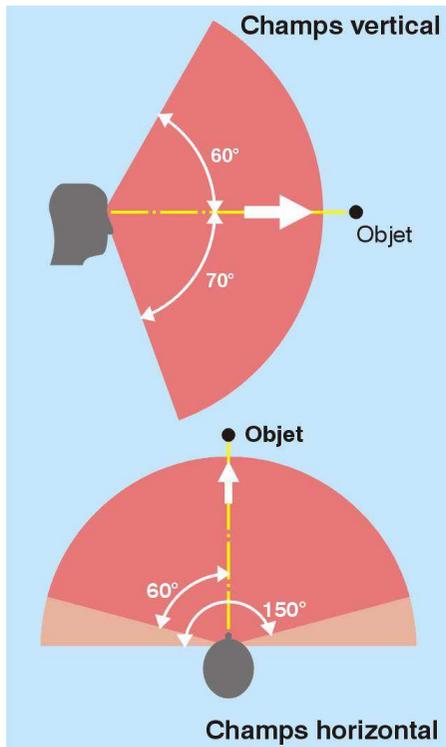
La vision d'un objet dépend du fond sur lequel il se situe



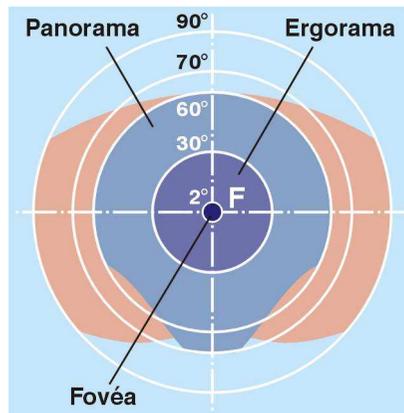
Par effet de contraste, le rectangle intérieur paraît plus clair à l'extrême droite qu'à l'extrême gauche, alors qu'ils présentent tous la même couleur en réalité.

L'appréciation de l'espace : le champ visuel

Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'oeil, sans bouger la tête.



Fovéa (2°): vision des détails très fins,
Ergorama (30°): vision des formes,
Panorama (60 et 70°): vision des mouvements.



Champ visuel perçu simultanément par les deux yeux (bleu) et par chaque oeil séparément (rose)



CSTC



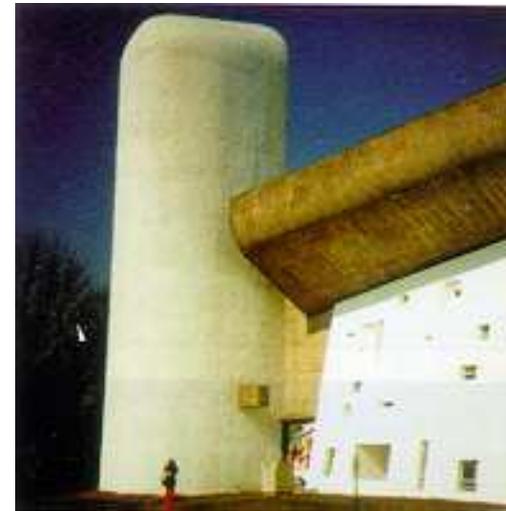
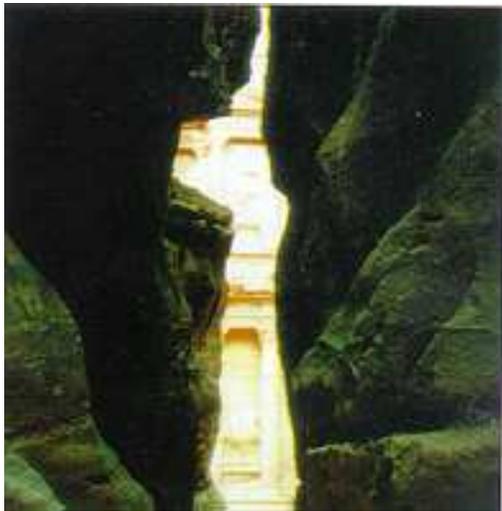
UCL



DGTRE

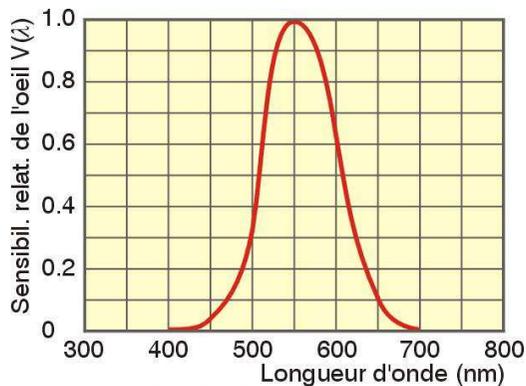
L'appréciation de l'espace : la perception des distances

Le cerveau joue un rôle important dans notre appréhension de l'espace : pour apprécier les distances, il opère une analyse instantanée des éléments situés dans notre champ visuel et la confronte à sa perception du relief



La distinction des couleurs

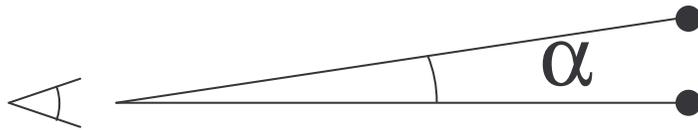
La distinction des couleurs a pour base une légère diffusion de la lumière dans l'œil humain. Le cerveau analyse la proportion de radiation que chaque type de cône reçoit et synthétise cette analyse en une sensation colorée.



