

Rédacteur
Richard Forster

Table des matières

Les types de lumière	<i>Richard Forster</i>	46.2
Les conditions nécessaires du confort visuel	<i>Fernando Ramos Pérez et Ana Hernández Calleja</i>	46.7
Les conditions d'éclairage général	<i>N. Alan Smith</i>	46.13

● LES TYPES DE LUMIÈRE

Richard Forster

Une lampe est un convertisseur d'énergie. Bien qu'elle puisse trouver d'autres applications, son but premier est la transformation de l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique dans le domaine visible. Il existe de nombreux moyens de créer de la lumière. La méthode standard de création d'un éclairage général consiste à convertir l'énergie électrique en lumière.

Les types de lumière

Incandescence

Lorsqu'on chauffe des solides ou des liquides, ils émettent aux températures supérieures à 1 000 K un rayonnement visible; ce phénomène est appelé «incandescence».

Il constitue la base de la production de lumière dans les lampes à filament: un courant électrique traverse un mince fil de tungstène, dont la température atteint 2 500 à 3 200 K, selon le type de lampe et son utilisation.

Cette méthode est soumise à une limite, décrite par la loi de Planck pour l'émissivité du corps noir, selon laquelle la répartition spectrale de l'énergie rayonnée augmente avec la température. Aux environs de 3 600 K et plus, il existe un gain significatif dans l'émission du rayonnement visible, et la longueur d'onde du maximum d'émission se déplace dans le domaine visible. Cette température est proche du point de fusion du tungstène, utilisé pour le filament, et la température limite se situe donc en pratique aux alentours de 2 700 K, car au-delà, l'évaporation du filament devient excessive. Ces déplacements de spectre ont, entre autres, pour conséquence qu'une grande partie du rayonnement émis n'est pas restituée sous forme de lumière, mais sous forme de chaleur dans la zone infrarouge. Les lampes à incandescence peuvent donc constituer des systèmes de chauffage efficaces et sont employées en tant que tels pour le séchage en imprimerie, la cuisson des aliments et l'élevage.

Décharge électrique

La décharge électrique est une technique utilisée dans les sources d'éclairage modernes pour le commerce et l'industrie, du fait de sa meilleure efficacité dans la production de lumière. Certains types de lampes combinent la décharge électrique et la photoluminescence.

Un courant électrique traversant un gaz provoque une excitation des atomes et des molécules qui émettent un rayonnement avec un spectre caractéristique des éléments présents. Deux métaux sont habituellement utilisés, le sodium et le mercure, car leurs caractéristiques permettent d'obtenir des rayonnements dans le domaine visible. Aucun de ces deux métaux n'émettant de spectre continu, les lampes à décharge présentent des spectres sélectifs. Leur rendu des couleurs ne sera jamais identique à celui d'un spectre continu. Les lampes à décharge sont souvent classées en haute et basse pression, bien que ces termes soient relatifs et qu'une lampe à vapeur de sodium haute pression fonctionne au-dessous d'une atmosphère.

Les types de luminescence

La *photoluminescence* se produit lorsque le rayonnement absorbé par un solide est réémis avec une longueur d'onde différente. Quand le rayonnement réémis se trouve dans le spectre visible, le phénomène est appelé *fluorescence* ou *phosphorescence*.

L'*électroluminescence* est un phénomène auquel on assiste lorsque la lumière est produite par un courant électrique traversant certains solides, tels que des matériaux phosphoreux. Elle est utilisée

Tableau 46.1 • Amélioration du flux lumineux et de la puissance de quelques tubes fluorescents types de 1 500 mm

Puissance (W)	Diamètre (mm)	Gaz de remplissage	Flux lumineux (lumens)
80	38	argon	4 800
65	38	argon	4 900
58	25	krypton	5 100
50	25	argon	5 100 (ballast haute fréquence)

dans les enseignes lumineuses et les tableaux de bord, mais elle ne s'est pas révélée être une source lumineuse pratique pour l'éclairage intérieur ou extérieur.

L'évolution des lampes électriques

Bien que le progrès technologique ait permis de fabriquer différentes lampes, ce sont les contraintes du marché extérieur qui ont été les principaux facteurs à influencer sur leur développement. Ainsi, la production de lampes à filament utilisées au début du XX^e siècle n'est devenue possible qu'après la mise au point de pompes à vide efficaces et du tréfilage du tungstène. Toutefois, ce sont la production et la distribution de l'électricité à grande échelle pour répondre à la demande d'éclairage électrique qui furent déterminantes pour la croissance du marché. L'éclairage électrique offrait de nombreux avantages par rapport à l'éclairage au gaz ou au pétrole, à savoir une lumière stable nécessitant peu d'entretien et une meilleure sécurité due à l'absence de flamme et de sous-produits de combustion.

Durant la période de reconstruction qui suivit la seconde guerre mondiale, l'accent fut mis sur la productivité. Le tube fluorescent devint la principale source d'éclairage dominante, car il permettait un éclairage sans ombres et sans chaleur des usines et des bureaux, et donc une utilisation optimale de l'espace. Le tableau 46.1 donne les spécifications de flux lumineux et de puissance d'un tube fluorescent type de 1 500 mm.

Dans les années soixante-dix, l'augmentation des prix du pétrole fit de l'énergie un élément important des coûts de fonctionnement. La demande du marché se porte sur les lampes fluorescentes qui produisent la même quantité de lumière pour une moindre consommation d'électricité. La technologie des lampes a été améliorée de plusieurs manières. En ce début de siècle, la population est très sensible aux problèmes écologiques de la planète. Une meilleure utilisation des matières premières non renouvelables, le recyclage ou l'élimination des produits selon des procédures de sécurité et le souci constant des économies d'énergie (en particulier de celle produite à partir de combustibles fossiles) ont un impact certain sur la conception actuelle des lampes.

Tableau 46.2 • Efficacité de lampes types

Efficacité de lampes	
Lampe à incandescence de 100 W	14 lumens/watt
Tube fluorescent de 58 W	89 lumens/watt
Lampe à sodium haute pression de 400 W	125 lumens/watt
Lampe à sodium basse pression de 131 W	198 lumens/watt

Tableau 46.3 • Système international de codification des lampes (ILCOS) pour certains types de lampes

Type (code)	Puissance (watts)	Rendu des couleurs	Température de couleur (K)	Durée de vie (heures)
Lampes fluorescentes compactes (FS)	5-55	Bon	2 700-5 000	5 000-10 000
Lampes à vapeur de mercure haute pression (QE)	80-750	Passable	3 300-3 800	20 000
Lampes à vapeur de sodium haute pression (S-)	50-1 000	Mauvais à bon	2 000-2 500	6 000-24 000
Lampes à incandescence (I)	5-500	Bon	2 700	1 000-3000
Lampes à induction (XF)	23-85	Bon	3 000-4 000	10 000-60 000
Lampes à vapeur de sodium basse pression (LS)	26-180	Couleur jaune monochromatique	1 800	16 000
Lampes halogènes (HS) basse tension	12-100	Bon	3 000	2 000-5 000
Lampes aux halogénures métalliques (M-)	35-2 000	Bon à excellent	3 000-5 000	6 000-20 000
Tube fluorescent	4-100	Passable à bon	2 700-6 500	10 000-15 000
Lampes halogènes à tungstène (HS)	100-2 000	Bon	3 000	2 000-4 000

Les critères de performance

Les critères de performance varient selon les applications. En général, leur importance relative ne répond à aucune hiérarchisation.

Flux lumineux: le flux lumineux d'une lampe détermine sa bonne adaptation à la taille de l'installation et à la quantité de lumière nécessaire.

Apparence de la couleur et rendu des couleurs: des échelles et des valeurs numériques différentes s'appliquent à l'apparence de couleur et au rendu des couleurs. Il est important de garder présent à l'esprit que ces chiffres ne sont donnés qu'à titre indicatif et que certains ne sont que des approximations. Dans la mesure du possible, des évaluations d'adaptation devraient être effectuées avec des lampes réelles et avec les couleurs ou les matériaux applicables à la situation.

Durée de vie des lampes: la plupart des lampes devront être remplacées plusieurs fois au cours de la vie de l'installation d'éclairage. Les concepteurs devraient donc réduire le plus possible les désagréments que l'entretien et les pannes occasionnelles peuvent causer aux occupants. Les lampes sont utilisées dans un large éventail d'applications. La durée de vie moyenne constitue souvent un compromis entre le coût et les performances. Ainsi, la lampe d'un projecteur de diapositives aura une durée de vie d'une centaine d'heures, car il est important pour la qualité de l'image d'avoir un flux lumineux maximal. Au contraire, certaines lampes d'éclairage de voies publiques peuvent être changées tous les deux ans, soit après quelque 8 000 heures de fonctionnement.

En outre, la durée de vie des lampes est affectée par les conditions de fonctionnement, de sorte qu'il n'existe pas une valeur unique applicable à tous les cas. De même, la durée de vie effective d'une lampe peut être déterminée par différents modes de défaillance. Une défaillance physique, telle que la rupture du filament ou de la lampe, peut être précédée d'une diminution du flux lumineux ou d'un changement de son apparence de couleur. La durée de vie d'une lampe dépend des conditions d'environnement extérieures telles que la température, les vibrations, la fréquence d'allumage, les fluctuations de la tension d'alimentation, l'orientation, etc.

Il est à noter que la durée de vie moyenne donnée pour un type de lampe est définie comme le temps au bout duquel la moitié des lampes d'un lot d'essai est hors service. Cette définition est peu susceptible de s'appliquer à de nombreuses installations commerciales ou industrielles et la durée de vie réelle d'une lampe est habituellement inférieure aux valeurs publiées dont on ne doit se servir que dans un but comparatif.

Efficacité: en règle générale, l'efficacité d'un type de lampe donné s'améliore avec l'augmentation de la puissance nominale, car la plupart des lampes ont une certaine perte fixe. Cependant, les différents types de lampes présentent de nettes différences d'efficacité. Il convient d'utiliser les lampes possédant la meilleure efficacité lumineuse, à condition que les critères de taille, de couleur et de durée de vie soient également remplis. Les économies d'énergie ne devraient pas se faire aux dépens du confort visuel ou des performances des occupants. Le tableau 46.2 donne l'efficacité de quelques lampes types.

Les principaux types de lampes

Au fil des années, différents systèmes de nomenclatures ont été établis par des normes et des commissions nationales et internationales.

En 1993, la Commission électrotechnique internationale (CEI) a publié un nouveau système international de codification des lampes (*Système international de codification des lampes (ILCOS)*) (CEI, 1999) destiné à remplacer les systèmes régionaux et nationaux

Figure 46.1 • Schéma d'une lampe d'éclairage général standard

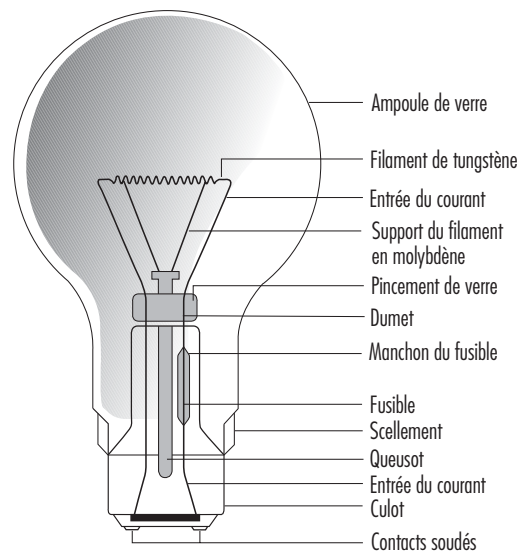


Tableau 46.4 • Couleurs et formes courantes des lampes à incandescence avec codes ILCOS

Couleur/forme	Code
Claire	/C
Dépolie	/F
Blanc	/W
Rouge	/R
Bleu	/B
Vert	/G
Jaune	/Y
Standard (poire)	IA
Flamme	IB
Conique	IC
Globe	IG
Oignon	IM

existants. Le tableau 46.3 donne un échantillon de codes ILCOS abrégés pour différentes lampes.

Lampes à incandescence

Ces lampes utilisent un filament de tungstène placé dans un gaz inerte ou dans le vide à l'intérieur d'une ampoule de verre. Le gaz inerte élimine l'évaporation du tungstène et réduit le noircissement de l'enveloppe. Il existe une grande variété de formes de lampes dont l'aspect vise surtout un but décoratif. La structure d'une lampe standard d'éclairage général est illustrée par la figure 46.1.

Les lampes à incandescence existent également dans un large éventail de couleurs et de finitions. Le tableau 46.4 donne des exemples de codes ILCOS et de formes types.

Les lampes à incandescence demeurent très utilisées pour l'éclairage domestique du fait de leur coût modique et de leur compacité. Toutefois, pour l'éclairage commercial et industriel, leur faible efficacité les rend d'un emploi coûteux, ce qui explique pourquoi les lampes à décharge constituent le choix le plus courant. Ainsi, une lampe de 100 W possède une efficacité type de 14 lumens/watt, tandis qu'une lampe fluorescente de 36 W apporte 96 lumens/watt.

