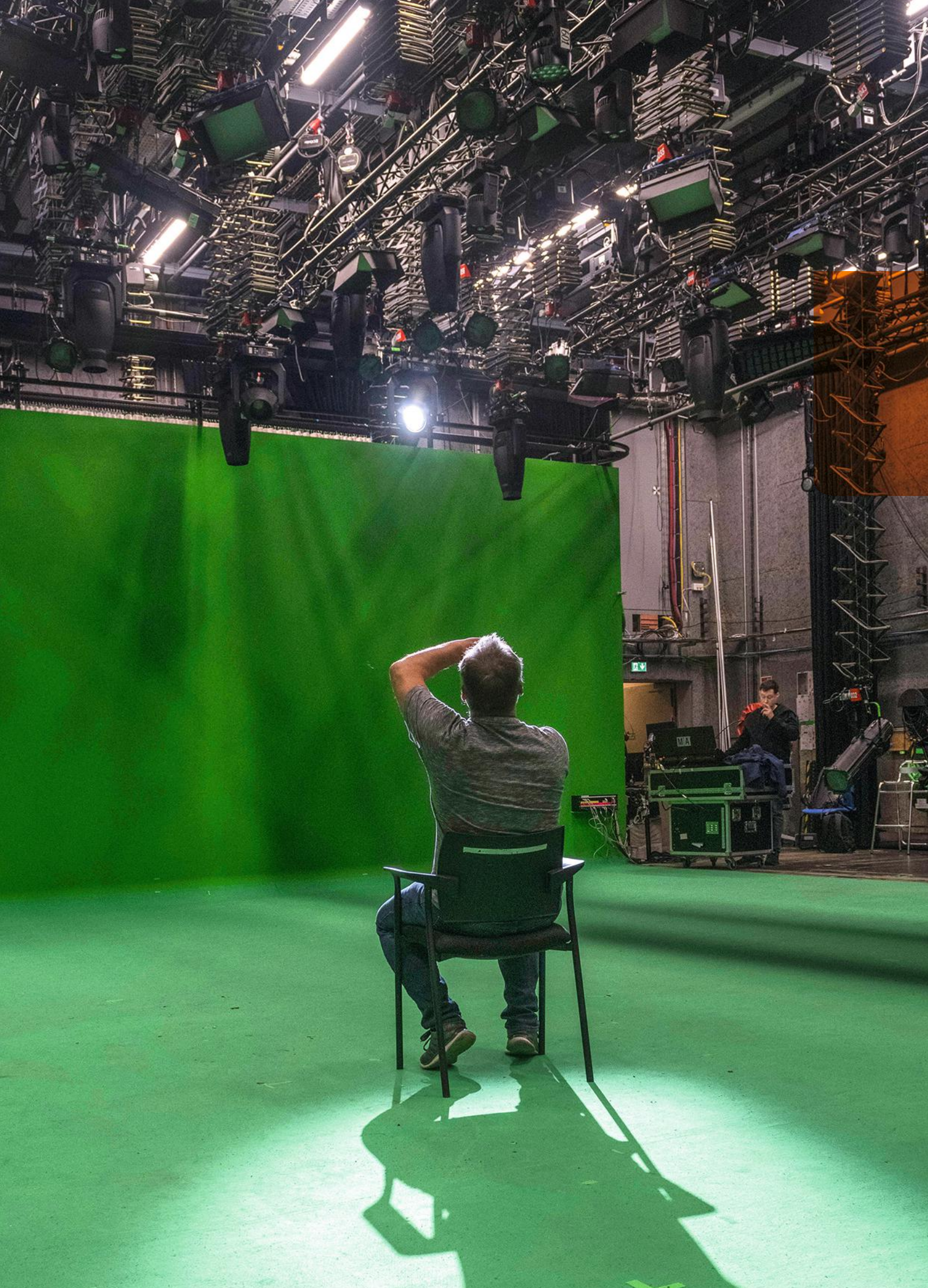






Dossier

L'ÉCLAIRAGE DES LIEUX DE TRAVAIL

❶ Lumière et éclairage : définitions, grandeurs et concepts de base
P.30

❷ Éclairage des lieux de travail : normes et réglementation
P. 40

❸ Éclairage naturel dans les locaux professionnels
P. 49

❹ Éclairage artificiel dans les locaux professionnels
P. 59

❺ Effets non visuels de la lumière
P. 72

L'éclairage des lieux de travail constitue un élément essentiel pour la santé et la sécurité des salariés. Un bon éclairage contribue à éviter les accidents, comme les chutes et les collisions. Il adapte l'environnement lumineux aux capacités visuelles de l'opérateur et aux exigences de ses tâches.

À l'inverse, un éclairage inadapté complique la perception de l'environnement, augmentant ainsi les risques d'accidents. Il peut également provoquer des effets indirects, comme l'adoption de mauvaises postures pour éviter l'éblouissement, ou simplement pour mieux lire un document.

Assurer une bonne visibilité ne suffit pas. Lorsque la situation l'exige, l'éclairage est conçu pour limiter les effets indésirables de la lumière sur la santé des travailleurs.

Le premier article de ce dossier pose les bases techniques indispensables à une compréhension claire des notions essentielles pour évaluer objectivement une installation d'éclairage. Est abordée ensuite la prévention des risques liés à un éclairage inadapté, dès la phase de conception ou d'aménagement des espaces de travail, par l'identification des besoins visuels des salariés et leur traduction en prescriptions éclairagistes conformes aux réglementations et normes applicables.

Les articles suivants décrivent les méthodes et outils d'aide au dimensionnement des installations d'éclairage naturel, puis artificiel. Le dernier article présente les connaissances actuelles sur les risques photobiologiques, comme celui lié à la lumière bleue, ainsi que les effets non visuels de la lumière sur la santé, tels que la synchronisation de l'horloge biologique.

LIGHTING IN WORKPLACES – Lighting in workplaces is an essential contributor to health and safety for workers. Good lighting helps to avoid accidents like falls and collisions, and allows the environment to be adapted to the visual capacities of the operator and to task-related requirements. In contrast, ill-adapted lighting complicates perception of the environment, increasing the risk of accidents. It can also have indirect effects, such as the adoption of poor posture to avoid glare, or simply to be able to read a document. Ensuring good visibility is not enough: appropriate lighting can also take into account the effects of light on workers' health.

LUMIÈRE ET ÉCLAIRAGE : DÉFINITIONS, GRANDEURS ET CONCEPTS DE BASE

Comprendre la lumière et ses grandeurs associées est une étape essentielle pour concevoir un éclairage adapté aux lieux de travail. Avant d'aborder les aspects réglementaires et normatifs (Cf. Article pp. 40-48), cet article présente les notions fondamentales : définition de la lumière, systèmes d'unités énergétiques et visuelles. Il présente également les principales sources lumineuses, ainsi que les grandeurs photométriques de base : flux, éclairement, intensité, luminance. Ces concepts permettent d'expliquer comment la lumière est perçue par l'œil humain et comment elle influence la visibilité et le confort visuel des travailleurs.