La sensibilité de l'œil humain est maximale pour une longueur d'onde d'environ 555 nm

L'acuité visuelle

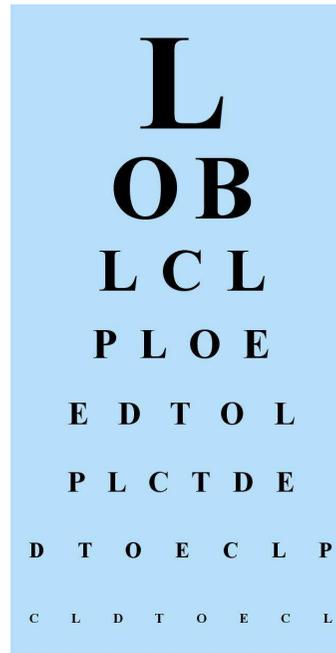
L'acuité visuelle indique la capacité de l'oeil à distinguer de fins détails



Acuité (ou pouvoir séparateur de l'œil) = $1/\alpha$

Une bonne visibilité d'un objet nécessite :

- Une dimension minimale
- Un minimum de temps
- Une luminance minimale
- Un minimum de contraste



C. Le confort visuel

- Les paramètres du confort visuel
- Le niveau d'éclairage
- La distribution lumineuse
- La relation au monde extérieur
- Le spectre lumineux
- La limitation de l'éblouissement
- L'influence de la perception humaine



CSTC



UCL



DGTRE

Les paramètres du confort visuel

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la distribution et à la qualité de la lumière



Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant sont:

- le niveau d'éclairage de la tâche visuelle,
- une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace,
- les rapports de luminance présents dans le local,
- l'absence d'ombres gênantes,
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets,
- une vue vers l'extérieur,
- un rendu des couleurs correct,
- une teinte de lumière agréable,
- l'absence d'éblouissement.



CSTC



UCL

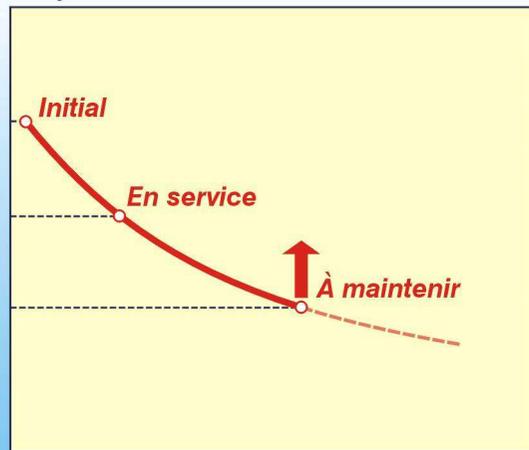


DGTRE

Le niveau d'éclairage

Un niveau d'éclairage minimum est nécessaire pour une vision claire et sans fatigue. Toutefois, un éclairage trop abondant peut être inconfortable.

E moy



Age et durée d'utilisation (an, heure)

Variation de l'éclairage moyen en fonction de l'âge de l'installation

NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD

pr **EN 12464**
CEN/TC 169/WG 2 N 180 F
Janvier 2001

CDU
Descripteurs:

Version Française
Lumière et Éclairage
Éclairage des lieux de travail intérieurs
Les éclairages au niveau du sol

Tableau 5.1: Zones de circulation e

Ref. no.	Type d'intérieur, tâche ou activité	E_m	UGR_L	R_a	Remarques
1.5	Zones de rangement en rayon				
1.5.1	Allées centrales: non occupée	150	22	60	
1.5.2	Allées centrales: occupée	150	22	60	
1.5.3	Station de commande ou de contrôle	150	22	60	

Tableau 5.2: . Éclairage des activités industrielles et des métiers

2.1 Agriculture					
Ref. no.	Type d'intérieur, tâche ou activité	E_m	UGR_L	R_a	Remarques
2.1.1	Chargement et manoeuvre des marchandises, appareils de manutention et outillage	200	25	80	
2.1.2	Bâtiments pour le bétail	50	-	40	
2.1.3	Enclos pour animaux malades, étable pour le vêlage	200	25	80	
2.1.4	Préparation de la nourriture, laiterie, ustensiles de lavage	200	25	80	
2.2 Boulangeries et pâtisseries					
Ref. no.	Type d'intérieur, tâche ou activité	E_m	UGR_L	R_a	Remarques
2.2.1	Préparation et cuisson	300	22	80	
2.2.2	Finition, glaçage, décoration	500	22	80	

Éclairage moyen à maintenir

La distribution lumineuse

L'étude de la distribution de la lumière naturelle du point de vue du confort visuel consiste à trouver un éclairage ni excessif ni trop faible, qui permette une bonne perception des objets et des couleurs dans une ambiance agréable.