Figure 46.2 • Le cycle halogène

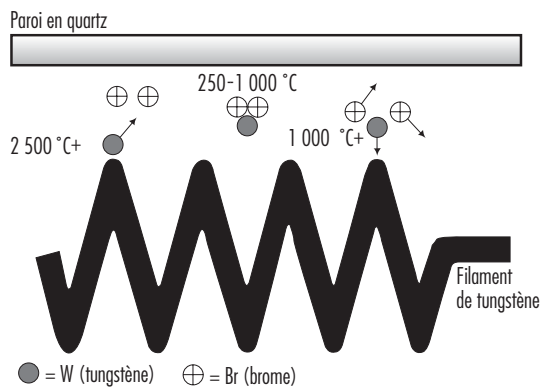
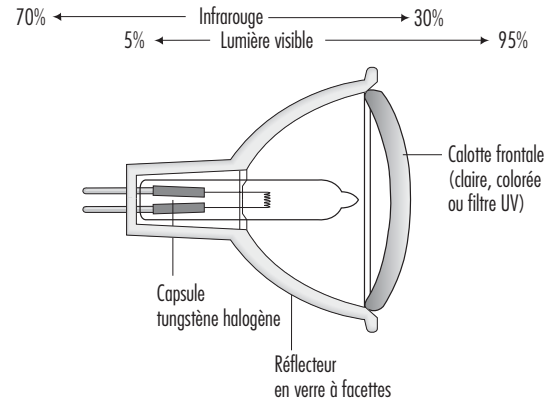


Figure 46.3 • Lampe à réflecteur dichroïque basse tension



Les lampes à incandescence dont on peut facilement faire varier le flux en réduisant la tension d'alimentation restent employées lorsque la variation de la lumière constitue une caractéristique d'utilisation importante.

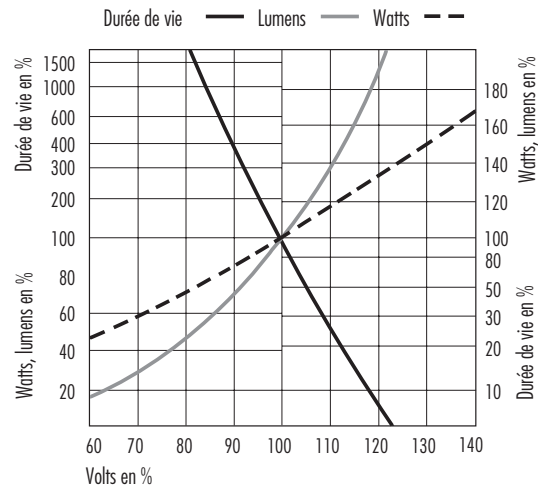
Le filament de tungstène constitue une source lumineuse compacte, facile à focaliser au moyen de réflecteurs ou de lentilles. Les lampes à incandescence sont très utiles à l'éclairage des vitrines pour lequel il est nécessaire d'orienter le faisceau lumineux.

Lampes tungstène halogène

Similaires aux lampes à incandescence, ces lampes produisent de la lumière de la même manière, à partir d'un filament de tungstène. Cependant, l'ampoule contient un gaz halogène (brome ou iode) qui limite chimiquement l'évaporation du tungstène (voir figure 46.2).

Pour le cycle halogène, il est essentiel que l'ampoule présente une température de paroi de 250 °C minimum pour assurer le maintien de l'halogénure de tungstène à l'état gazeux et, donc, éviter sa condensation sur l'ampoule. Cette température implique de fabriquer les ampoules en quartz et non pas en verre, ce qui permet de réduire leur taille.

Figure 46.4 • Lampes standards à filament et tension d'alimentation



La plupart des lampes tungstène halogène offrent une meilleure durée de vie que des lampes à incandescence équivalentes, et leur filament atteignant une température supérieure, il génère une lumière plus intense, d'une couleur plus blanche.

Les lampes tungstène halogène sont maintenant très utilisées dans les domaines où une taille réduite et un haut niveau de performances constituent des besoins primordiaux, y compris l'éclairage des scènes de théâtre et des plateaux de cinéma et de télévision où l'orientation et la variation de flux sont des attentes courantes.

Lampes tungstène halogène basse tension

A l'origine, ces lampes ont été conçues pour les projecteurs de diapositives et de cinéma. En 12 V pour la même puissance, le filament devient plus petit et plus épais que pour 230 V, ce qui permet une meilleure focalisation, ainsi qu'une augmentation du flux lumineux du fait de la plus grande masse du filament qui autorise une température de fonctionnement plus élevée. Le filament épais est plus robuste. Ces avantages n'ont pas échappé au marché de l'éclairage des surfaces de vente et, bien qu'elles requièrent un transformateur réducteur de tension, ces lampes sont maintenant largement utilisées pour l'éclairage des vitrines (voir figure 46.3).

Bien que les utilisateurs de projecteurs de cinéma réclament plus de lumière possible, une chaleur excessive détériore le support transparent. Un type de réflecteur spécial a été développé, qui ne réfléchit que le rayonnement visible et transmet vers l'arrière de la lampe le rayonnement infrarouge (chaleur). Ce dispositif est désormais intégré à un grand nombre de lampes à réflecteurs basse tension pour l'éclairage des étalages et pour le matériel de projection.

Sensibilité à la tension: toutes les lampes à filament sont sensibles aux variations de tension, car elles affectent leur flux lumineux ainsi que leur durée de vie. La politique d'«harmonisation» de la tension d'alimentation à 230 V dans l'ensemble de l'Europe se concrétise par l'élargissement des tolérances allouées aux compagnies productrices. La tendance s'oriente vers $\pm 10\%$, ce qui correspond à une plage de tensions de 207 à 253 V. Les lampes à incandescence et les lampes tungstène halogène ne peuvent pas fonctionner valablement dans cette plage, et il sera donc nécessaire d'adapter la tension d'alimentation réelle à la puissance des lampes (voir figure 46.4).

Les lampes à décharge seront également affectées par cette large variation de tension et, dans ces conditions, il sera important de bien définir leur ballast.

Tubes fluorescents

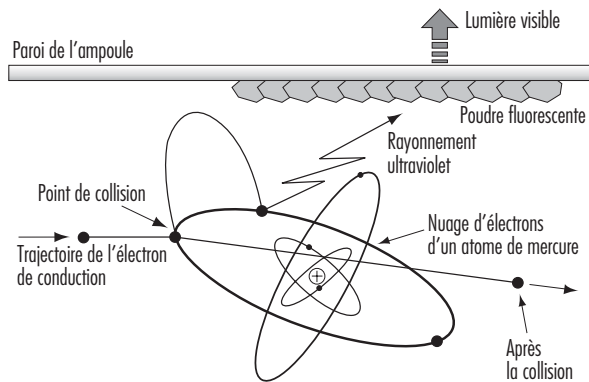
Il s'agit de lampes à vapeur de mercure basse pression qui existent en deux versions: à «cathodes chaudes» et à «cathodes froides». Le tube fluorescent classique utilisé dans les bureaux et les usines correspond à la première version; le terme «cathode chaude» se rapporte à l'amorçage de la lampe par préchauffage des électrodes pour créer une ionisation suffisante du gaz et des vapeurs de mercure afin de stabiliser la décharge.

Les lampes à cathodes froides sont principalement utilisées pour les enseignes et la publicité (voir figure 46.5).

Les lampes fluorescentes nécessitent un ballast externe pour l'amorçage et la stabilisation du courant. Outre la petite quantité de vapeur de mercure, elles contiennent un gaz d'amorçage (argon ou krypton).

La basse pression du mercure provoque une décharge à émission lumineuse dans le bleu pâle. La majeure partie du rayonnement se trouve dans la zone ultraviolette à 254 nm, fréquence de rayonnement caractéristique du mercure. La paroi intérieure du tube comporte une fine couche de substance fluorescente, qui absorbe les ultraviolets (UV) et rayonne l'énergie sous forme de

Figure 46.5 • Principe de la lampe fluorescente



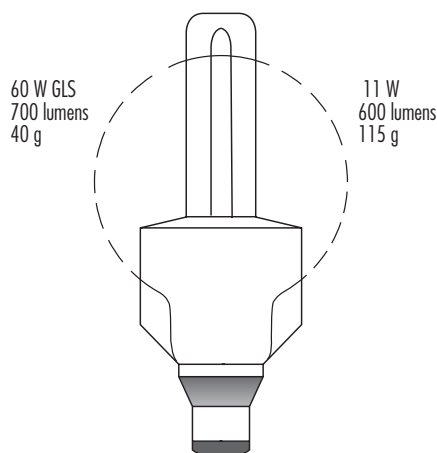
lumière visible. La qualité de la couleur de la lumière est déterminée par la couche fluorescente. Il existe différentes substances fluorescentes émettant diverses couleurs et offrant plusieurs rendus des couleurs.

Dans les années cinquante, les substances fluorescentes existantes offraient le choix entre une efficacité lumineuse raisonnable (60 lumens/watt) avec une moins bonne lumière dans les rouges et les bleus, ou un meilleur rendu des couleurs avec des substances fluorescentes «de luxe», mais d'un moindre rendement (40 lumens/watt).

De nouvelles substances fluorescentes à bande étroite furent développées dans les années soixante-dix. Elles émettaient séparément dans le rouge, le bleu et le vert mais, combinées, elles produisaient une lumière blanche. Un dosage des proportions permettait d'obtenir une gamme d'apparences colorées offrant toutes un excellent rendu des couleurs. Ces substances employées pour les lampes à trois bandes sont plus efficaces que les anciennes et constituent la solution d'éclairage la plus économique, même si les lampes sont plus chères. L'amélioration de l'efficacité réduit les coûts d'installation et de fonctionnement.

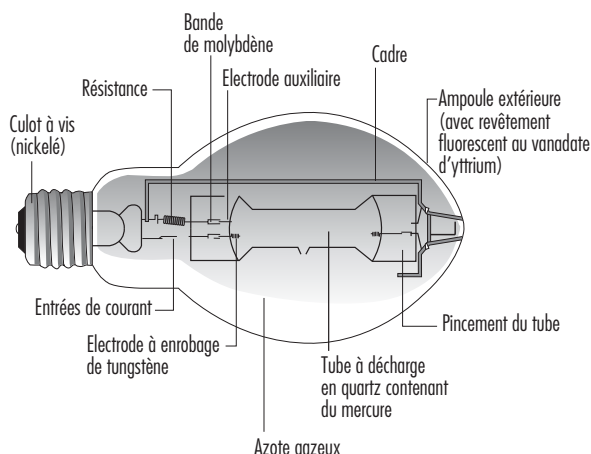
Le principe des «trois bandes» a été étendu aux lampes cinq bandes pour les applications nécessitant un excellent rendu des couleurs, comme dans les galeries d'art et en chromatique industrielle.

Figure 46.6 • Lampe compacte à tube fluorescent replié en double U



46. L'ÉCLAIRAGE

Figure 46.7 • Éléments constitutifs d'une lampe à vapeur de mercure



Les substances fluorescentes modernes à bande étroite offrent une plus large durabilité, un meilleur maintien du flux lumineux et une durée de vie de lampe accrue.

Lampes fluorescentes compactes

Du fait de sa forme linéaire, le tube fluorescent n'est pas destiné dans la pratique à remplacer la lampe à incandescence. Des tubes étroits et de petite taille peuvent être configurés pour avoir à peu près la même dimension que la lampe à incandescence, mais cela impose une densité superficielle de puissance beaucoup plus importante sur les substances fluorescentes. L'utilisation des substances à trois bandes est essentielle pour obtenir une durée de vie acceptable pour les lampes (voir figure 46.6).

Toutes les lampes fluorescentes compactes utilisent des substances à trois bandes. Si elles sont employées avec des tubes fluorescents, ces derniers doivent donc également émettre sur trois bandes pour assurer l'homogénéité des couleurs.

Certaines lampes compactes comportent un ballast incorporé pour pouvoir être substituées aux lampes à incandescence. La gamme s'agrandit et permet une évolution facile des installations existantes pour un éclairage présentant un meilleur rapport énergie/efficacité. Ces lampes à ballast incorporé ne conviennent pas aux installations comportant des gradateurs de lumière.

Ballast électronique haute fréquence: si la fréquence d'alimentation normale de 50 ou 60 Hz passe à 30 kHz, l'efficacité des tubes fluorescents augmente de 10%. Il existe des circuits électroniques susceptibles d'alimenter une seule lampe à la fois à cette fréquence. Ils sont conçus pour assurer le même flux lumineux que le ballast bobiné, à partir d'une puissance de lampe réduite, ce qui permet de conjuguer une bonne efficacité lumineuse avec l'avantage d'une augmentation notable de sa durée de vie. Ces dispositifs électroniques peuvent fonctionner sous une certaine plage de tensions d'alimentation.

Du fait de l'absence de norme commune pour les ballasts électroniques, les performances des lampes peuvent être différentes des informations publiées par les fabricants de lampes.

L'utilisation d'un ballast électronique haute fréquence élimine l'habituel problème du papillotement auquel certaines personnes peuvent être sensibles.

Lampes à induction

Des lampes utilisant le principe de l'induction ont récemment fait leur apparition sur le marché. Il s'agit de lampes à vapeur de

mercure à basse pression avec une couche de substances fluorescentes à trois bandes, similaires aux lampes fluorescentes, destinées à la production de lumière. L'énergie est transférée à la lampe par rayonnement haute fréquence à environ 2,5 MHz à partir d'une antenne située au centre de la lampe. Il n'existe pas de connexion physique entre l'ampoule et la bobine. Sans électrodes ni connexions filaires, la structure du tube de décharge est plus simple et plus durable. La durée de vie de la lampe est principalement déterminée par la fiabilité des composants électroniques et le maintien du flux lumineux de la couche fluorescente.