MAXIME
BERGET,
JEAN-MARC
DENIEL
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

La lumière

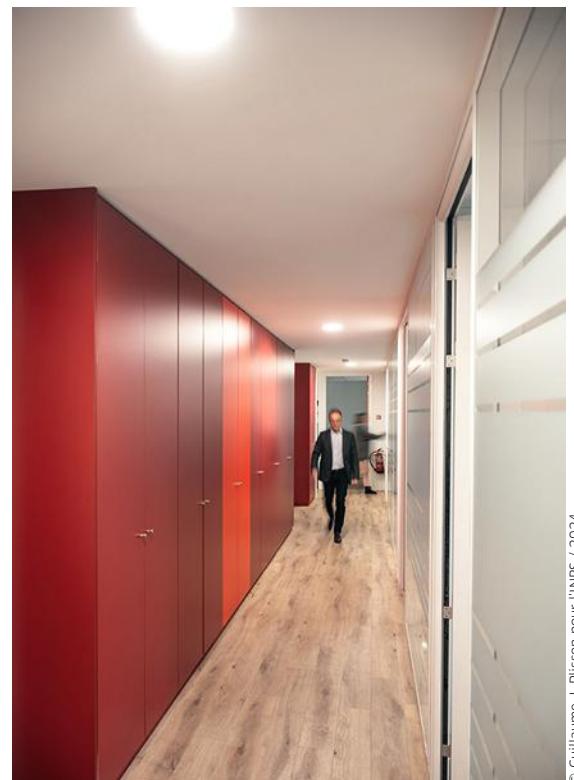
Nous percevons ce qui nous entoure grâce aux rayonnements optiques, qui appartiennent à la famille des ondes électromagnétiques [1-3], au même titre que les rayons X, les micro-ondes ou les ondes radio. Ces rayonnements peuvent être décrits à la fois comme des ondes, correspondant à des variations synchrones des champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$, et comme un flux de particules (photons). Les photons se propagent en ligne droite à environ 300 000 km.s⁻¹ dans le vide. Chacun d'eux transporte une quantité d'énergie proportionnelle à sa fréquence et est caractérisé par sa longueur d'onde λ , exprimée en nanomètres (1 nm = 10⁻⁹ m). Cette longueur d'onde correspond à la distance parcourue pendant une oscillation complète des champs électrique et magnétique (Cf. Figure 1). Le terme « lumière » désigne les rayonnements optiques visibles par l'œil humain, dont les longueurs d'onde λ s'étendent de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge), plage de sensibilité des photorécepteurs de la rétine¹. Les rayonnements ultraviolets (UV : $\lambda < 380$ nm) et infrarouges (IR : $\lambda > 780$ nm) sont donc invisibles à l'œil humain (Cf. Figure 2). Un photon capté par un photorécepteur rétinien déclenche des réactions biochimiques qui créent un signal électrique. Ce signal est ensuite transmis sous forme d'influx nerveux jusqu'au cerveau, qui interprète cette stimulation en une perception visuelle colorée plus ou moins intense selon la longueur d'onde λ et la quantité de photons reçus.

Les grandeurs décrites ci-après permettent de quantifier la lumière, depuis son émission par une source jusqu'à sa perception par l'œil humain.

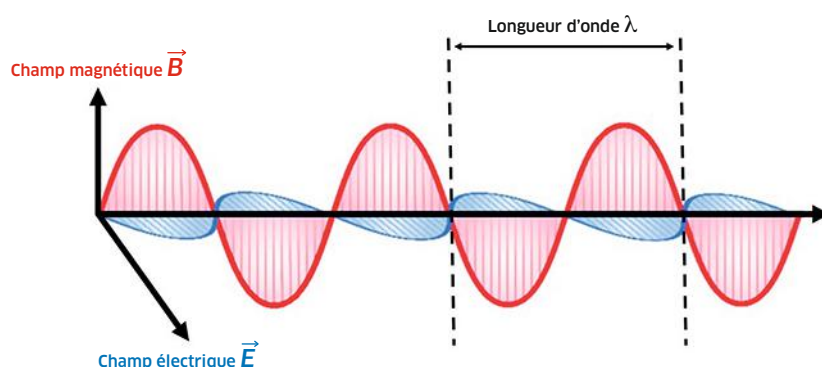
Elles constituent le socle nécessaire à toute démarche d'éclairage adaptée aux exigences des lieux de travail, pour assurer la sécurité et la santé des salariés.

Les systèmes d'unités

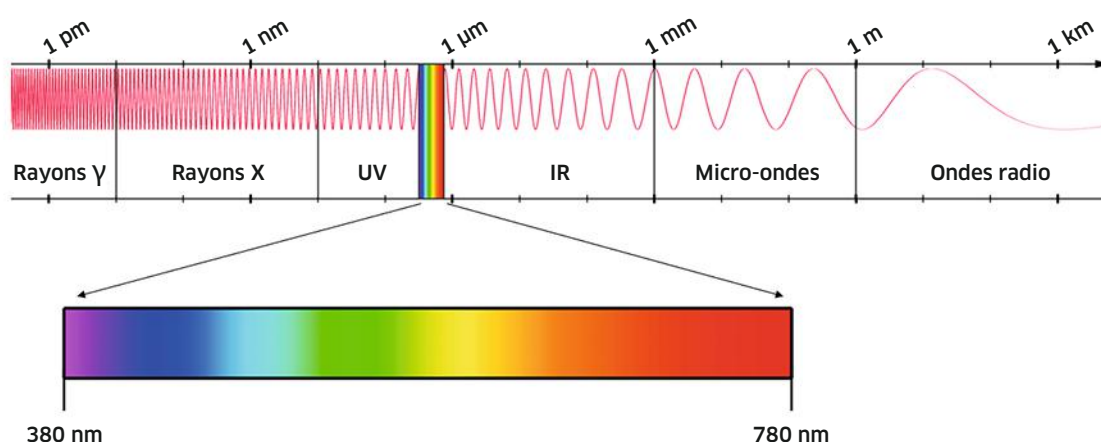
Les grandeurs physiques utilisées pour caractériser la lumière – flux, éclairement, intensité, luminance



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS / 2024



← FIGURE 1
Longueur d'onde d'un rayonnement optique, définie par la distance de propagation parcourue lors d'une période d'oscillation des champs électrique et magnétique.



← FIGURE 2
Spectre électromagnétique depuis les rayons Gamma ($\lambda=0,01$ nm) jusqu'aux ondes radio ($\lambda=1$ km). La lumière ne représente qu'une petite partie du spectre électromagnétique.