Une étude de la distribution lumineuse doit tenir compte des quatre critères suivants:

- la qualité de la répartition de la lumière dans l'espace, impliquant l'étude de l'équilibre harmonieux des luminances et des couleurs,
- les rapports de luminance présents dans le local,
- l'absence d'ombres gênantes,
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets.



CSTC



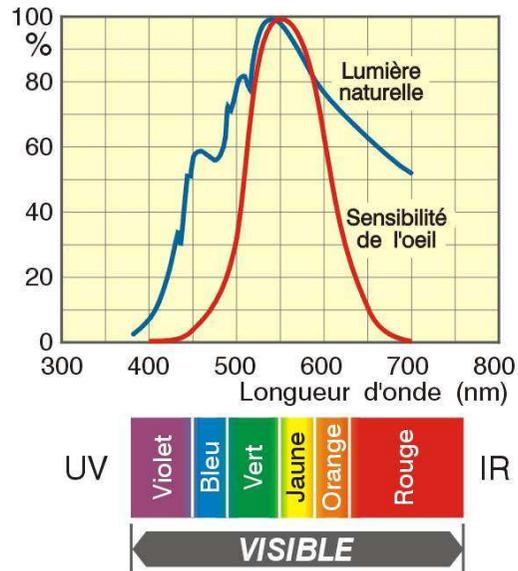
UCL



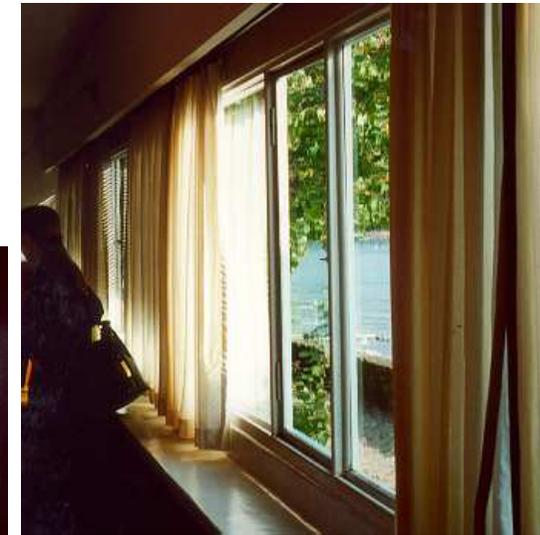
DGTRE

La relation au monde extérieur

La lumière naturelle est l'un des éléments dont l'homme a toujours perçus fortement le besoin et l'impact sur ses activités. Elle influence le bien-être psychosomatique des occupants d'un local



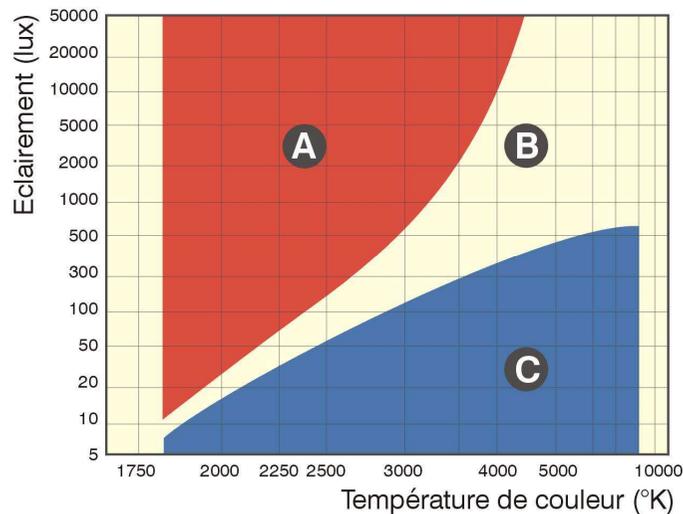
La fenêtre, lien vers le monde extérieur



Courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain et de distribution spectrale de l'éclairage naturel

Le spectre lumineux

La perception des couleurs varie d'une personne à l'autre. Elle est totalement dépendante de la sensibilité de l'œil, qui est fonction de la longueur d'onde du rayonnement visible perçu