Lampes à vapeur de mercure à haute pression

Les lampes à décharge à haute pression sont plus compactes et supportent des charges électriques plus importantes; elles nécessitent par conséquent des tubes à décharge en quartz pour résister à la pression et à la température. Le tube à décharge est enfermé dans une enveloppe extérieure en verre remplie d'azote ou d'argon-azote pour réduire l'oxydation et les décharges. L'ampoule filtre efficacement le rayonnement ultraviolet généré par le tube à décharge (voir figure 46.7).

À haute pression, la décharge dans la vapeur de mercure émet principalement un rayonnement bleu et vert. Pour améliorer la couleur, une couche de poudre fluorescente sur l'ampoule extérieure ajoute une émission rouge. Il existe des versions de luxe avec une plus grande part de rouge, donnant un flux lumineux supérieur et un meilleur rendu des couleurs.

Toutes les lampes à décharge haute pression demandent un certain temps pour atteindre le fonctionnement en régime établi. La décharge initiale est favorisée par le gaz d'amorçage, puis le métal s'évapore au fur et à mesure que la température de la lampe augmente.

Lorsque la pression est stable, la lampe ne redémarre pas immédiatement sans un système d'amorçage spécial. Il faut attendre que la lampe refroidisse suffisamment et que la pression chute pour que la tension d'alimentation normale ou le circuit d'allumage puisse rétablir l'arc.

Les lampes à décharge ayant une caractéristique de résistance négative, le ballast extérieur est nécessaire pour limiter le courant. Ces éléments de ballast entraînent des pertes, de sorte que l'utilisateur doit prendre en compte la consommation totale dans le calcul des coûts de fonctionnement et de l'installation électrique. Il existe une exception pour les lampes à mercure haute pression, dont un type comporte un filament de tungstène qui fonctionne comme limiteur de courant et ajoute les couleurs chaudes à la décharge bleue et verte, ce qui permet le remplacement direct des lampes à incandescence.

Bien que les lampes à vapeur de mercure aient une durée de vie assez longue d'environ 20 000 heures, le flux lumineux tombe à environ 55% du flux initial à la fin de cette période et par conséquent la durée de vie économique peut être plus courte.

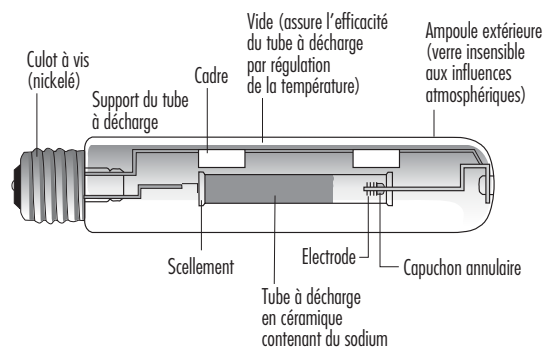
Lampes aux halogénures métalliques

Il est possible d'améliorer la couleur et le flux lumineux des lampes à vapeur de mercure en ajoutant différents métaux à l'arc du mercure. La dose étant faible pour chaque lampe, il est plus pratique, pour une application précise, d'employer les métaux sous forme de poudre comme les halogénures qui, lorsque la lampe chauffe, se dissocient en libérant le métal.

Une lampe aux halogénures métalliques peut utiliser un certain nombre de métaux différents, chacun émettant dans sa couleur caractéristique, comme par exemple:

- dysprosium — spectre large vert-bleu;
- indium — spectre étroit bleu;
- lithium — spectre étroit rouge;
- scandium — spectre large bleu-vert;

Figure 46.8 • Constitution d'une lampe à vapeur de sodium haute pression



- sodium — spectre étroit jaune;
- thallium — spectre étroit vert;
- étain — spectre large orange-rouge.

Il n'existe pas de mélange standard de métaux; par conséquent, les lampes aux halogénures métalliques de différents fabricants risquent de ne pas être interchangeables aussi bien dans leur aspect que dans leurs performances de fonctionnement. En ce qui concerne les lampes de faible puissance, entre 35 et 150 W, la compatibilité physique et électrique se rapproche d'une norme commune.

Les lampes aux halogénures métalliques nécessitent un ballast d'amorçage et de stabilisation, mais leur diversité implique de veiller soigneusement à la compatibilité de la lampe et du ballast pour assurer un bon amorçage et des conditions de fonctionnement correctes.

Lampes à vapeur de sodium basse pression

Le tube à décharge présente une taille similaire au tube fluorescent, mais il est constitué d'un verre feuilleté spécial recouvert à l'intérieur d'une couche résistant au sodium. Le tube à décharge en forme de long «U» est enfermé dans une ampoule extérieure sous vide pour assurer la stabilité thermique. Pendant l'amorçage, les lampes émettent une lueur rouge intense due au gaz néon qu'elles contiennent.

Le rayonnement caractéristique des vapeurs de sodium basse pression est un jaune monochromatique, couleur proche de la sensibilité maximale de l'œil humain. Avec près de 200 lumens/watt, les lampes à vapeur de sodium basse pression sont actuellement les lampes qui ont l'efficacité lumineuse la plus élevée. Cependant, elles demeurent limitées aux applications dans lesquelles la discrimination des couleurs ne revêt pas d'importance, comme les routes nationales et les souterrains, ainsi que les rues résidentielles.

Tableau 46.5 • Types de lampes à vapeur de sodium haute pression

Type de lampe (code)	Température de couleur (K)	Efficacité (lumens/watt)	Durée de vie (heures)
Standard	2 000	110	24 000
De luxe	2 200	80	14 000
Blanche (White SON)	2 500	50	

Dans de nombreux cas, ces lampes sont remplacées par des lampes à vapeur de sodium haute pression qui, parce qu'elles ont une taille réduite, permettent de mieux maîtriser la répartition de la lumière, notamment pour l'éclairage urbain où la pollution lumineuse constitue une préoccupation grandissante.

Lampes à vapeur de sodium haute pression

Ces lampes sont similaires à celles à vapeur de mercure haute pression, mais offrent une meilleure efficacité lumineuse (supérieure à 100 lumens/watt) et un excellent maintien du flux lumineux. La nature réactive du sodium requiert un tube à décharge en alumine polycristalline translucide, car le verre ou le quartz ne conviennent pas. L'ampoule de verre extérieure est sous vide pour éviter la formation d'arc et l'oxydation. La décharge dans le sodium ne générant pas de rayonnement ultraviolet, les revêtements de substances fluorescentes ne sont donc pas nécessaires. Certaines ampoules sont dépolies ou traitées pour diffuser la source lumineuse (voir figure 46.8).

Lorsque la pression du sodium augmente, le rayonnement passe en bande large autour de la raie jaune pour donner un aspect blanc doré. Toutefois, au fur et à mesure que la pression augmente, l'efficacité diminue. A l'heure actuelle, il existe trois types de lampes à vapeur de sodium haute pression, comme indiqué dans le tableau 46.5.

En règle générale, les lampes usuelles sont utilisées pour l'éclairage extérieur, les lampes de luxe pour l'éclairage intérieur en milieu industriel et les blanches (White SON) pour l'éclairage commercial et les vitrines.

Variation du flux lumineux des lampes à décharge

Il est difficile de faire varier le flux lumineux des lampes à haute pression, car toute variation de la puissance modifie la pression, et donc, les caractéristiques de base de la lampe.

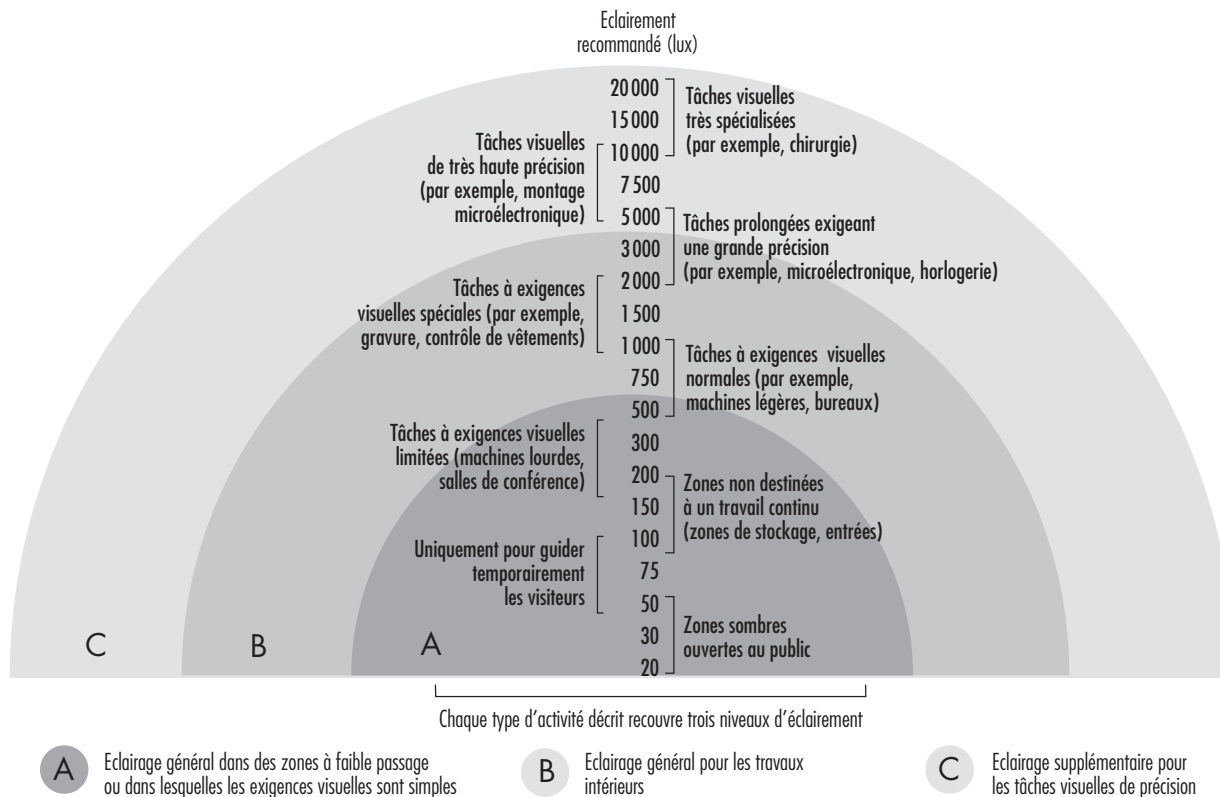
Il est possible de faire varier le flux lumineux des lampes fluorescentes avec des alimentations haute fréquence, générées par ballast électronique. L'apparence des couleurs demeure très constante. En outre, le flux lumineux est à peu près proportionnel à la puissance consommée de la lampe, avec pour conséquence une économie d'électricité lorsque le flux lumineux est réduit. En couplant le flux lumineux de la lampe au niveau d'éclairage naturel fourni par la lumière du jour, il est possible d'assurer un niveau d'éclairage intérieur presque constant.

LES CONDITIONS NÉCESSAIRES DU CONFORT VISUEL

*Fernando Ramos Pérez
et Ana Hernández Calleja*

L'être humain possède une extraordinaire capacité d'adaptation à son milieu et à son environnement rapproché. De tous les types d'énergie qu'il utilise, la lumière est le plus important. Élément clé de notre capacité de voir, elle est nécessaire pour apprécier la forme, la couleur et la position dans le panorama visuel des objets qui nous entourent dans notre vie quotidienne. La plupart des informations que nous recevons par l'intermédiaire de nos sens le sont à près de 80% par la vue. Très souvent, parce que nous sommes tellement habitués à disposer de cette faculté, nous la tenons pour acquise. Toutefois, nous devons toujours garder présent à l'esprit que certains aspects de notre santé, comme notre humeur ou notre niveau de fatigue, sont affectés par l'éclairage et

Figure 46.9 • Niveaux d'éclairage en fonction des tâches effectuées



la couleur des objets qui nous environnent. Du point de vue de la sécurité au travail, la performance et le confort visuels revêtent une importance primordiale. En effet, de nombreux accidents sont dus à un mauvais éclairage ou à des erreurs humaines causées par des difficultés à identifier des objets ou des risques associés aux machines, aux systèmes de transport, aux matières dangereuses, etc.

Il est courant de constater des problèmes visuels associés à un système d'éclairage déficient sur le lieu de travail. Du fait de la capacité du système visuel à s'adapter à des situations d'éclairage insuffisant, ces aspects ne sont pas toujours considérés avec le sérieux qu'ils méritent.

Un système d'éclairage bien conçu doit offrir des conditions optimales de confort visuel. Pour cela, il est indispensable que architectes, éclairagistes et responsables de l'hygiène du travail collaborent à un stade précoce. Cette collaboration doit être mise en place dès le début du projet, pour éviter des erreurs qui seraient difficiles à corriger une fois celui-ci terminé. Au nombre des aspects les plus importants à garder à l'esprit figurent le type de lampe qui sera utilisé et le système d'éclairage qui sera installé, la distribution des luminances, les efficacités lumineuses et la composition spectrale de la lumière.