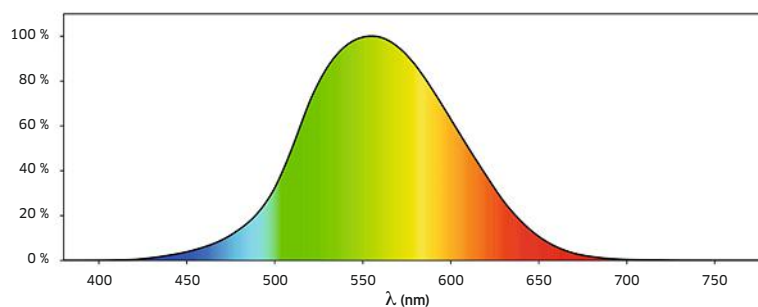
– présentées ci-après existent chacune sous deux formes : énergétique et visuelle (ou lumineuse). Leur version énergétique porte l'indice « e » (par exemple, pour le flux énergétique : Φ_e). Par convention, toutes les grandeurs citées dans ce dossier sans indice ni précision particulière sont considérées comme des grandeurs visuelles.

Le système énergétique

Ce système décrit le rayonnement en s'appuyant uniquement sur des grandeurs physiques absolues, comme la puissance rayonnée en watts (W), sans tenir compte de la perception humaine. Il prend en compte toutes les longueurs d'onde, qu'elles soient visibles ou non. On l'utilise notamment pour évaluer une exposition aux rayonnements IR et UV. On parle de grandeurs énergétiques.

Le système visuel

Ce système est centré sur la perception humaine : notre œil ne distingue pas chaque longueur d'onde séparément, mais les intègre toutes en les pondérant selon sa sensibilité spectrale $V(\lambda)$ pour produire une sensation de couleur (Cf. Figure 3). Sa sensibilité est maximale autour de 555 nm, ce qui correspond à la zone du vert-jaune.



Ce système s'exprime en unités adaptées à la vision : les grandeurs lumineuses. Elles sont dérivées des grandeurs énergétiques, mais chaque longueur d'onde est pondérée selon la réponse de l'œil humain. Cette « mesure des grandeurs relatives aux rayonnements, évaluées selon l'impression visuelle produite par ceux-ci et sur la base de certaines conventions » définit la photométrie, selon les dictionnaires courants. Contrairement au système énergétique, on ne mesure plus l'énergie physique brute, mais l'efficacité visuelle de l'énergie rayonnée. Ce système d'unités est utilisé en éclairagisme, car la qualité d'un éclairage dépend directement de la manière dont l'œil humain perçoit la lumière.

↑ FIGURE 3
Courbe de sensibilité photopique $V(\lambda)$ de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde. Il faut 20 fois plus de rayonnement à 450 nm (bleu) pour produire la même sensation visuelle qu'à 555 nm (vert).





FIGURE 4
Lampes à décharge, majoritairement utilisées en éclairage jusque dans les années 2010.
a) Lampe à sodium haute pression.
b) Lampe à iodures métalliques.
c) Lampe fluorescente compacte.
d) Tube fluorescent.

Les sources

Sources primaires

Sur terre, la seule source d'éclairage naturel direct est le soleil. Pendant longtemps, l'éclairage artificiel des lieux de travail a été majoritairement assuré par des lampes à décharge² (Cf. Figure 4), que ce soit à l'extérieur (projecteurs équipés de lampes à sodium haute pression de couleur jaune ou à iodures métalliques de couleur blanche) ou à l'intérieur (lampes à iodures métalliques, tubes fluorescents ou lampes fluorescentes). Depuis les années 2010, le développement rapide des diodes électroluminescentes (led), leurs atouts (comparé, efficacité, durée de vie, faible consommation), ainsi que les décrets d'écoconception qui interdisent la mise sur le marché de produits contenant des substances nocives ou énergivores [4,5], ont entraîné un remplacement massif des lampes à décharge par l'éclairage led, aussi bien lors de la création de nouveaux espaces de travail que lors de rénovations.

Une led (Cf. Figure 5) est un composant semi-conducteur formé de la juxtaposition de deux parties d'un même cristal, mais « dopées » différemment. Le « dopage de type N » introduit un excédent d'électrons, tandis que le « dopage de type P » crée un déficit d'électrons, appelés « trous ». À l'interface se forme une zone appauvrie en porteurs de charge. Lorsqu'un courant électrique circule dans la led, électrons et trous se rencontrent dans cette zone et se recombinent. Dans les matériaux utilisés pour les led, cette recombinaison émet des photons : c'est la lumière émise par le composant.

La longueur d'onde émise dépend du matériau semi-conducteur utilisé (nitrure de gallium, indium, arséniure de gallium-indium, etc). Les led destinées à l'éclairage des lieux de travail les plus répandues actuellement émettent dans une bande de longueur d'onde relativement étroite centrée autour de 450 nm (bleu). Une couche de matériau luminescent (de type YAG, jaune), déposée au-dessus

de la led, absorbe une partie du rayonnement bleu, pour réémettre dans le jaune. Cette recombinaison émet des photons : c'est la lumière émise par le composant.

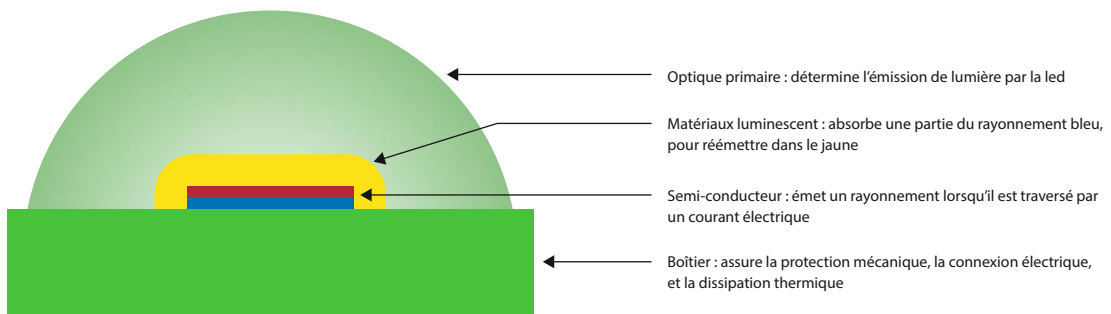
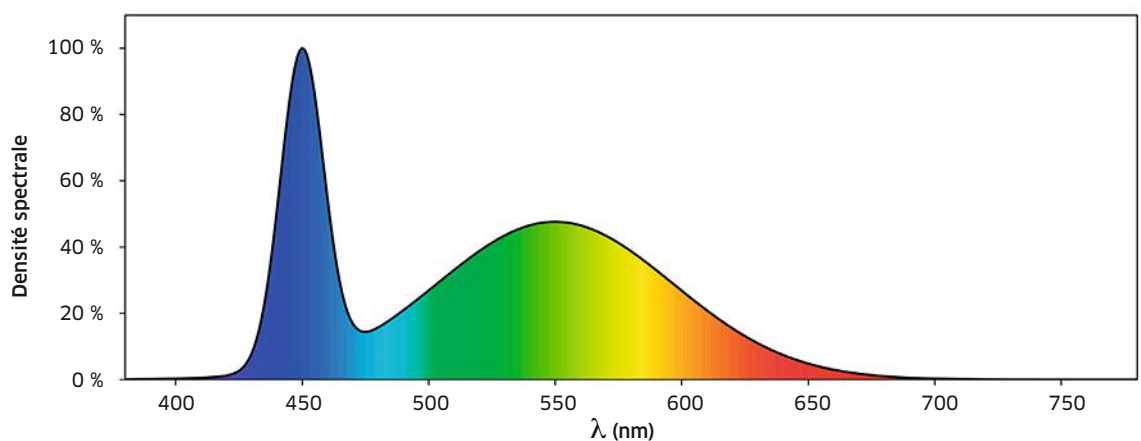