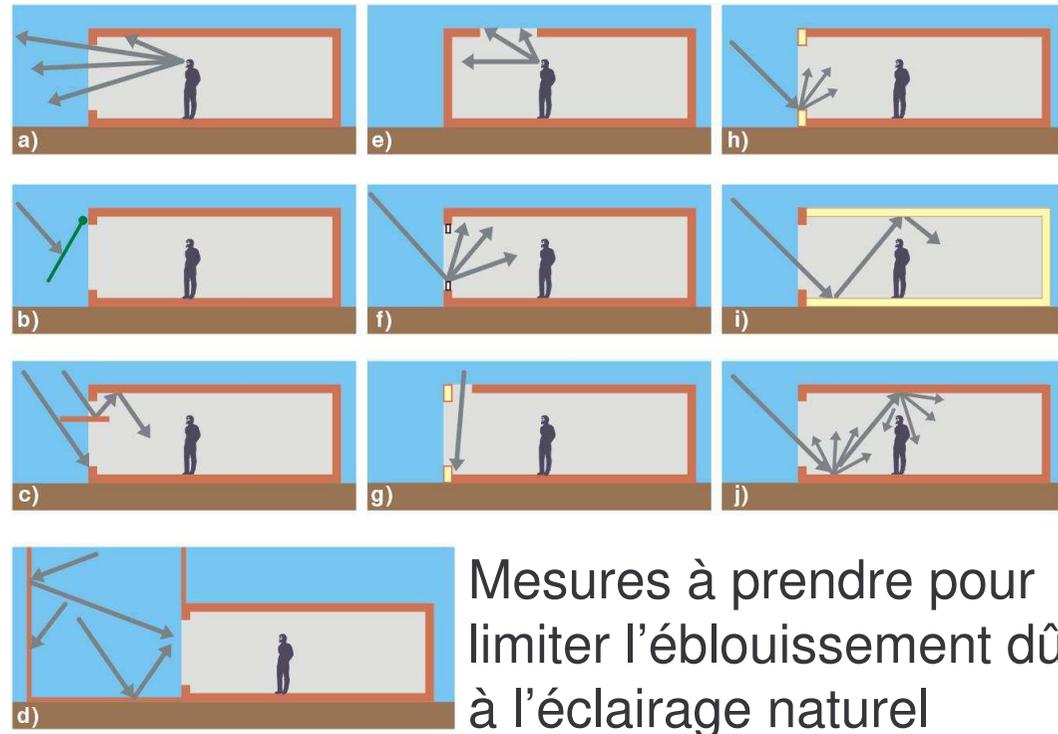
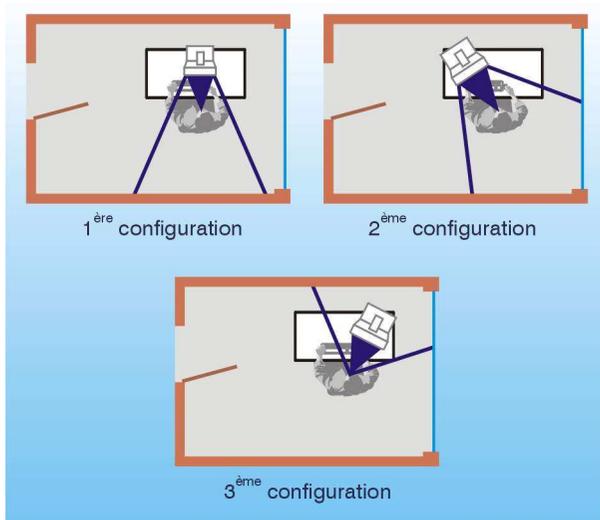


Modification du spectre lumineux de la lumière naturelle

Diagramme de Kruithof

La limitation de l'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.



Position d'un écran d'ordinateur par rapport à la fenêtre

L'influence de la perception humaine

L'espace perçu est toujours une réduction de l'espace réel.

L'agrément visuel est une notion subjective. Il dépend de l'émotion et du sentiment que peut susciter un certain environnement visuel. Parmi les sensations ressenties comme particulièrement agréables, on mentionnera :