Le fait que la lumière et les couleurs affectent la productivité et le bien-être psychophysiologique des travailleurs devrait encourager les éclairagistes, les physiologistes et les ergonomes à étudier et à définir les meilleures conditions d'éclairage et de couleur pour chaque poste de travail. La combinaison des éclairages, le contraste de luminances, l'apparence de couleurs de la lumière, le rendu des couleurs ou encore leur choix sont des éléments déterminants de l'environnement chromatique et du confort visuel.

Les facteurs déterminants du confort visuel

Les conditions préalables que doit impérativement remplir un système d'éclairage pour assurer les conditions nécessaires à un bon confort visuel sont les suivantes:

- un éclairage uniforme;
- une luminance optimale;
- l'absence d'éblouissement;
- des contrastes appropriés;
- un rendu correct des couleurs;
- l'absence d'effet stroboscopique ou de fluctuations de la lumière.

Il est important de considérer la lumière sur les lieux de travail non seulement selon des critères quantitatifs, mais aussi selon des critères qualitatifs. La première étape consiste à étudier le poste de travail, la précision requise dans les tâches effectuées, le volume de travail, la mobilité du travailleur, etc. La lumière doit comprendre à la fois les composantes directes et diffuses du rayonnement. Le résultat de cette combinaison produira des ombres d'une intensité plus ou moins prononcée permettant au travailleur de percevoir la forme et la position des objets. Il convient d'éliminer les reflets gênants, rendant difficile la perception des détails, tout comme les phénomènes d'éblouissement ou les ombres portées.

L'entretien périodique de l'installation d'éclairage est très important. L'objectif est d'éviter le vieillissement des lampes et l'accumulation de poussière sur les luminaires, qui aboutiraient à une dégradation constante du flux lumineux. Il est donc important de choisir des lampes et des systèmes faciles à entretenir. Une ampoule à incandescence conserve toute son efficacité jusqu'au moment précédant son claquage, contrairement aux tubes fluo-

Tableau 46.6 • Contrastes de couleurs

Contrastes de couleurs par ordre décroissant	
Couleur de l'objet	Couleur du fond
Noir	Jaune
Vert	Blanc
Rouge	Blanc
Bleu	Blanc
Blanc	Bleu
Noir	Blanc
Jaune	Noir
Blanc	Rouge
Blanc	Vert
Blanc	Noir

rescents, dont l'efficacité peut chuter de 75% après un millier d'heures de fonctionnement.

Les niveaux d'éclairement

Chaque activité nécessite un niveau d'éclairement spécifique dans la zone où elle se situe. En général, plus la perception visuelle est difficile, plus le niveau moyen d'éclairement doit être élevé. Des conventions concernant les niveaux d'éclairement minimaux associés à différentes tâches figurent dans diverses publications. Concrètement, les niveaux indiqués à la figure 46.9, empruntés aux normes européennes établies par le Comité technique n° 169 (Lumière et éclairagisme) du Comité européen de normalisation (CEN), sont basés plus sur l'expérience que sur les connaissances scientifiques.

Le niveau d'éclairement est mesuré à l'aide d'un luxmètre qui convertit l'énergie lumineuse en un signal électrique, lequel est ensuite amplifié pour permettre une lecture facile sur une échelle étalonnée en lux. Lors du choix d'un certain niveau d'éclairement pour un poste de travail particulier, il convient d'étudier les points suivants:

- la nature du travail;
- le facteur de réflexion de l'objet et de l'environnement immédiat;
- les différences avec la lumière naturelle et le besoin d'éclairage dans la journée;
- l'âge du travailleur.

Les unités et les grandeurs utilisées en éclairage

Plusieurs grandeurs sont communément employées dans le domaine de l'éclairage, dont voici les principales:

Flux lumineux: énergie lumineuse émise par unité de temps par une source lumineuse. Unité: le lumen (lm).

Intensité lumineuse: flux lumineux émis dans une direction donnée par une source dont la répartition n'est pas uniforme. Unité: la candela (cd).

Niveau d'éclairement: niveau d'éclairement d'une surface de 1 m² recevant un flux lumineux d'un lumen. Unité: le lux (lx).

Luminance: définie pour une surface dans une direction donnée, la luminance représente le quotient de l'intensité lumineuse par la surface vue par un observateur situé dans la même direction (surface apparente). Unité: la cd/m².

Contraste: différence de luminance entre un objet et son environnement ou entre différentes parties d'un objet.

Facteur de réflexion: proportion de lumière réfléchi par une surface. Il s'agit d'une grandeur sans dimension dont la valeur varie de 0 à 1.

Les facteurs affectant la visibilité des objets

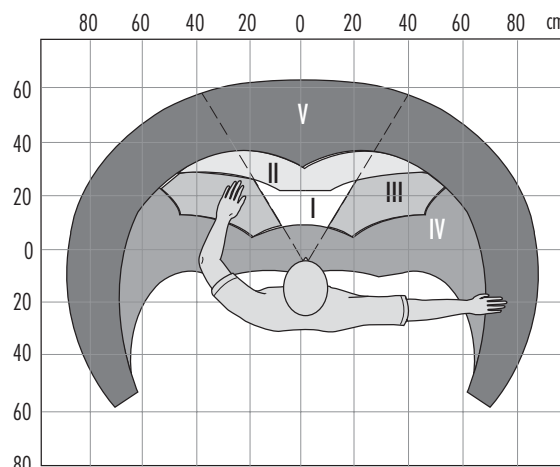
Le degré de sécurité dans l'exécution d'une tâche dépend, en grande partie, de la qualité de l'éclairage et des capacités visuelles. La visibilité d'un objet est conditionnée par de nombreux facteurs. L'un des plus importants est le contraste de luminances dû aux facteurs de réflexion, aux ombres, ou aux couleurs de l'objet lui-même et aux facteurs de réflexion de la couleur. Ce que l'œil perçoit réellement, ce sont les différences de luminance entre un objet et son environnement, ou entre différentes parties du même objet. Le tableau 46.6 indique les contrastes entre les couleurs par ordre décroissant.

La luminance d'un objet, de son environnement et de la zone de travail a une incidence sur la facilité avec laquelle cet objet est vu. Il est par conséquent primordial d'analyser avec soin la zone dans laquelle la tâche visuelle est effectuée, ainsi que l'environnement dans lequel elle se trouve.

La taille de l'objet devant être observé, qui peut être adéquate ou non en fonction de la distance et de l'angle de vision de l'observateur, constitue un autre facteur qui conditionne la visibilité. Ces deux derniers facteurs déterminent la disposition du poste de travail, du fait même qu'ils divisent les différentes zones en fonction de la facilité de vision. On peut ainsi définir cinq zones au niveau du poste de travail (voir figure 46.10).

Le temps disponible pour la vision est un autre aspect à prendre en compte. La durée d'exposition sera plus ou moins longue

Figure 46.10 • Répartition des zones visuelles au poste de travail



ZONES VISUELLES DANS L'ORGANISATION DE L'ESPACE DE TRAVAIL

	Mouvements effectués	Effort visuel
Plage I	Fréquents, longue durée	Important
Plage II	Moins fréquents	Fréquent
Plage III	Courte durée	Peu important
Plage IV	Rares, courte durée	Aucun effort particulier
Plage V	Zone à éviter	Zone à éviter

selon que l'objet et l'observateur sont immobiles, ou que l'un ou les deux se déplacent. La capacité du système visuel de s'adapter automatiquement aux différents niveaux d'éclairage des objets peut également avoir une influence considérable sur la visibilité.

La distribution de la lumière; l'éblouissement

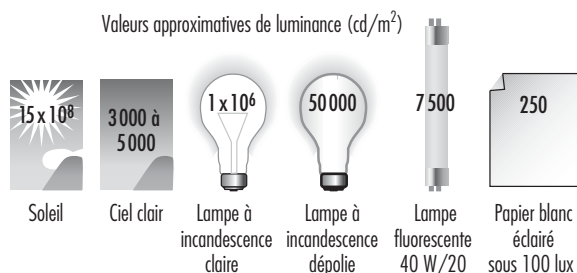
Parmi les conditions affectant la vision, les facteurs clés sont la distribution de la lumière et le contraste de luminances. En matière de distribution de la lumière, il est préférable d'avoir un bon éclairage général plutôt qu'un éclairage localisé, afin d'éviter le phénomène d'éblouissement. Les luminaires doivent donc être répartis de manière aussi uniforme que possible pour éviter les différences d'intensité lumineuse. Un va-et-vient constant dans des zones ne présentant pas un éclairage uniforme entraîne une fatigue oculaire et risque, avec le temps, de diminuer la réponse visuelle.

L'éblouissement se produit lorsqu'une source lumineuse brillante se trouve dans le champ visuel; il en résulte une diminution de l'aptitude à distinguer les objets. Les travailleurs soumis à des effets d'éblouissement constants et successifs risquent de souffrir de fatigue oculaire ainsi que de troubles fonctionnels, même si, dans bien des cas, ils n'en sont pas conscients.

On distingue l'éblouissement direct dû à des sources lumineuses intenses situées directement dans l'axe de vision, et l'éblouissement par réflexion lorsque la lumière est réfléchie sur des surfaces présentant un facteur de réflexion élevé. Les facteurs de l'éblouissement sont les suivants:

1. *Luminance de la source lumineuse:* la luminance maximale acceptable en observation directe est de 7 500 cd/m². La figure 46.11 donne quelques valeurs approximatives de luminance pour différentes sources lumineuses.
2. *Position de la source lumineuse:* ce type d'éblouissement se produit lorsque la source lumineuse se trouve dans un angle de 45° par rapport à l'axe de vision de l'observateur; il devient négligeable quand la source lumineuse est placée en dehors de cet angle. Les moyens et les méthodes permettant d'éviter l'éblouissement direct et par réflexion sont illustrés par les figures suivantes (voir figure 46.12).
3. En règle générale, l'éblouissement augmente lorsque les sources lumineuses sont installées relativement bas ou dans des pièces de grandes dimensions, car elles risquent alors de se trouver dans l'angle de vision, provoquant ainsi l'éblouissement.
4. *Distribution de la luminance entre objets et surfaces:* plus les différences de luminance entre les objets situés dans le champ visuel sont grandes, plus l'éblouissement est important et plus les performances visuelles se dégradent du fait de ses effets sur le processus d'adaptation. Les différences de luminance maximales recommandées sont les suivantes:

Figure 46.11 • Valeurs approximatives de luminance (cd/m²)



tâche visuelle — plan utile: 3:1;
tâche visuelle — environnement: 10:1.

5. *Durée d'exposition:* même les sources lumineuses à basse luminance peuvent être cause d'éblouissement si la durée d'exposition est trop longue.

Il est relativement simple de supprimer l'éblouissement et on dispose pour ce faire de plusieurs solutions. On peut, par exemple, placer des grilles de défilement sous les sources d'éclairage, utiliser des diffuseurs enveloppants ou des réflecteurs paraboliques permettant une bonne direction de la lumière, ou encore installer les sources lumineuses de manière à éviter qu'elles se situent dans l'angle de vision. Lors de l'étude du lieu de travail, la bonne répartition de la luminance est aussi décisive que l'éclairage lui-même, mais il est également important de tenir compte du fait qu'une répartition de luminance trop uniforme rend plus difficile la perception tridimensionnelle et spatiale des objets.

Les systèmes d'éclairage

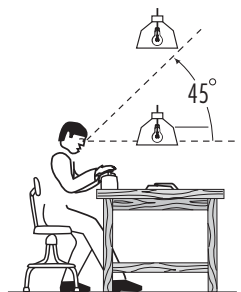
L'intérêt porté à l'éclairage naturel s'est accru récemment, du fait moins de la qualité d'éclairage obtenue que du bien-être qu'il procure. Mais, comme le niveau d'éclairage des sources naturelles n'est pas uniforme, un système d'éclairage artificiel est nécessaire.