FIGURE 5 →
Représentation schématique en coupe d'une source led.

FIGURE 6 →
Spectre d'émission relatif d'une led blanche, combinaison d'un pic étroit centré à 450 nm (émission de la puce bleue) et d'une bande large de phosphorescence centrée autour de 550 nm (vert-jaune). Après normalisation à 1 au maximum bleu (450 nm), la densité spectrale relative est d'environ 0,17 nm à 470 nm et 0,45 nm à 550 nm.



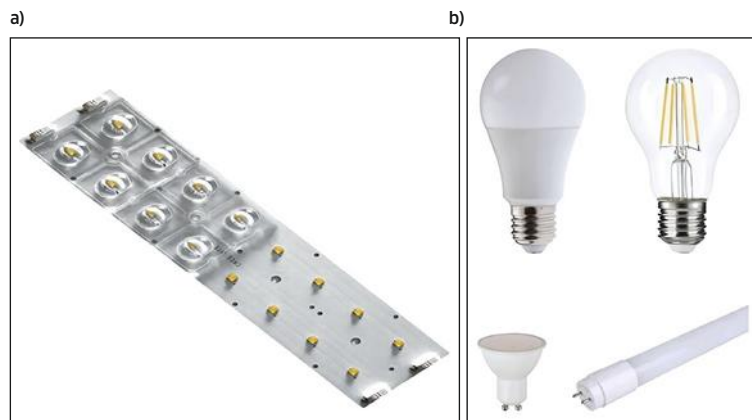
de la puce led, absorbe une partie de cette lumière bleue et la réémet dans une bande beaucoup plus large centrée autour de 550 nm, dans la zone vert-jaune du spectre. L'association du pic bleu résiduel et de cette large réémission est interprétée par notre système visuel comme une lumière blanche, c'est-à-dire un mélange spectral qui produit une sensation de lumière non colorée pour l'œil humain (Cf. Figure 6).

Pour l'éclairage, les sources led peuvent être directement utilisées comme sources primaires, éventuellement équipées d'optiques secondaires afin de répartir la lumière sur le poste de travail. Elles peuvent également être intégrées dans un élément mécanique, comme une lampe équipée d'un culot ou un tube à led (Cf. Figure 7).

Sources secondaires

Toute surface éclairée peut, à son tour, devenir une source secondaire de lumière. Selon son état de surface (mat, satiné, brillant, etc.) et ses propriétés optiques (absorption, transmission, réflexion), une surface peut en effet renvoyer tout ou partie du rayonnement qu'elle reçoit, dans une ou plusieurs directions. Ce phénomène dépend également de la distribution spectrale de la lumière incidente, c'est-à-dire des longueurs d'onde qui la composent.

Ainsi, la source lumineuse initiale est dite directe (comme un luminaire led). Les surfaces qu'elle éclaire deviennent, par réflexion, des sources indirectes. Elles participent elles aussi à l'éclairage



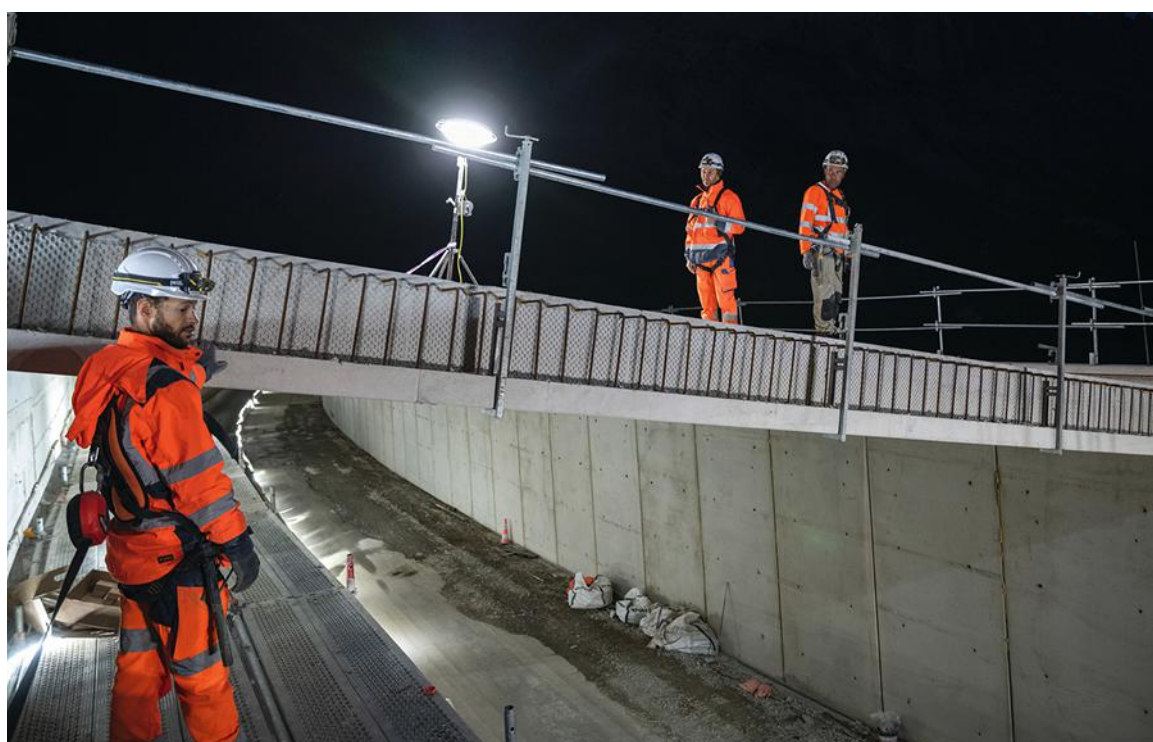
d'un espace, et peuvent être caractérisées par les mêmes grandeurs photométriques que les sources directes (flux, luminance, etc.).