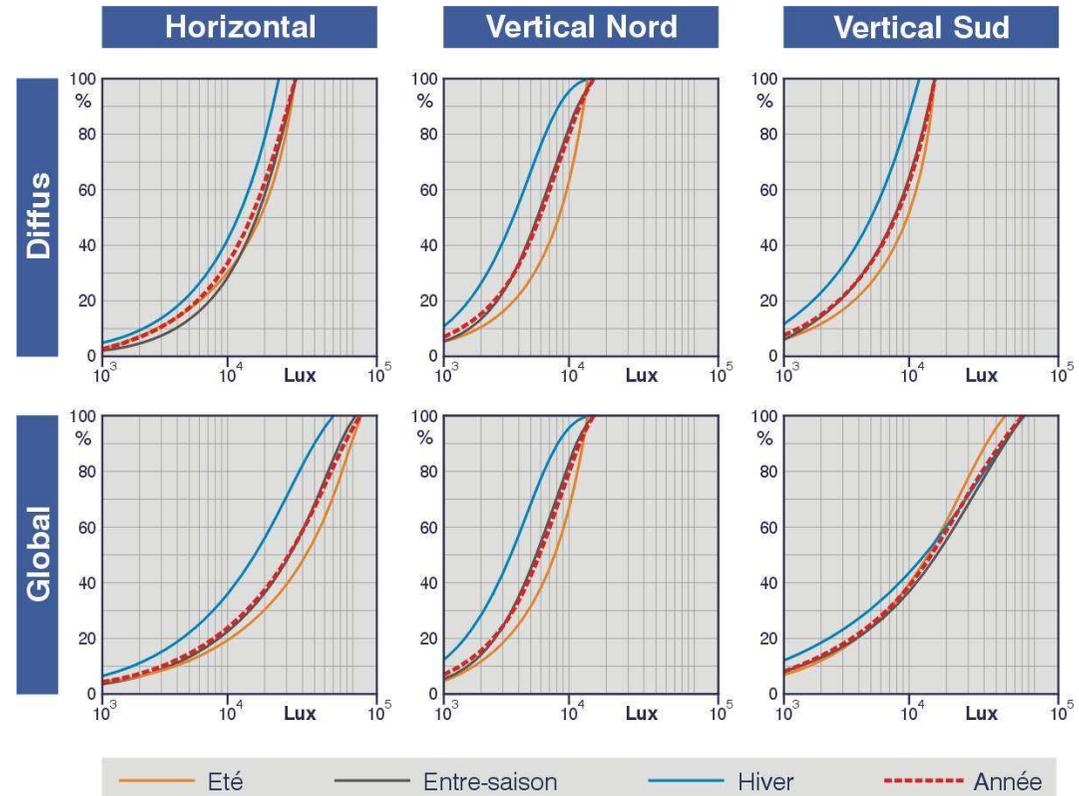
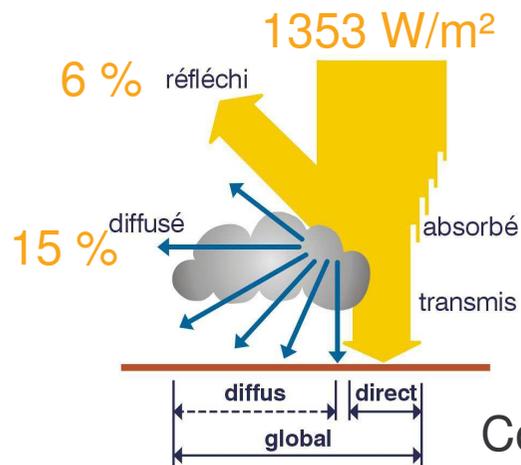
- La présence de lumière naturelle,
- La variation de cette lumière dans le temps,
- Certains effets spéciaux liés à la nature et à la disposition des sources d'éclairage artificiel,
- La possibilité de disposer d'une vue dégagée et agréable,
- L'harmonie des couleurs des parois d'un local.

D. La lumière naturelle

- Disponibilités en lumière du jour
- Eclairage naturel et climat
- Définition des différents types de ciel

Disponibilité en lumière du jour

La disponibilité de la lumière du jour dépend de la position du soleil dans le ciel – définis par l'heure et la position géographique du lieu considéré – ainsi que des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface, ...