Les systèmes d'éclairage les plus courants sont les suivants:

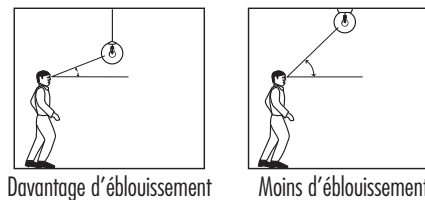
L'éclairage général uniforme

Dans ce système, les sources lumineuses sont réparties uniformément, indépendamment de l'implantation des postes de travail. Le

Figure 46.12 • Facteurs affectant l'éblouissement



1. Hauteur de l'installation d'éclairage



2. Dimensions de la pièce

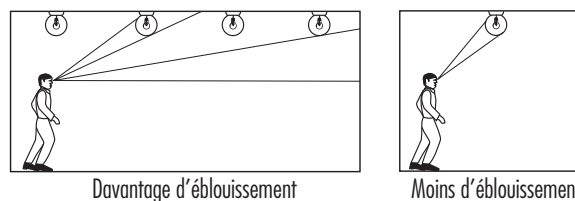
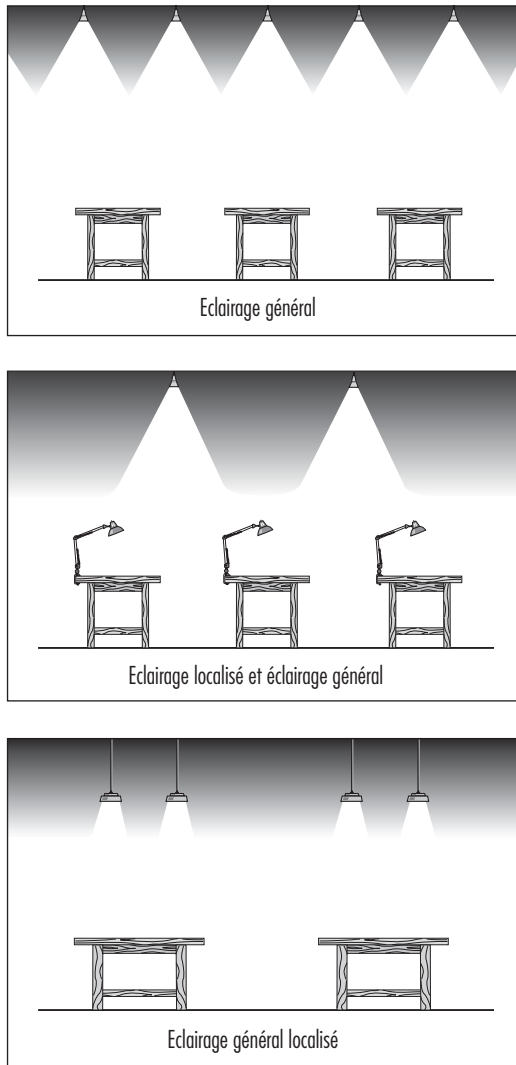


Figure 46.13 • Systèmes d'éclairage



niveau d'éclairage moyen doit être égal au niveau d'éclairage nécessaire pour la tâche à effectuer. Ces systèmes sont principalement utilisés sur des lieux de travail où les postes de travail ne sont pas fixes.

Ils doivent être conformes à trois caractéristiques fondamentales: la première est d'être équipés de dispositifs antiéblouissement (grilles de défilement, diffuseurs, réflecteurs, etc.), la deuxième impose de répartir une fraction de la lumière vers le plafond et la partie supérieure des murs; la troisième implique d'installer les sources lumineuses aussi haut que possible afin de réduire l'éblouissement au minimum et d'assurer un éclairage aussi homogène que possible (voir figure 46.13).

Ce système tente de renforcer le schéma d'éclairage général en plaçant les lampes à proximité des surfaces de travail. Les lampes de ce type étant souvent éblouissantes, il convient de les équiper de réflecteurs installés de manière que la source lumineuse se trouve hors du champ de vision du travailleur. L'utilisation d'un éclairage localisé est recommandée dans les cas où les exigences visuelles sont très élevées, telles que celles nécessitant des niveaux d'éclairage de 1 000 lux ou plus. En général, les performances visuelles se dégradent avec l'âge du travailleur, ce qui oblige à

augmenter le niveau d'éclairage général ou à le compléter par un éclairage localisé. Ce phénomène peut être aisément évalué à l'aide de la figure 46.14.

L'éclairage général localisé

Ce type d'éclairage est constitué de plafonniers que l'on répartit en gardant deux choses à l'esprit — les caractéristiques de l'équipement et les besoins d'éclairage de chaque poste de travail. Ce type d'éclairage est bien adapté aux lieux ou aux zones de travail qui nécessitent un niveau d'éclairage élevé, et exige que l'on connaisse l'emplacement précis de chaque poste de travail avant même la phase d'étude.

La couleur: les concepts de base

La couleur est un élément important du cadre de travail et son choix est déterminant pour l'efficacité, la sécurité et le bien-être général du personnel. De la même manière, la finition des surfaces et des équipements se trouvant dans l'environnement de travail contribue à créer des conditions visuelles et un environnement agréables.

La lumière ordinaire se compose de rayonnements électromagnétiques de longueurs d'ondes différentes correspondant à chacune des bandes du spectre visible. En combinant les lumières rouge, jaune et bleue, il est possible d'obtenir la plupart des couleurs visibles, y compris le blanc. Notre perception de la couleur d'un objet dépend de celle de la lumière qui l'éclaire et de la manière dont l'objet lui-même réfléchit la lumière.

Les lampes peuvent être classées en trois catégories, selon l'apparence de la couleur de la lumière qu'elles émettent:

- teinte chaude: lumière blanche, rougeâtre, recommandée pour les habitations;
- teinte intermédiaire: lumière blanche, recommandée pour les lieux de travail;
- teinte froide: lumière blanche bleuâtre, recommandée pour les tâches nécessitant un fort niveau d'éclairage ou les climats chauds.

Les couleurs peuvent aussi être classées en chaudes ou froides selon leur teinte (voir figure 46.15).

Le contraste et la température des différentes couleurs

Les contrastes des couleurs étant influencés par la couleur de la lumière sélectionnée, la qualité de l'éclairage dépend donc de la couleur de la lumière choisie pour une application. Ce choix doit

Figure 46.14 • Diminution de l'acuité visuelle en fonction de l'âge

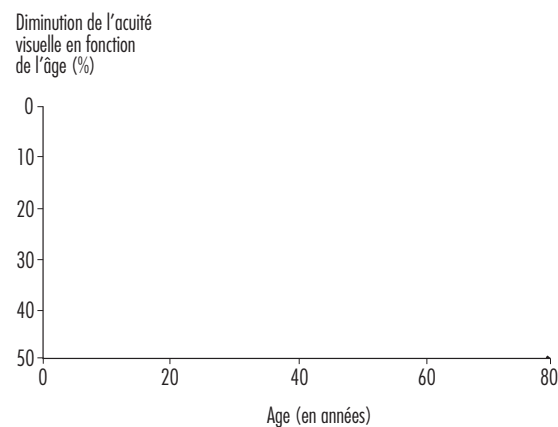
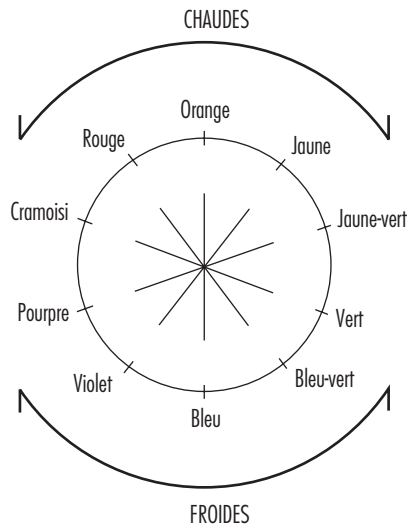


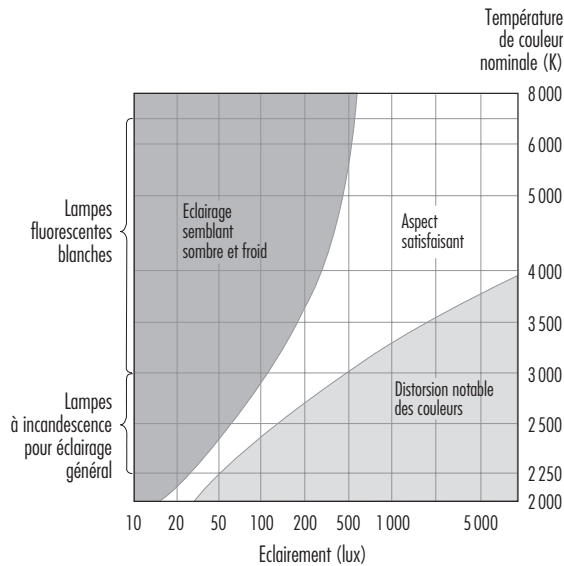
Figure 46.15 • Tonalité des couleurs «chaudes» et «froides»



reposer sur le type de tâche à effectuer sous cet éclairage. Si la couleur est proche du blanc, le rendu des couleurs et la diffusion de la lumière seront meilleurs. Plus la lumière se rapproche de la zone rouge du spectre, moins la reproduction des couleurs sera bonne, mais l'environnement sera plus chaud et plus agréable.

La couleur apparente de l'éclairage ne dépend pas seulement de la couleur de la lumière, mais aussi du niveau d'intensité lumineuse. Une température de couleur est associée aux différentes formes d'éclairage. L'impression de confort procurée par l'éclairage d'un environnement donné dépend de cette température. Ainsi, par exemple, une ampoule à incandescence de 100 W présente une température de couleur de 2 800 K, un tube fluorescent de 4 000 K, et un ciel couvert de 10 000 K.

Figure 46.16 • Diagramme de confort en fonction de l'éclairage et des températures de couleurs



A partir d'observations empiriques, Kruthof a défini un diagramme de confort pour différents niveaux d'éclairage et de températures de couleurs dans un environnement donné (voir figure 46.16). De cette manière, il a démontré qu'il était possible de ressentir une impression de confort dans certains environnements à faible niveau d'éclairage si la température de couleur est également faible. C'est le cas, par exemple, si le niveau d'éclairage est celui d'une bougie avec une température de couleur de 1 750 K.

Les couleurs des lampes électriques peuvent être subdivisées en trois groupes, en fonction de leur température de couleur :

- blanc lumière du jour — environ 6 000 K;
- blanc neutre — environ 4 000 K;
- blanc chaud — environ 3 000 K.

La combinaison et le choix des couleurs

Il convient de prendre soigneusement en compte le choix des couleurs dans le cas de fonctions où l'identification des objets à manipuler est importante. Il en va de même pour la délimitation des voies de communication et pour les tâches nécessitant un fort contraste.

Le choix de la teinte ne revêt pas la même importance que celui des propriétés réfléchissantes d'une surface. Il existe plusieurs recommandations qui traitent de cet aspect des surfaces de travail.

Plafonds : la surface d'un plafond doit être aussi blanche que possible (avec un facteur de réflexion de 75%), car la lumière sera alors réfléchi de manière diffuse, en dissipant l'obscurité et en réduisant le phénomène d'éblouissement dû aux autres surfaces. Cela signifie également une économie d'éclairage artificiel.

Murs et planchers : les surfaces murales au niveau des yeux peuvent provoquer un phénomène d'éblouissement. Des couleurs claires avec des facteurs de réflexion compris entre 50 et 75% sont bien adaptées pour les murs. Bien que les peintures brillantes aient tendance à durer plus longtemps que les peintures mates, elles sont plus réfléchissantes. Par conséquent, les murs doivent avoir de préférence un fini mat ou satiné.

Les planchers auront une couleur légèrement plus sombre que les murs et les plafonds, afin d'éviter tout éblouissement. Le facteur de réflexion des planchers doit se situer entre 20 et 25%.

Matériel : les facteurs de réflexion des surfaces de travail, des machines et des tables doivent être compris entre 20 et 40%. Les équipements doivent avoir un fini durable, de couleur pure — brun clair ou gris — et le matériau ne doit pas être brillant.

La bonne utilisation des couleurs dans l'environnement de travail favorise le bien-être, accroît la productivité et peut avoir un impact positif sur la qualité. Elle peut également contribuer à une meilleure organisation et à la prévention des accidents.

On pense généralement que des murs et des plafonds blancs associés à un bon niveau d'éclairage représentent le maximum que l'on puisse faire pour assurer le confort visuel du personnel. Mais ces facteurs de confort peuvent être améliorés en conjuguant le blanc à d'autres couleurs, pour éviter la fatigue et l'ennui qui caractérisent les environnements monochromatiques. Les couleurs ont également un effet sur le niveau individuel de stimulation; les couleurs chaudes ont tendance à rendre plus actif et plus détendu, alors que les couleurs froides sont utilisées pour amener l'individu à libérer son énergie.

La teinte de la lumière, sa distribution, et les couleurs utilisées dans un espace donné représentent des facteurs clés, parmi d'autres, qui influencent les sensations de chaque individu. Etant donné la multitude des couleurs et des facteurs de confort qui existent, il est impossible de proposer des directives précises, en particulier si l'on considère qu'il convient de combiner tous ces éléments en fonction des caractéristiques et des exigences d'un poste de travail

Tableau 46.7 • Facteurs de réflexion de différentes couleurs et matériaux éclairés en lumière blanche

Couleur/matériau	Facteur de réflexion (%)
Blanc	100
Papier blanc	80-85
Ivoire, jaune citron	70-75
Jaune clair, ocre clair, vert clair, bleu pastel, rose clair, crème	60-65
Vert jaune, gris pâle, rose, orange, bleu-gris	50-55
Bois clair, bleu ciel	40-45
Chêne, béton sec	30-35
Rouge foncé, vert feuille, vert olive, vert prairie	20-25
Bleu foncé, pourpre	10-15
Noir	0

particulier. Cependant, il est possible de dresser une liste de règles de base générales applicables en pratique pour aider à créer un environnement agréable à vivre:

- Les couleurs claires provoquent des sensations de confort, de stimulation et de sérénité, alors que les couleurs sombres ont tendance à rendre morose.
- Les sources lumineuses de teinte chaude aident à bien rendre les couleurs chaudes. Les objets de couleur chaude sont plus agréables à l'œil sous une lumière chaude que sous une lumière froide.
- Les couleurs claires et mates (comme les tons pastels) sont très bien adaptées comme couleurs de fond, alors que les objets doivent avoir des couleurs riches et saturées.
- Les couleurs chaudes excitent le système nerveux et donnent l'impression qu'il fait plus chaud.
- Les couleurs froides sont préférables pour les objets. Elles ont un effet apaisant et peuvent être utilisées pour provoquer l'effet de courbure. Les couleurs froides contribuent à donner une sensation de fraîcheur.
- La perception de la couleur d'un objet dépend de la couleur du fond et de l'effet de la source lumineuse sur sa surface.
- Des environnements physiquement froids ou chauds peuvent être tempérés en utilisant respectivement un éclairage chaud ou froid.
- L'intensité d'une couleur sera inversement proportionnelle à la partie qu'elle occupe dans le champ visuel normal.
- La couleur peut aussi avoir une influence sur l'impression de volume que l'on a dans une pièce. Ainsi, le plafond d'une pièce peut paraître plus bas si les murs sont peints avec une couleur claire et si le plancher et le plafond sont plus sombres, et le plafond semblera plus haut si les murs sont plus sombres et le plafond clair.