Spectre d'émission

Une source n'émet pas la même quantité d'énergie pour toutes les longueurs d'onde. La densité spectrale indique comment l'énergie émise par la source se répartit selon la longueur d'onde.

Le spectre d'émission (ou distribution spectrale d'émission) est simplement la représentation de cette densité spectrale en fonction de la longueur d'onde. Dans la pratique, le spectre est souvent représenté sous une forme relative (Cf. Figure 6), c'est-à-dire ramené à la valeur maximale, ce qui permet de comparer facilement différentes sources lumineuses.

↑ FIGURE 7
a) Sources led, équipées ou non d'optiques secondaires.
b) Sources led intégrées dans des lampes à culot et un tube.

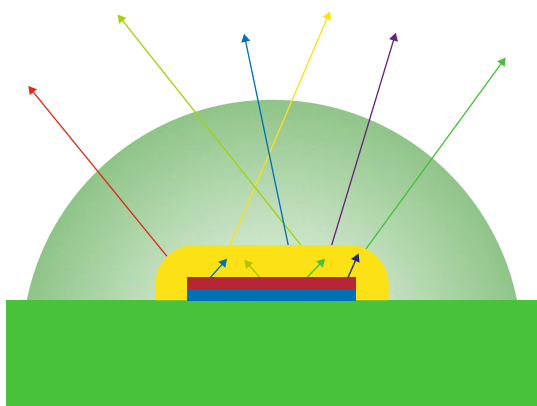


© Claude Almodovar pour l'INRS / 2025



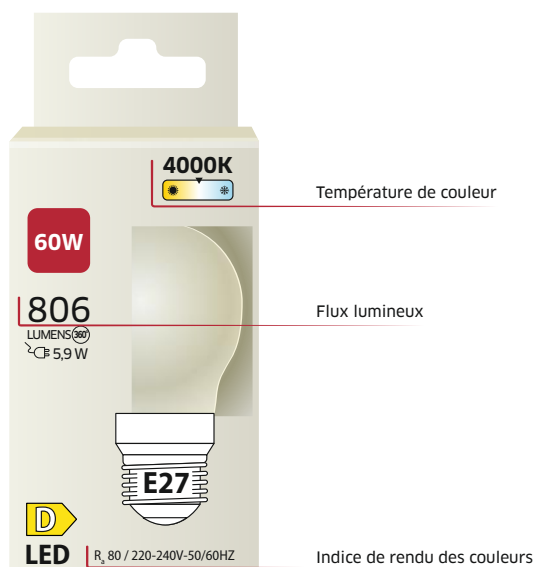
TABEAU →
Glossaire des grandeurs visuelles et des unités correspondantes.

GRANDEUR	SYMBOLE	UNITÉ	DÉFINITION
Flux	Φ	Lumen (lm)	Puissance lumineuse émise par une source
Intensité	I	Candela (cd)	Flux émis dans une direction
Éclairement	E	Lux (lx, ou lm/m ²)	Flux reçu par unité de surface
Luminance	L	Candela par mètre carré (cd/m ²)	Flux émis dans une direction, par unité de surface vue par un observateur. Par approximation (loi de Lambert) : $\rho \cdot E = \pi \cdot L$ avec $0 \leq \rho \leq 1$
Température de couleur	T _{cp}	Kelvin (K)	Apparence colorée de la lumière, de chaude pour les lumières rouges à froide pour les lumières blanches/bleues
Indice de rendu des couleurs	IRC / R _a	sans	Capacité d'une source à restituer les couleurs des objets éclairés, par comparaison avec le soleil



↑ **FIGURE 8** Le flux énergétique Φ_e d'une source de rayonnement est la quantité d'énergie totale émise dans tout l'espace par unité de temps.

FIGURE 9 →
Les indications qu'il est possible de trouver sur l'emballage d'une source.



Par analogie avec les spectres d'émissions qui caractérisent les sources, les surfaces et leurs matériaux sont caractérisés par leur distribution spectrale d'absorption, de transmission et de réflexion, qui représentent les proportions relatives d'énergie absorbées, transmises ou réfléchies.

Tous les matériaux et toutes les surfaces n'ont pas le même comportement. Certains matériaux transmettent une grande partie de la lumière visible, comme le verre utilisé pour les fenêtres. D'autres au contraire en absorbent une grande partie (verre teinté, etc.), ou réfléchissent préférentiellement certaines longueurs d'onde (peinture teintée, etc.).

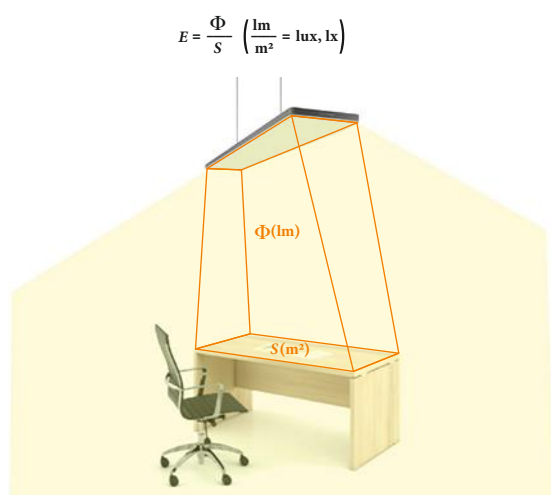
À noter : les paragraphes qui suivent décrivent l'ensemble des grandeurs utilisées pour caractériser la lumière, ainsi que leurs unités. Ces informations sont synthétisées et rassemblées dans le Tableau ci-dessus.

Les grandeurs et systèmes d'unités

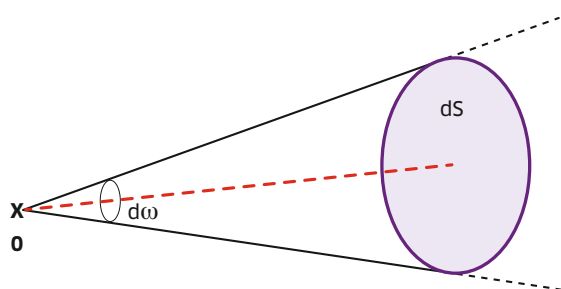
Flux énergétique et flux lumineux

Une source d'éclairage émet des photons de longueur d'ondes différentes. Ils sont représentés sous forme de rayons lumineux colorés sur la Figure 8. Chacun de ces photons transporte une énergie qui dépend de sa longueur d'onde. Le flux énergétique Φ_e de cette source, exprimé en watts (W), correspond à la quantité totale d'énergie rayonnée par ses photons par unité de temps (en secondes). Il représente ainsi la puissance totale émise par la source dans tout l'espace.