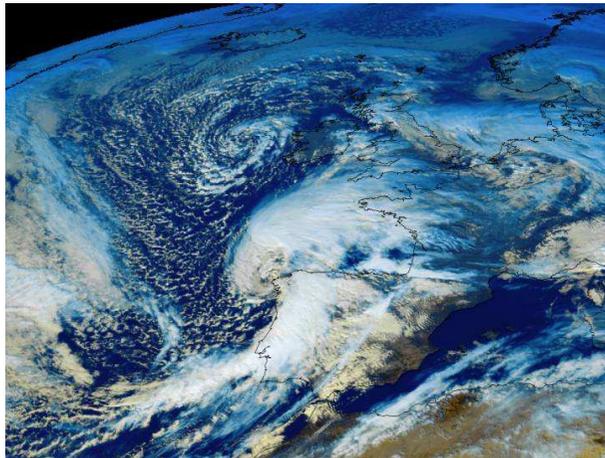


Données d'éclairement et de type de ciel pour Nice

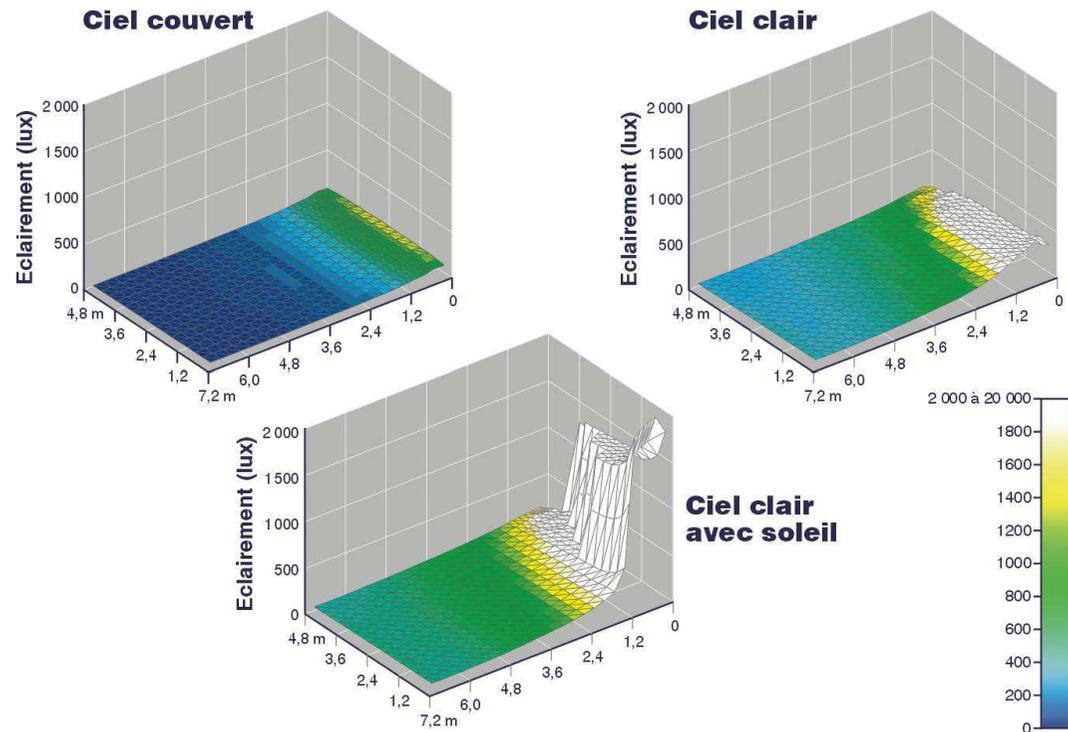
Composition du rayonnement solaire

Eclairage naturel et climat

La couverture nuageuse, qui détermine le type de ciel, a une influence importante sur l'éclairage naturel disponible au sol



Couverture nuageuse, photo satellite



Influence du type de ciel sur l'éclairage intérieur

Définition des différents types de ciel

Vu la multitude des conditions météorologiques existantes, quatre types de ciels standard ont été établis pour les études d'éclairement. Chacun d'eux est caractérisé par la répartition de sa luminance sur la voûte céleste.



Un ciel intermédiaire



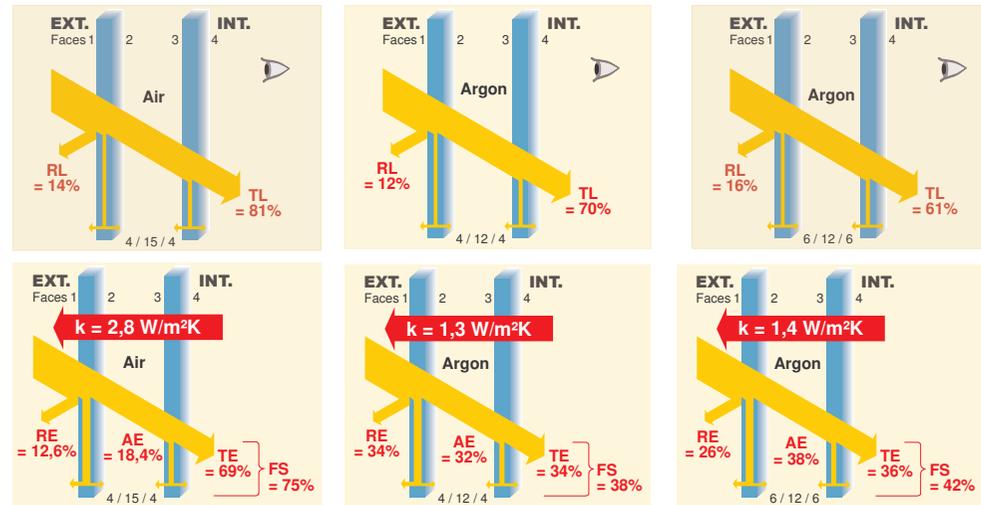
Les différents types de ciel

E. Typologie et matériaux

- Les parois transparentes
- Les parois translucides
- Vitrages absorbants et réfléchissants
- Les protections solaires :
 - *Objectifs*
 - *Choix de la technologie*
 - *Les différents types*
- Les matériaux dans les modèles réduits

Les parois transparentes

La quantité et la qualité de la lumière naturelle transmise à l'intérieur d'un local par une ouverture dépendent du type de paroi vitrée, de sa rugosité, de son épaisseur, de son état de propreté et du nombre de couches utilisées.