L'identification des objets par la couleur

Le choix des couleurs peut modifier l'efficacité des systèmes d'éclairage en influant sur la fraction réfléchie de lumière. Mais la couleur joue également un rôle déterminant quand il s'agit d'identifier les objets. On peut utiliser des couleurs vives, qui attirent l'œil, ou des contrastes de couleurs pour mettre en valeur des situations ou des objets nécessitant une attention particulière. Le tableau 46.7 indique quelques facteurs de réflexion pour différents matériaux et couleurs.

Dans tous les cas, l'identification par la couleur ne devrait être employée que si elle est vraiment nécessaire, puisqu'elle ne peut être utilisée correctement que si le nombre d'objets à mettre en valeur par la couleur n'est pas trop élevé. On trouvera ci-dessous quelques recommandations pour l'identification de différents éléments par la couleur:

- *Équipements de sécurité et de lutte contre l'incendie*: il est recommandé d'identifier ces équipements en plaçant un pictogramme facilement reconnaissable sur le mur le plus proche de manière à pouvoir les localiser rapidement.
- *Machines*: l'utilisation de couleurs vives pour les dispositifs d'arrêt ou d'arrêt d'urgence sur toutes les machines est primordiale. Afin de faciliter et de rationaliser les procédures, il est aussi conseillé d'identifier les zones nécessitant une lubrification ou un entretien périodique à l'aide de repères chromatiques.
- *Canalisations et tuyauteries*: si elles sont importantes ou si elles transportent des substances dangereuses, le mieux est de les colorer complètement. Dans certains cas, on peut se contenter d'appliquer une ligne de couleur sur toute leur longueur.
- *Escaliers*: pour faciliter la descente, il est préférable de n'appliquer qu'une seule bande sur chaque marche.
- *Risques*: la couleur ne doit être utilisée pour identifier un risque que s'il n'est pas possible de l'éliminer. Cette identification sera beaucoup plus efficace si elle est réalisée conformément à un code de couleurs prédéfini.

LES CONDITIONS D'ÉCLAIRAGE GÉNÉRAL

N. Alan Smith

L'éclairage intérieur est destiné à satisfaire aux exigences suivantes:

- contribuer à assurer un environnement de travail sûr;
- aider à l'exécution de tâches visuelles;
- assurer un environnement visuel approprié.

La sécurité du milieu de travail doit être la première des priorités et, en règle générale, elle est d'autant mieux garantie que les dangers sont bien visibles. L'ordre de priorité des deux autres exigences dépend pour beaucoup de la destination du local. La performance peut être améliorée si le détail de la tâche est plus facile à voir, tout en développant des environnements visuels bien adaptés en faisant varier la mise en valeur des objets et des surfaces dans un local par l'intermédiaire de l'éclairage.

Notre sentiment général de bien-être, y compris le moral et la fatigue, est influencé par la lumière et la couleur. En présence de faibles niveaux d'éclairage, les objets auront peu de couleur ou de relief, quand bien même ils en ont, et il y aura perte de perspective. À l'inverse, une lumière excessive peut être tout aussi indésirable qu'une lumière trop faible.

En général, les gens préfèrent une pièce éclairée par la lumière du jour à une pièce aveugle. En outre, le contact avec le monde extérieur est considéré comme contribuant au sentiment de bien-être. L'introduction de commandes automatiques de l'éclairage, conjuguées aux gradateurs haute fréquence des lampes fluorescentes, permet d'assurer un éclairage coordonné naturel-artificiel des locaux, tout en faisant des économies sur les coûts de l'énergie.

La perception de l'ambiance d'un local dépend à la fois de la luminosité et de la couleur des surfaces visibles, aussi bien intérieures qu'extérieures. Les conditions d'éclairage général à l'intérieur peuvent être obtenues en utilisant la lumière du jour ou un

éclairage artificiel, ou plus vraisemblablement en combinant les deux.

L'évaluation de l'éclairage

Les exigences générales

Les systèmes d'éclairage utilisés dans les locaux commerciaux peuvent être subdivisés en trois catégories principales: éclairage général, éclairage localisé et éclairage d'appoint.

Les installations d'éclairage général fournissent un éclairage approximativement uniforme sur l'ensemble du plan de travail. Ces systèmes sont souvent basés sur la méthode de conception appelée méthode des flux lumineux, où un éclairage moyen est:

$$\text{Eclairage moyen (lux)} = \frac{\text{Flux lumineux (lumens)} \times \text{Facteur d'utilisation} \times \text{Facteurs de maintenance}}{\text{Surface (m}^2\text{)}}$$

Les systèmes d'éclairage localisé assurent un éclairage des zones de travail générales avec, en même temps, un niveau d'éclairage réduit dans les zones adjacentes.

Les systèmes d'éclairage local assurent l'éclairage de zones relativement petites comportant des tâches visuelles. Ces systèmes sont normalement complétés par un niveau d'éclairage général spécifié. La figure 46.17 illustre les principales différences entre les systèmes décrits.

Lorsque des tâches visuelles doivent être réalisées, il est essentiel d'obtenir un niveau d'éclairage requis et de prendre en compte les circonstances qui influent sur sa qualité.

L'utilisation de la lumière du jour pour éclairer les tâches visuelles comporte à la fois des avantages et des inconvénients. Les fenêtres qui laissent pénétrer la lumière du jour dans un local assurent une bonne restitution des reliefs et, bien que la répartition spectrale de la lumière du jour varie au fil des heures, son rendu des couleurs est généralement considéré comme excellent.

Figure 46.17 • Systèmes d'éclairage

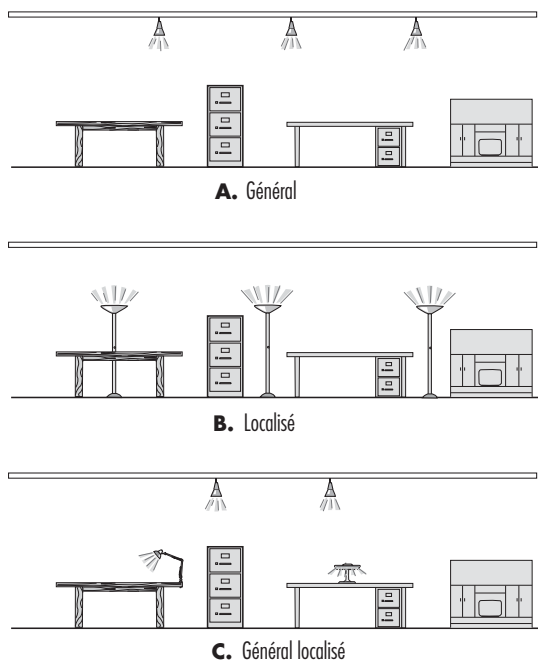


Tableau 46.8 • Niveaux recommandés d'éclairage à maintenir pour différents emplacements ou tâches visuelles

Emplacement/tâche	Niveau recommandé d'éclairage à maintenir (lux)
Bureaux (travaux courants)	500
Postes de travail informatiques	500
Travaux d'assemblage en usine	
Travaux grossiers	300
Travaux intermédiaires	500
Travaux de précision	750
Travaux de très haute précision	
Montage d'instruments	1 000
Montage et réparation de bijoux	1 500
Blocs opératoires hospitaliers	50 000

Cependant, du fait de sa grande variation, il n'est pas possible d'assurer l'éclairage constant d'une tâche uniquement par la lumière du jour et, si la tâche se trouve dans le même champ de vision qu'un ciel clair, il existe un risque d'éblouissement qui peut nuire à la bonne exécution de la tâche. L'utilisation de la lumière du jour pour éclairer une tâche ne peut apporter qu'une solution partielle, de sorte que l'éclairage artificiel, plus facile à moduler, a un rôle majeur à jouer.

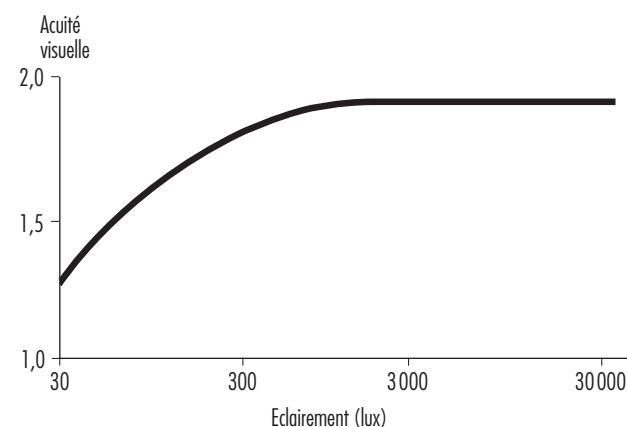
Etant donné que l'œil humain ne perçoit les surfaces et les objets que par la lumière qu'ils réfléchissent, il s'ensuit que les caractéristiques et les facteurs de réflexion des surfaces, ainsi que la quantité et la qualité de la lumière influent sur l'ambiance de l'environnement.

Lorsqu'on envisage l'éclairage d'un local, il faut déterminer le niveau d'éclairage et le comparer aux niveaux recommandés pour différentes tâches (voir tableau 46.8).

L'éclairage des tâches visuelles

La capacité de distinguer des détails dans le champ visuel — *acuité visuelle* — dépend beaucoup de la dimension de la tâche, du contraste et des performances visuelles de l'observateur. Une augmentation de la quantité et de la qualité de la lumière accroît

Figure 46.18 • Relation entre acuité visuelle et éclairage



considérablement la *performance visuelle*. L'effet de l'éclairage sur l'exécution de la tâche est influencé par la taille du plus petit détail de cette tâche et par le contraste entre la tâche et son environnement immédiat. La figure 46.18 représente les effets de l'éclairage sur l'acuité visuelle. Lorsqu'on considère l'éclairage d'une tâche visuelle, il est important de tenir compte de la capacité qu'a l'œil d'effectuer la tâche visuelle avec rapidité et précision. Cette combinaison est appelée *performance visuelle*. La figure 46.19 représente les principaux effets de l'éclairage sur les performances visuelles pour une tâche donnée.

En éclairagisme, il est primordial de prédéterminer l'éclairage atteignant une surface de travail. Cependant, le système visuel humain est sensible à la distribution des éclairagements dans le champ visuel. La scène située dans ce champ visuel est interprétée par différenciation entre la couleur de la surface, son facteur de réflexion et son éclairage. La luminance dépend à la fois de l'éclairage d'une surface et de son facteur de réflexion. L'éclairage et la luminance sont des paramètres objectifs, la réponse à la luminosité est toutefois subjective.

Lorsqu'on veut créer un environnement apportant une satisfaction visuelle, un confort et une bonne performance, il importe d'équilibrer les luminances à l'intérieur du champ visuel. Dans l'idéal, les luminances de l'environnement d'une tâche doivent décroître progressivement pour éviter les contrastes brutaux. La figure 46.20 représente une proposition de variation des niveaux de luminance d'une tâche.

La méthode des flux lumineux pour la conception d'un éclairage permet de déterminer l'éclairage moyen horizontal du plan de travail; elle peut être utilisée pour fixer les valeurs d'éclairage moyen des murs et des plafonds d'un local. Il est possible de convertir les valeurs d'éclairage moyen en valeurs de luminance moyenne à partir des facteurs moyens de réflexion des surfaces de la pièce.