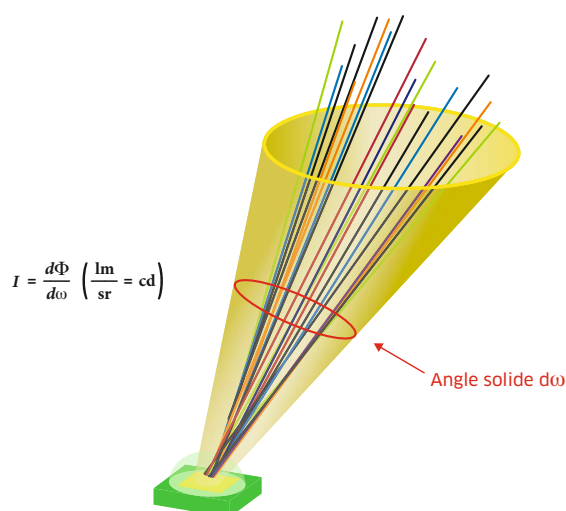
L'équivalent visuel du flux énergétique Φ_e est le flux lumineux Φ . Il est obtenu en pondérant l'énergie de chaque photon de longueur d'onde λ émis par la courbe de sensibilité de l'œil $V(\lambda)$ (Cf. Figure 3). Il s'exprime en lumen (lm). Il est généralement indiqué sur les emballages des sources (Cf. Figure 9).



↑ FIGURE 10 L'éclairement d'une surface S est la quantité de flux Φ reçu, rapportée à la surface S exposée.



↑ FIGURE 11 Angle solide : vue depuis le point O , la surface élémentaire dS occupe la portion de l'espace délimitée par l'angle solide $d\omega$.



↑ FIGURE 12 Lorsque l'angle solide $d\omega$ autour d'une direction devient très petit, le rapport entre le flux élémentaire $d\Phi$ contenu dans cet angle solide et la valeur de $d\omega$ donne l'intensité lumineuse I émise dans cette direction.

Éclairement

L'éclairement E correspond au flux lumineux Φ reçu depuis tout l'espace par unité de surface S (Cf. Figure 10). Il s'agit d'une densité de puissance qui s'exprime en lumen par mètre carré, également appelé lux (ou lx) :

$$E = \frac{\Phi}{S} \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lux, lx} \right)$$

Intensité

L'intensité I désigne le flux de lumière émis par une source dans une direction donnée, c'est-à-dire par unité d'angle solide $d\omega$. Un angle solide mesure la portion d'espace occupée par une surface vue depuis un point donné (Cf. Figure 11). Il correspond à l'angle d'ouverture du cône dont le sommet est le point (noté O) et dont les génératrices sont tangentes à la surface considérée. Il s'exprime en stéradian (sr). C'est l'analogue tridimensionnel de l'angle plan.

Si l'on ne considère que le flux lumineux élémentaire $d\Phi$ contenu dans un angle solide élémentaire $d\omega$, l'intensité lumineuse I est définie par (Cf. Figure 12) :

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (\text{lm/sr} = \text{cd})$$

L'intensité s'exprime en lumen par stéradian, ou en candela³ ($\text{cd} = \text{lm/sr}$). Elle est indiquée sur les emballages des sources de petites dimensions comme les spots. Les symboles I ou I_0 représentent l'intensité dans l'axe de la source. Cette intensité permet de calculer très simplement l'éclairement E à une distance d située face à la source, et orientée perpendiculairement à son axe :

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (\text{lux})$$

Luminance

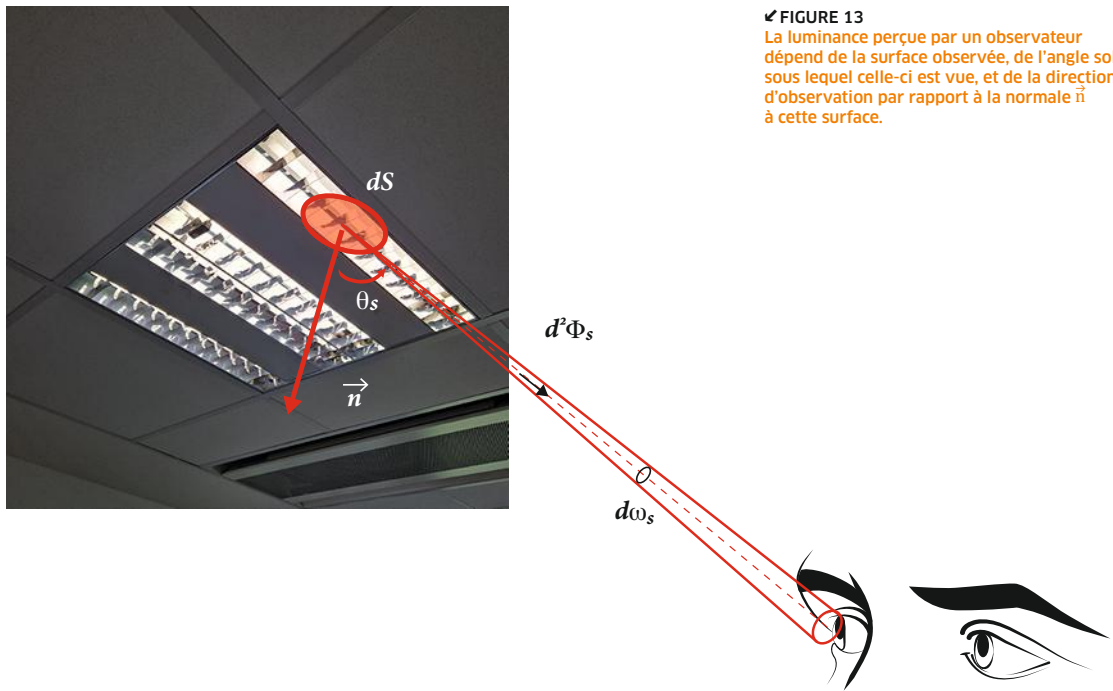
La luminance est la grandeur photométrique qui caractérise la manière dont une surface apparaît à l'œil dans une direction donnée. Elle détermine non seulement si une surface semble plus ou moins brillante, mais aussi comment sa couleur est perçue, puisqu'elle décrit la quantité de lumière provenant d'une zone donnée, dans une direction donnée, et pour chaque longueur d'onde. La luminance quantifie le flux lumineux émis ou réfléchi par unité de surface et par unité d'angle solide, c'est-à-dire dans une direction d'observation donnée. Elle est définie par l'expression suivante (Cf. Figure 13) :

$$L = \frac{d^2\Phi_s}{dS \cdot \cos(\theta_s) \cdot d\omega_s} \quad (\text{lm/sr/m}^2) \quad (\text{équation 1})$$

avec :

- dS (m^2) : la surface observée ;
- $d\omega_s$ (sr) : l'angle solide d'observation ;
- θ_s (rad) : l'angle entre la normale à la surface de la source et la direction d'observation ;





✓ FIGURE 13

La luminance perçue par un observateur dépend de la surface observée, de l'angle solide sous lequel celle-ci est vue, et de la direction d'observation par rapport à la normale $\vec{n}$ à cette surface.