Caractéristiques d'un double vitrage classique, d'un double vitrage spectralement sélectif et d'un double vitrage réfléchissant

Sans fenêtre



100 %

Châssis fixe



80 %

Châssis ouvrant



CSTC

Châssis ouvrant + Petits carreaux



70 %

Impact du châssis sur la surface nette de vitrage



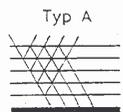
UCL



DGTRE

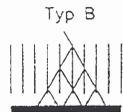
Les parois translucides

Les parois translucides permettent de faire pénétrer la lumière tout en coupant la vue directe au travers de cette paroi.



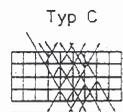
Typ A

- Absorber – parallel**
- Multiple glazing
 - Plastic films
 - IR-reflective glass



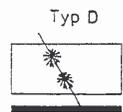
Typ B

- Absorber – perpendicular**
- Parallel slats
 - Honeycombs
 - Capillaries



Typ C

- Cavity structure**
- Duct plates
 - Foam



Typ D

- (Quasi-) homogeneous**
- Glass fibers
 - Aerogel



Isolation transparente



Matériaux translucides

- Isolation transparente
- grande isolation thermique
 - facteur solaire élevé

Classés en fonction de leur structure

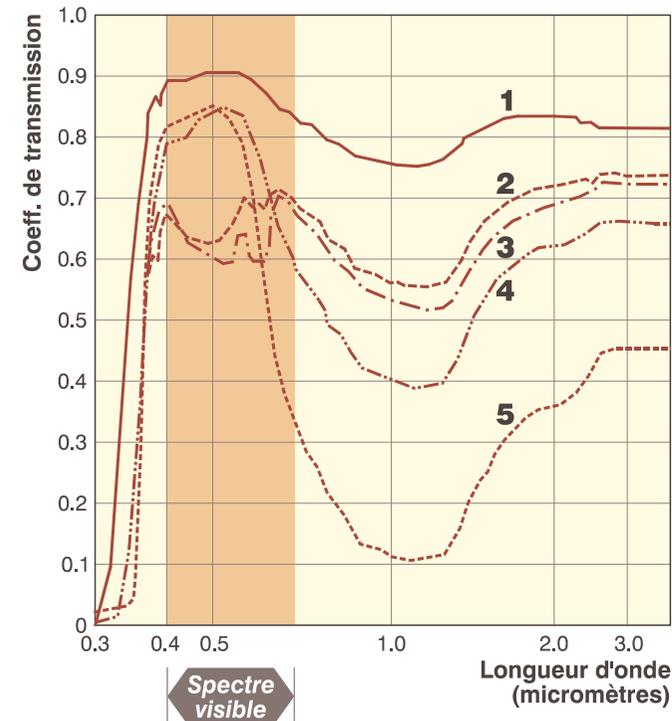
Vitrages absorbants et réfléchissants

Les caractéristiques physiques d'un vitrage peuvent être modifiées en le teintant ou en le recouvrant d'une couche réfléchissante une partie ou l'entièreté du spectre solaire.



les vitrages réfléchissants agissent comme des miroirs en renvoyant l'image des bâtiments voisins

Courbe spectrale de transmission lumineuse de divers vitrages teintés



- 1 : Vitrage clair
- 2 : Vitrage teinté bronze
- 3 : Vitrage teinté gris
- 4 : Vitrage teinté vert
- 5 : Vitrage sélectif

Les protections solaires : objectifs

Les protections solaires permettent d'atteindre différents objectifs en fonction des situations rencontrées. Le choix du type de protection dépendra, dès lors, de l'importance que l'utilisateur donnera à chacun d'eux en fonction de ses besoins.



- *Pas d'exposition directe au soleil*
- *Diminution de la surchauffe*
- *Limitation de l'éblouissement*

Les protections solaires : choix de la technologie

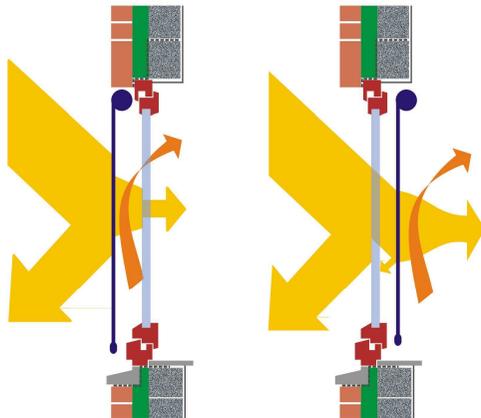
Les deux grandes classifications des protections solaires sont basées sur leur position par rapport au vitrage et leur mobilité.



Protection fixe



Protection mobile



Comportement d'une protection solaire par rapport à la chaleur, selon sa position

Les protections solaires : les différents types

Il existe différents types de protections solaires : ce sont les protections liées à l'environnement, les éléments architecturaux, les protections ajoutées ainsi que les vitrages protecteurs.