La relation entre luminance et éclairage est donnée par la formule:

$$Luminance (cd/m^2) = \frac{Eclairage (lux) \times Facteur\ de\ réflexion}{\pi}$$

Figure 46.19 • Relation entre performance visuelle et niveau d'éclairément

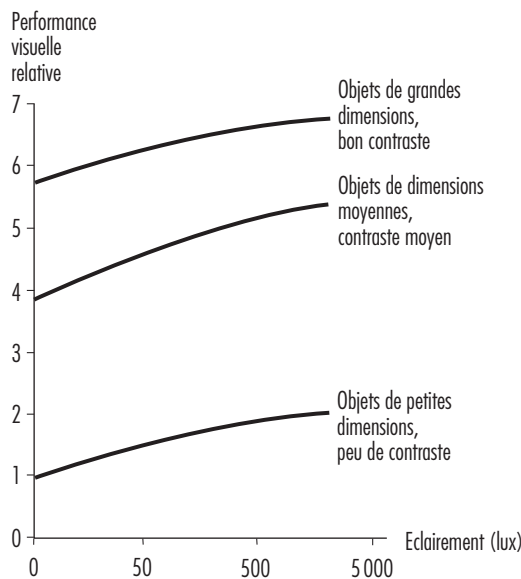
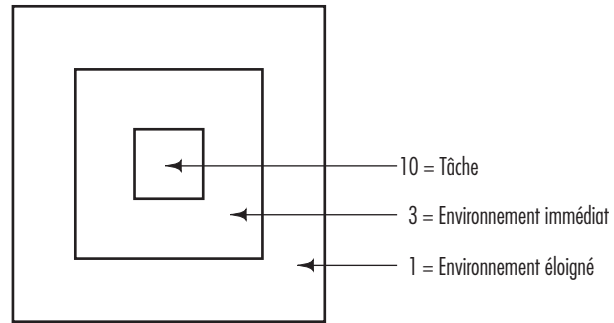


Figure 46.20 • Niveaux relatifs de luminance



La figure 46.21 représente un bureau type avec des valeurs d'éclairage relatives (à partir d'un système d'éclairage général en hauteur) sur les principales surfaces de la pièce, ainsi que des valeurs de facteurs de réflexion. L'œil humain a tendance à être attiré par la partie la plus claire de la scène visuelle. Il s'ensuit que l'on trouve généralement des valeurs de luminance plus élevées sur une zone de tâche visuelle. L'œil reconnaît les détails à l'intérieur d'une tâche visuelle en distinguant les parties les plus claires de la tâche de celles qui sont plus sombres. La variation de luminosité d'une tâche visuelle est déterminée par le calcul du *contraste de luminances*:

$$Contraste\ de\ luminances = \frac{|L_t - L_b|}{|L_b|}$$

où

L_t = luminance de la tâche

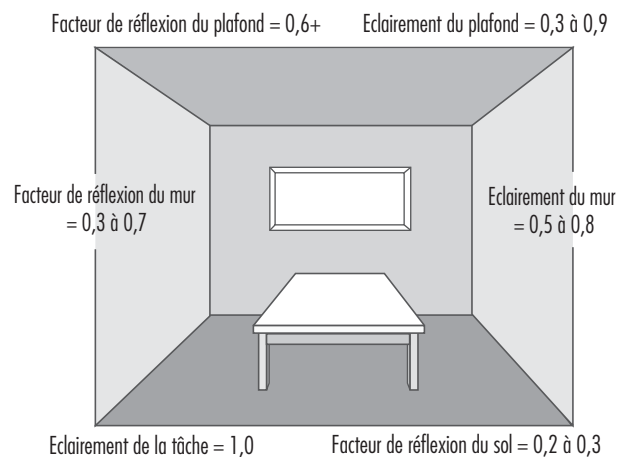
L_b = luminance du fond

les deux luminances étant mesurées en cd/m^2

Toutes les valeurs de contraste de luminances doivent être considérées comme positives.

Le contraste d'une tâche visuelle est influencé par les caractéristiques de réflexion de la tâche elle-même (voir figure 46.21).

Figure 46.21 • Niveaux relatifs types d'éclairément et valeurs suggérées pour les facteurs de réflexion



Le contrôle optique de l'éclairage

Si une lampe nue est utilisée dans un luminaire, la répartition de la lumière risque de ne pas être acceptable et le système ne sera certainement pas économique. Dans ce type de situation, la lampe nue est susceptible de constituer une source d'éblouissement pour les occupants de la pièce et, même si une partie de la lumière atteint le plan de travail, l'efficacité de l'installation peut se trouver sérieusement réduite du fait du phénomène d'éblouissement.

Il est évident qu'un système de contrôle de la lumière est nécessaire; les méthodes les plus fréquemment employées sont décrites ci-dessous.

Les écrans opaques

Si une lampe est installée dans une enceinte opaque comportant une seule ouverture permettant le passage de la lumière, la distribution de celle-ci se trouvera limitée, comme le montre la figure 46.22.

La réflexion

Cette méthode de contrôle de la lumière utilise des surfaces réfléchissantes qui peuvent varier d'un aspect très mat à un aspect très spéculaire ou de type miroir. Elle est plus efficace que les écrans opaques, car la lumière dispersée est récupérée et réorientée là où elle est nécessaire. Ce principe est illustré à la figure 46.23.

La diffusion

Si une lampe est installée dans une matière translucide, la dimension apparente de la source lumineuse augmente, tandis que sa luminosité diminue. Les diffuseurs existants absorbent malheureusement une partie de la lumière émise, ce qui a pour conséquence de réduire l'efficacité globale du luminaire. La figure 46.24 illustre le principe de la diffusion.

La réfraction

Cette méthode utilise l'effet de «prisme», selon lequel un prisme de verre ou de plastique change la direction des rayons lumineux et redirige ainsi la lumière vers la zone où elle est nécessaire. Cette méthode est très bien adaptée à l'éclairage général d'intérieur. Elle présente l'avantage de combiner une bonne limitation de

Figure 46.22 • Contrôle du flux lumineux par un écran opaque

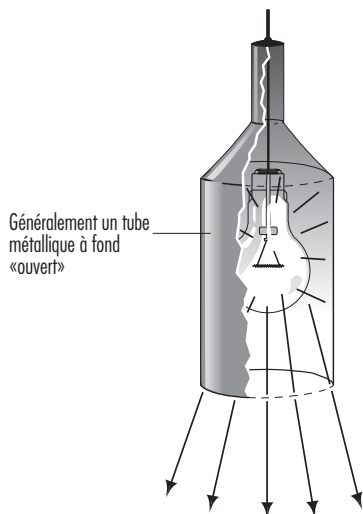
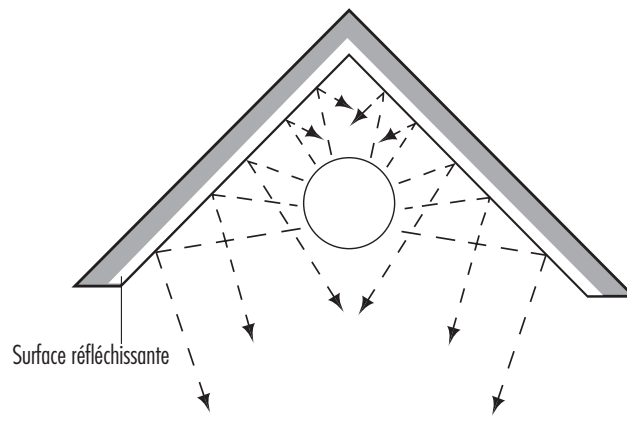


Figure 46.23 • Contrôle du flux lumineux par réflexion



l'éblouissement et une efficacité acceptable. La figure 46.25 montre comment la réfraction aide au contrôle optique.

Dans de nombreux cas, un luminaire utilisera une combinaison des méthodes de contrôle optique décrites ci-dessus.

La distribution de la luminance

La répartition du flux lumineux émis par un luminaire est importante pour la qualité visuelle que l'on obtiendra. Chacune des quatre méthodes de contrôle optique décrites plus haut conduit à des caractéristiques de distribution du flux lumineux différentes pour le luminaire.

On trouve souvent des réflexions de voile dans des zones où sont installés des écrans de visualisation. Les symptômes habituellement ressentis dans ce type de situation sont la diminution de la capacité de lire correctement un texte sur un écran à cause de l'apparition d'images indésirables à forte luminance sur l'écran lui-même, principalement en provenance de luminaires en hauteur. Il peut aussi arriver que des réflexions de voile apparaissent sur du papier posé sur un bureau dans un local.

Si, dans un local, les luminaires comportent une importante composante verticale du flux lumineux dirigée vers le bas, tout papier posé sur un bureau sous ce luminaire réfléchit la source lumineuse dans les yeux d'un observateur lisant ou travaillant sur le papier. Si le papier est brillant, la situation est pire encore.

Pour pallier ce problème, on n'a d'autre solution que d'utiliser des luminaires dont le flux lumineux est distribué majoritairement suivant un angle plus important avec la verticale, de manière que, conformément aux lois fondamentales de la physique (angle d'incidence = angle de réflexion), l'éblouissement par réflexion se trouve réduit. La figure 46.26 illustre ce type de problème et la solution à y apporter. La répartition du flux lumineux issu du

Figure 46.24 • Contrôle du flux lumineux par diffusion

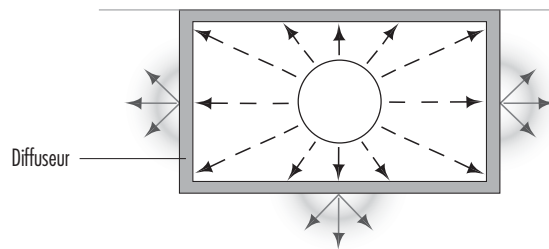
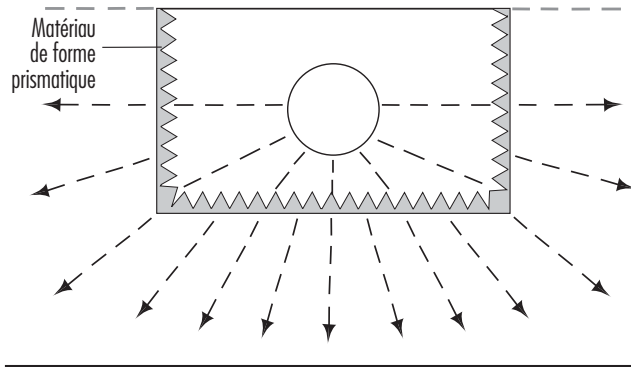


Figure 46.25 • Contrôle du flux lumineux par réfraction



luminaire utilisé pour résoudre le problème est appelée *répartition en ailes de papillon*.

La distribution de la lumière issue des luminaires peut aussi aboutir à un *éblouissement direct* qu'on peut tenter d'éviter en installant des éléments d'éclairage d'appoint en dehors de «l'angle de protection» de 45°, comme le montre la figure 46.27.

Les conditions d'éclairage optimales pour le confort et la performance visuels

Lors de l'étude des conditions d'éclairage pour le confort et la performance visuels, il est recommandé de tenir compte des facteurs qui affectent la capacité de distinguer les détails et qui relèvent de deux catégories: les caractéristiques de l'observateur et les caractéristiques de la tâche.

Les caractéristiques de l'observateur. Elles comprennent:

- la sensibilité du système visuel de l'individu à la taille, au contraste, au temps d'exposition;
- les caractéristiques d'adaptation transitoire;
- la prédisposition à l'éblouissement;
- l'âge;
- les caractéristiques psychologiques et de motivation.

Caractéristiques de la tâche. Elles comprennent:

- la configuration des détails;
- le contraste détail/fond;
- la luminance du fond;
- la réflexion spéculaire des détails.

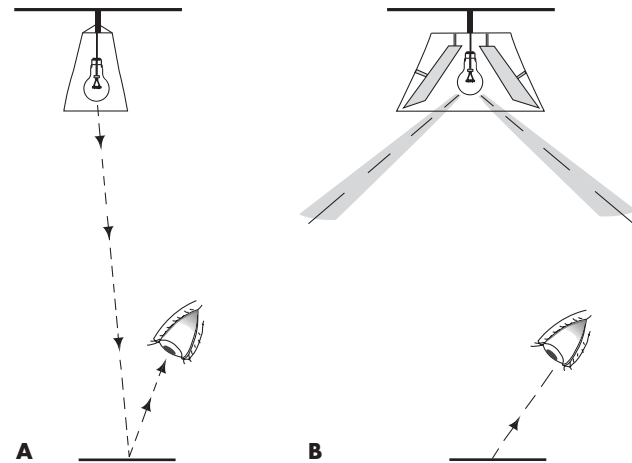
Pour des tâches particulières, il convient de se poser les questions suivantes:

- Les détails de la tâche sont-ils faciles à voir?
- L'exécution de la tâche est-elle susceptible de durer longtemps?
- En cas d'erreurs résultant de l'exécution de la tâche, les conséquences risquent-elles d'être graves?

Pour assurer des conditions d'éclairage optimales en milieu de travail, il est important de se demander ce que l'on attend de l'installation d'éclairage. Un éclairage idéal doit permettre de percevoir la couleur, la taille, le relief et les qualités de surface d'une tâche tout en évitant la formation potentiellement dangereuses d'ombres, d'éblouissement et d'un environnement «très fortement contrasté» pour la tâche elle-même.

L'éblouissement. Le phénomène d'éblouissement se produit lors de la présence d'une luminance excessive dans le champ de vision. Les effets de l'éblouissement sur la vision peuvent être divisés

Figure 46.26 • Réflexions de voile



- A.** Réflexions de voile dues à des installations comportant une importante composante verticale du flux lumineux dirigée vers le bas
- B.** Luminaires à répartition en ailes de papillon dites en «batwings» pour éliminer les réflexions de voile sur les surfaces de travail horizontales

en deux groupes appelés *éblouissement d'incapacité* et *éblouissement d'inconfort*.

Considérons l'exemple de l'éblouissement dû aux phares d'un véhicule dans l'obscurité. L'œil ne peut pas simultanément faire l'adaptation aux phares du véhicule et à la luminosité beaucoup moins importante de la route. Il s'agit d'un exemple d'éblouissement d'incapacité, car les sources lumineuses à forte luminance provoquent un effet perturbateur dû à la dispersion de la lumière dans le milieu optique. L'éblouissement d'incapacité est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse qui est en cause.

L'éblouissement d'inconfort, qui est plus susceptible de se produire à l'intérieur, peut être réduit, ou même totalement éliminé, en diminuant le contraste entre la tâche et son environnement.