- $d^2 \Phi_s$ (lm): le flux lumineux émis dans cette direction.

La luminance est la grandeur photométrique la plus importante en éclairage: l'œil humain n'est pas sensible à l'éclairement, la perception visuelle repose sur les variations de luminance entre zones adjacentes dans le champ de vision. Ces variations peuvent être des variations d'amplitude, ou des variations colorées.

- Variation d'amplitude: elle apparaît lorsque deux surfaces de même couleur reçoivent des éclairagements différents. La surface la plus éclairée renvoie davantage de flux lumineux, ce qui

entraîne une différence de luminance perçue (Cf. Figure 14). Elle peut également apparaître lorsque les surfaces, bien que recevant le même éclairage, présentent des orientations ou des états de surface différents: ces caractéristiques modifient la direction et la quantité de lumière réfléchie vers l'observateur.

- Variation colorée: elle apparaît lorsque deux surfaces, qui possèdent des distributions spectrales de réflexion différentes, reçoivent un éclairage identique. Elles ne réfléchissent pas la même partie du spectre et apparaissent donc de couleurs différentes (Cf. Figure 15).

FIGURE 14 →
Ombre perçue et variation de luminosité du plateau de la machine (zones délimitées en rouge). Cette différence correspond à une variation de luminance due à un éclairage non uniforme.



© Mikhail Nilov / Pexels.com

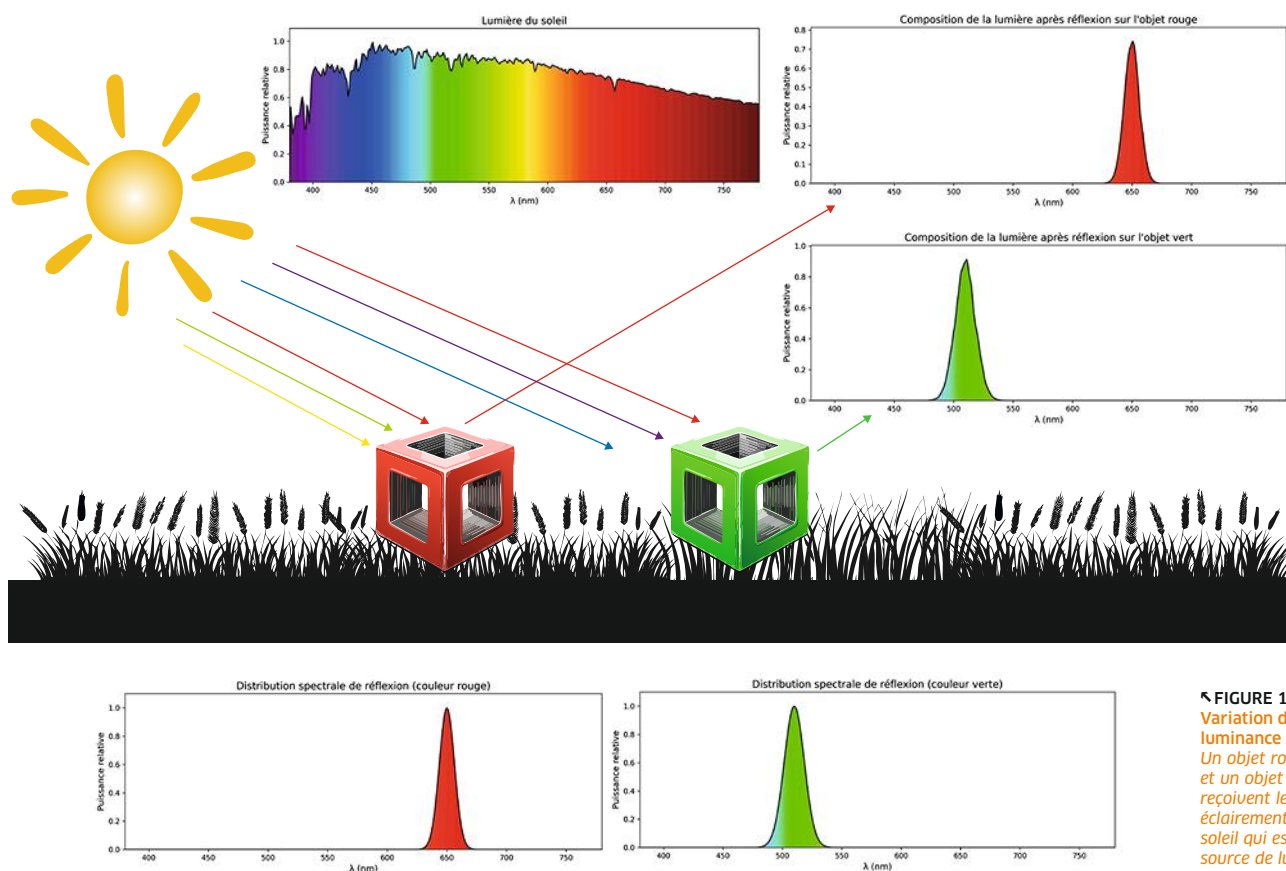


FIGURE 15
Variation de luminance colorée. Un objet rouge et un objet vert reçoivent le même éclairement du soleil qui est une source de lumière blanche. Après réflexion, chacun d'eux renvoie un spectre différent. L'œil perçoit alors une différence de couleur.

Cette variation colorée s'accompagne toujours d'une variation d'amplitude, car l'œil humain n'a pas la même sensibilité selon les longueurs d'onde.

Visibilité et confort visuel

Plus de 80 % des informations utiles à l'exécution du travail transistent par la vision [3]. Pour se déplacer et accomplir ses tâches en toute sécurité, un salarié doit distinguer clairement les éléments de son environnement ainsi que les informations visuelles nécessaires à son activité. Un éclairage adéquat doit :

- assurer une « bonne visibilité », c'est-à-dire une perception claire des objets et de l'environnement immédiat [3]. La visibilité d'un objet dépend de nombreux facteurs, notamment du contraste $c = \frac{L_0 - L}{L}$ entre sa luminance L_0 (le détail à percevoir) et celle L du fond sur lequel il se détache (Cf. Figure 16) ;
- garantir le « confort visuel » [3], en assurant une répartition harmonieuse des luminances dans le champ de vision : cela va limiter la fatigue visuelle et les effets d'éblouissement, directs ou par réflexion.