Lightshelf



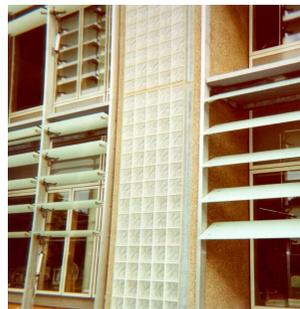
Brise-soleil



Jalousie



Stores vénitiens



Persiennes



Store enroulable



Marquise



Stores projetés à l'italienne

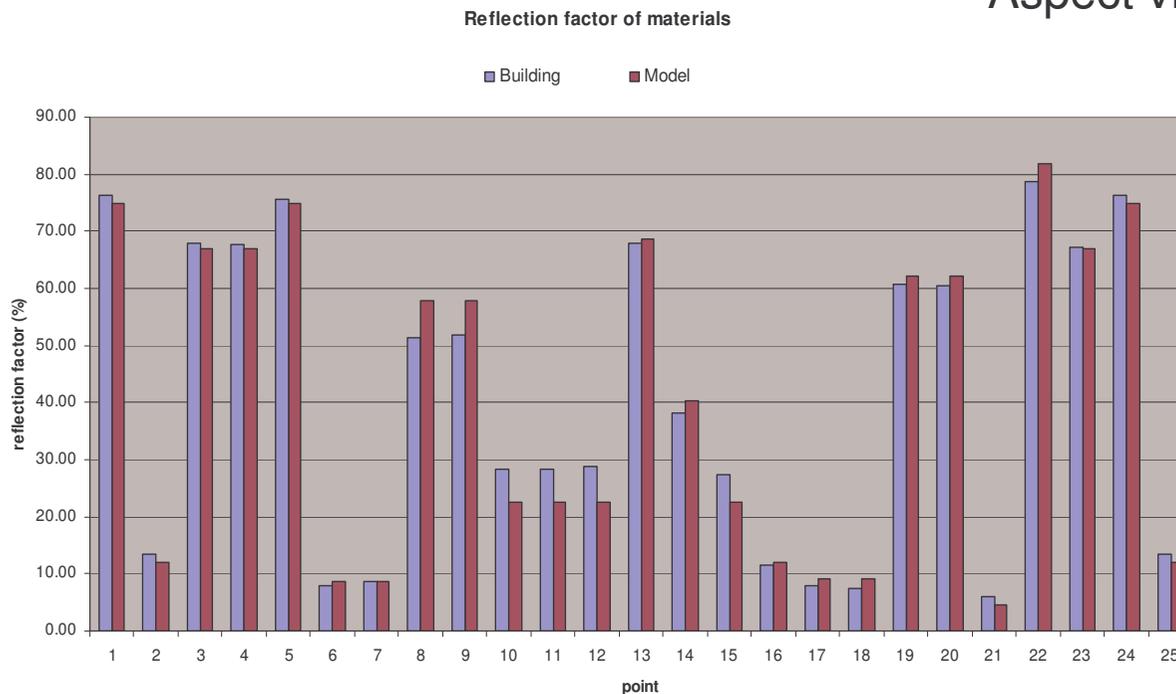
Protections solaires liées à l'environnement

Les matériaux dans les modèles réduits

Le respect des coefficients de réflexion est indispensable pour assurer une image correcte du comportement réel

Réflexion - principalement diffuse
Détermination des coefficients de réflexion via colorimètre (diffus) ou spectrophotométrie (diffus + direct pour chaque longueur d'onde)

Aspect visuel – couleur importante



Gamme de cartons types

Fonction de la configuration future du local

Vitrage :

Pas de modèle physique

Coefficient multiplicatif

F. Eclairage artificiel

- La complémentarité naturel – artificiel
 - Le zonage de l'éclairage artificiel
 - La régulation de l'éclairage artificiel

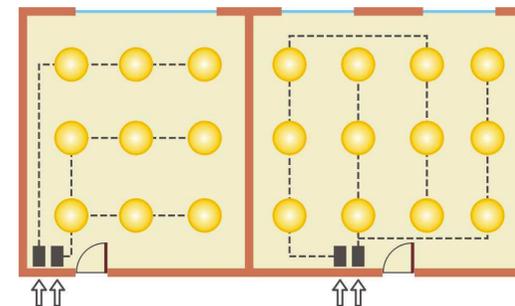
La complémentarité naturel – artificiel : le zonage de l'éclairage artificiel

Le zonage consiste à raccorder l'installation d'éclairage en plusieurs secteurs commutables séparément.



Zonage en fonction des disponibilités d'éclairage naturel

Principe de zonage en fonction des disponibilités d'éclairage naturel



Division du circuit d'éclairage en deux circuits indépendants

La complémentarité naturel – artificiel : régulation de l'éclairage artificiel

Le contrôle du flux lumineux des lampes peut être réalisé suivant plusieurs modes de gestion différents. Il s'agit de la gestion horaire, de la gestion en fonction de la présence et de la gestion en fonction des disponibilités d'éclairage naturel.