Figure 46.27 • Représentation schématique de l'angle vertical de champ visuel

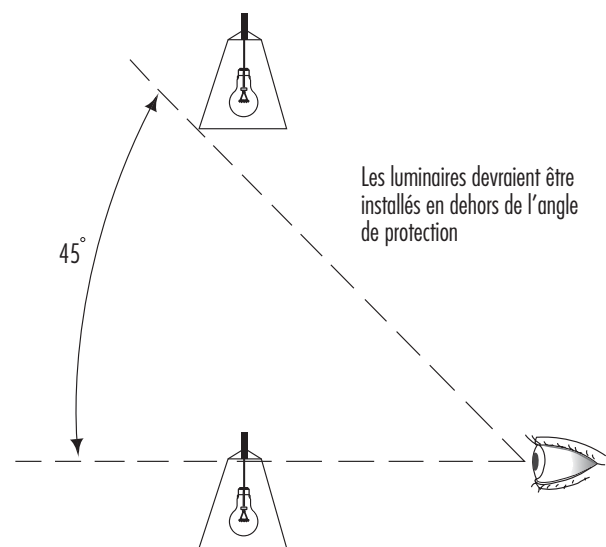
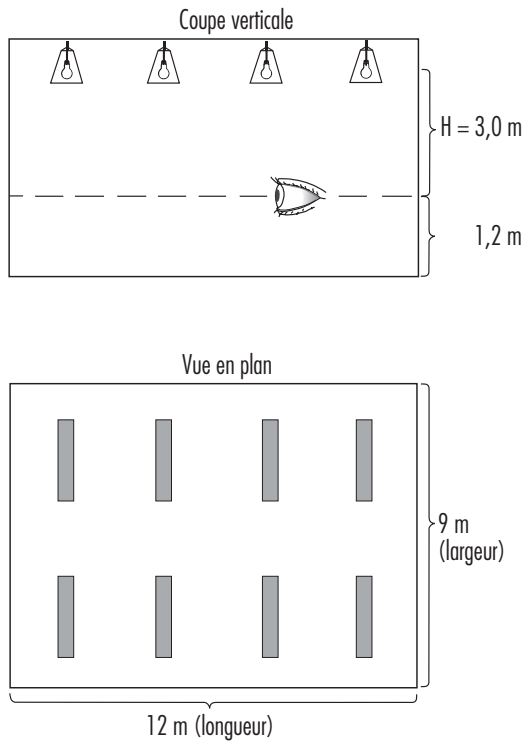


Figure 46.28 • Coupe verticale et vue en plan d'un local type



On optera de préférence pour des surfaces de travail à aspect mat diffusant la lumière plutôt que pour des surfaces brillantes à réflexion spéculaire, et on fera en sorte de placer toutes les sources lumineuses susceptibles de provoquer un éblouissement hors du champ de vision normal. En général, il est possible d'obtenir une bonne performance visuelle si la tâche elle-même est plus claire que son environnement immédiat, mais pas trop.

L'importance de l'éblouissement d'inconfort est exprimée par une valeur numérique qui, comparée à des valeurs de référence, permet de prévoir si le niveau d'éblouissement d'inconfort est acceptable. La méthode de calcul des valeurs de l'indice d'éblouissement utilisée au Royaume-Uni et dans d'autres pays est expliquée ci-après.

Le mesurage

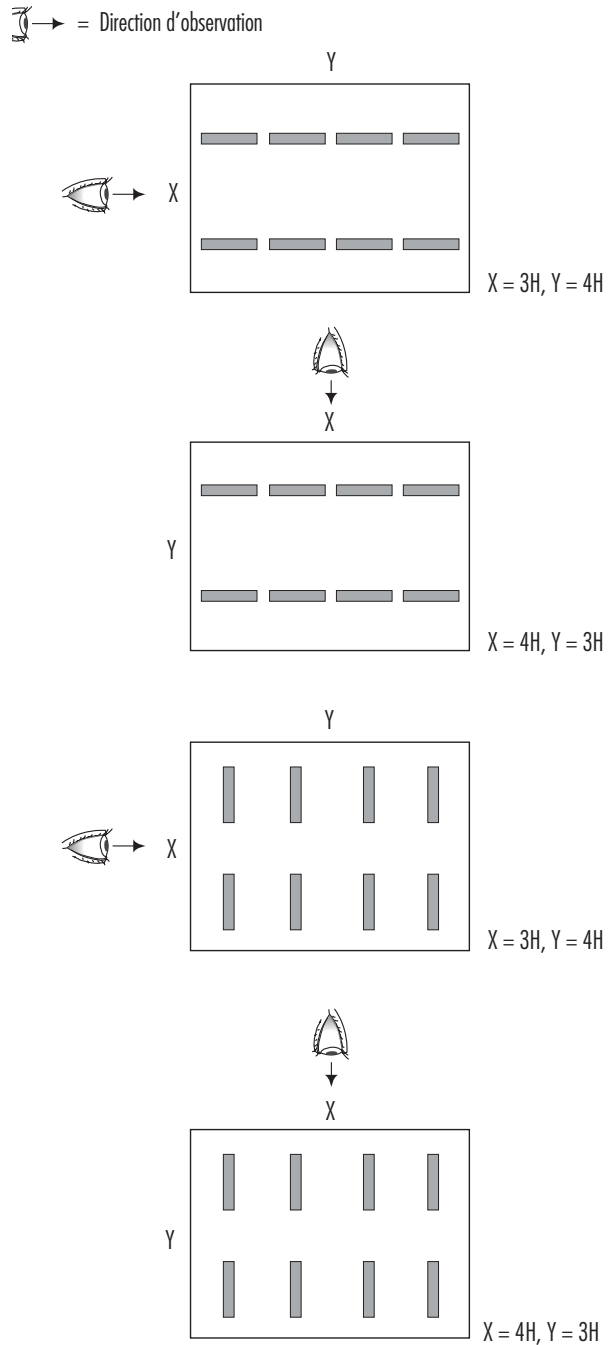
Les études d'éclairage

Une technique d'étude souvent utilisée repose sur une grille de points de mesurage répartis sur l'ensemble de la surface considérée. La base de cette technique consiste à diviser l'ensemble du local en un certain nombre de zones égales, idéalement carrées. L'éclairage au centre de chacune des zones est mesuré au niveau du bureau (0,85 m au-dessus du niveau du sol), puis on calcule une valeur d'éclairage moyen. La précision de la valeur de l'éclairage moyen dépend du nombre de points de mesurage utilisés.

Il existe une relation permettant de calculer le nombre *minimal* de points à partir de l'indice du local considéré.

$$\frac{\text{Longueur} \times \text{Largeur}}{\text{Hauteur utile de l'installation} \times (\text{Longueur} + \text{Largeur})}$$

Figure 46.29 • Possibilités de combinaisons entre l'orientation des luminaires et la direction d'observation dans le local type



Dans cette formule, la longueur et la largeur sont les dimensions de la pièce et la hauteur utile d'installation correspond à la distance entre le plan utile (ou de travail) et le plan des luminaires.

Cette relation se présente sous la forme:

$$\text{Nombre minimal de points de mesurage} = (x + 2)^2$$

où x est la valeur de l'indice du local (I) arrondie au nombre entier immédiatement supérieur, sauf quand toutes les valeurs de I sont

égales ou supérieures à 3, auquel cas x est affecté de la valeur 4. Cette formule donne le nombre minimal de points de mesure, mais il est souvent nécessaire d'en utiliser plus.

Lors de l'étude de l'éclairage d'une zone de travail et de son environnement immédiat, il convient de prendre en compte l'*uniformité* de l'éclairage.

$$\text{Facteur d'uniformité} = \frac{\text{Éclairage minimal}}{\text{Éclairage moyen}}$$

Pour toute zone de travail et son environnement immédiat, le rapport d'uniformité ne doit pas être inférieur à 0,8.

Dans de nombreux lieux de travail, il n'est pas nécessaire d'éclairer toutes les zones au même niveau. Un éclairage localisé ou local peut permettre quelques économies d'énergie, mais quel que soit le système pour lequel on opte, on veillera à ce que les variations d'éclairage dans un local ne soient pas trop fortes.

Le rapport d'éclairage est exprimé par la formule:

$$\text{Rapport d'éclairage} = \frac{\text{Éclairage maximal}}{\text{Éclairage minimal}}$$

En un point quelconque de la zone principale de l'intérieur, le rapport de l'éclairage ne devrait pas être supérieur à 5:1.

Les instruments utilisés pour mesurer l'éclairage et la luminosité ont des réponses spectrales qui diffèrent de celle du système visuel humain. Ces réponses sont souvent corrigées à l'aide de filtres. Si des filtres sont intégrés, les instruments sont dits à *correction de couleur*.

Les luxmètres comportent une correction supplémentaire qui compense la direction de la lumière incidente arrivant sur la cellule de détection. Les luxmètres capables de mesurer l'éclairage

de manière précise à partir de différentes directions de lumière incidente sont dits à *correction de cosinus*.

Les mesurages de l'indice d'éblouissement

Le système le plus fréquemment utilisé au Royaume-Uni, avec des variantes dans d'autres pays, consiste essentiellement en un processus à deux étapes. La première étape établit une valeur d'*indice d'éblouissement non corrigé* (Uncorrected Glare Index (UGI)), dont la figure 46.28 donne un exemple.

La hauteur H correspond à la distance verticale entre le centre de la source lumineuse et le niveau des yeux d'un observateur assis, qui est normalement considéré comme égal à 1,2 m au-dessus du niveau du sol. Les dimensions principales de la pièce sont ensuite converties en multiples de H . Ainsi, avec $H = 3,0$ m, on aura une longueur de $4H$ et une largeur de $3H$. Quatre calculs différents de l'UGI doivent être effectués afin de déterminer le scénario le plus défavorable parmi les schémas d'installation illustrés à la figure 46.29.

Les fabricants d'équipements d'éclairage fournissent des tableaux spécifiant, pour des valeurs données de facteur de réflexion des matériaux à l'intérieur d'une pièce, les valeurs de l'indice d'éblouissement non corrigé pour chaque combinaison de valeurs de X et de Y .

La seconde étape du processus consiste à appliquer des facteurs de correction aux valeurs de l'UGI en fonction des valeurs du flux lumineux de la lampe et de l'écart par rapport à la valeur de la hauteur (H).

La valeur finale de l'indice d'éblouissement est ensuite comparée à la valeur de l'indice d'éblouissement limite pour des intérieurs spécifiques, indiquée dans des documents de référence comme le *Code for Interior Lighting* (CIBSE, 1994).

Références bibliographiques

- Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), 1994: *Code for Interior Lighting* (Londres).
Commission électrotechnique internationale (CEI), 1999: *Système international de codification des lampes (ILCOS)*, CEI/TS 61231, 2^e édition (Genève).

Références complémentaires

- Association française de normalisation (AFNOR), 1975: *Couleurs d'ambiance pour les lieux de travail*, NF X 08-004 (Paris).
Bestratén, M., Chavarria, R., Hernández, A., Luna, P., Nogareda, C., Nogareda, S., Oncins, M. et Solé, M., 1996: *Ergonomia — Guía del Monitor* (Madrid, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
Bureau international du Travail (BIT), 1965: *L'éclairage artificiel dans les ateliers et les bureaux*, note documentaire n° 11, Centre international d'informations de sécurité et d'hygiène du travail (CIS) (Genève).
Cayless, M.A. et Marsden, A.M., 1983: *Lamps and Lighting* (Londres, E. Arnold).

- Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), 1993: *Lighting Guide* (Londres).

- Commission des Communautés européennes (CEE), 1989: «Directive 89/391/CEE du Conseil, du 12 juin 1989, concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail», *Journal officiel*, n° L 183 du 29/6/1989, pp. 1-8.

- Commission internationale de l'éclairage (CIE), 1992: *Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems*, publication CIE n° 97-1992 (Vienne).

- De Boer, J.B. et Fischer, D., 1981: *Interior Lighting* (Anvers, Philips Technical Library).

- Department of Productivity, 1979: «Artificial light at work», *Occupational Safety and Health Working Environment*, n° 6 (Canberra, Australian Government Publishing Service).

- . 1980: «Colour at work», *ibid.*, n° 8 (Canberra, Australian Government Publishing Service).

- Gardiner, K. et Harrington, J.M., 1995: *Occupational Hygiene* (Oxford, Blackwell Science).

- Grandjean, E., 1988: *Fitting the Task to the Man* (Londres, Taylor and Francis).

- Greene, T.C. et Bell, P.A., 1980: *Additional Considerations Concerning the Effect of 'Warm' and 'Cool' Wall Colours on Energy Conservation* (Londres, Ergonomics).

- Illuminating Engineers Society of North America (IESNA), 1990: *American National Standard. Practice of Industrial Lighting*, ANSI/IES RP7-1990 (New York).

- . 1999: *IESNA Lighting Handbook*, 9^e édition (New York).

- Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 1998: *L'éclairage* (Paris).

- . 1999: *L'éclairage naturel* (Paris).

- Lighting Industry Federation, 1994: *Lighting Industry Federation Lamp Guide* (Londres).

- Mandelo, P., 1994: *Fundamentos de Ergonomía* (Barcelone, Universidad Politècnica de Barcelona).

- Moon, P., 1961: *Scientific Basis of Illuminating Engineering* (Londres, Dover Publications).

- Walsh, J.W.T., non daté: *Textbook of Illuminating Engineering* (Londres, Pitman).