La luminance apparaît donc comme le principal paramètre photométrique sur lequel agir pour garantir un bon éclairage.

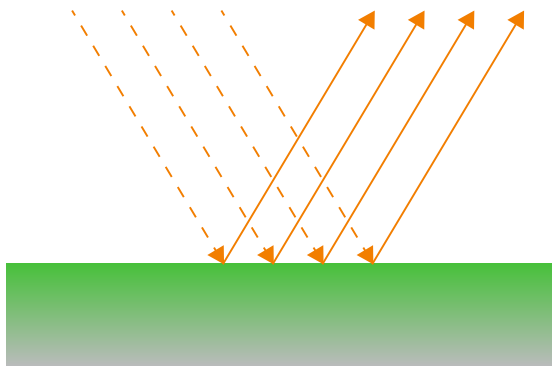
Relation entre la luminance et l'éclairement

La luminance L d'une surface (Cf. Équation 1, p. 35) dépend du flux lumineux qu'elle émet dans une direction donnée. Ce flux, qui fait de la surface une source secondaire, résulte de son éclairement E , de sa distribution spectrale de réflexion et de l'état de sa surface. Une surface parfaitement lisse renvoie les rayons lumineux dans une seule

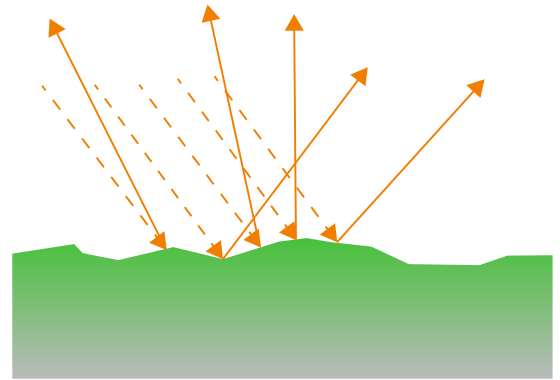


FIGURE 16
Lien entre le contraste de luminance et la visibilité d'un objet. Lorsqu'un objet a la même luminance que le fond sur lequel il doit apparaître, sa visibilité devient nulle. a) Affichage d'un texte en noir sur un fond de niveau de gris variable. b) Difficulté à percevoir l'environnement intérieur depuis l'extérieur : risque accru de collision engin-piéton.





↑ FIGURE 17 Miroir parfait : les rayons sont tous réfléchis dans la même direction.



↑ FIGURE 18 Surface mate : il n'y a pas de direction privilégiée pour la réflexion.

direction (réflexion spéculaire ; Cf. Figure 17), alors qu'une surface parfaitement mate diffuse la lumière de manière uniforme dans toutes les directions (réflexion diffuse ; Cf. Figure 18).

Une surface réelle n'est jamais parfaitement mate ou parfaitement lisse. Son comportement se situe entre ces deux extrêmes. La manière dont elle réfléchit la lumière se décrit par une fonction de réflectivité ρ , qui dépend de la direction d'incidence, de la direction d'observation (réflexion) et de la longueur d'onde λ considérée. Dans le cas général, la luminance d'une surface éclairée peut s'écrire (Cf. Figure 19) :

$$L = \rho(\text{direction incidente, direction d'observation, } \lambda) \cdot E$$

En pratique, la détermination précise de la luminance se heurte à des difficultés : la direction du regard et les propriétés optiques des matériaux sont trop complexes ou trop variables pour être mesurées précisément dans un espace de travail. Une simplification couramment adoptée est de

considérer les matériaux visibles (murs, sols, plafonds, etc.) comme parfaitement diffusants, avec une réflectance ρ constante et indépendante de la longueur d'onde. Dans ce cas, leur luminance ne dépend plus de la direction d'observation, ce qui permet d'utiliser la loi de Lambert :

$$L = \frac{\rho}{\pi} \cdot E \quad \text{avec } \rho \text{ compris entre 0 et 1.}$$

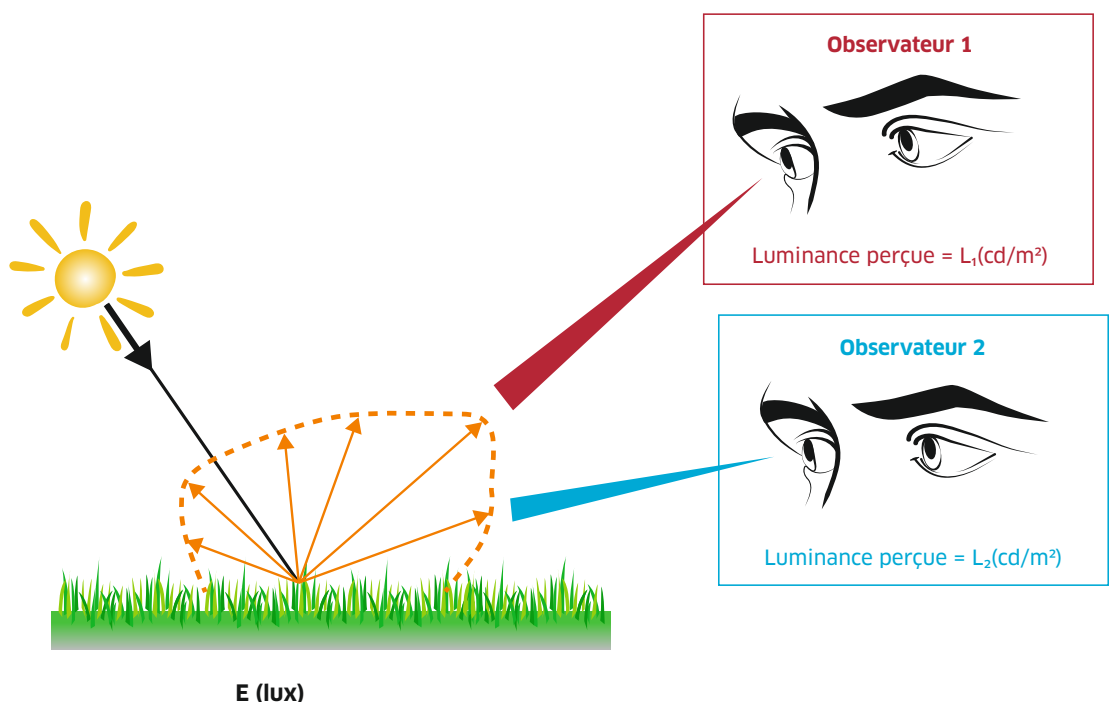
L'éclairement est plus simple et moins coûteux à mesurer que la luminance. Les textes de référence fixent ainsi des objectifs photométriques en matière d'éclairage (Cf. Article 2 pp. 40-48).

Température de couleur

Lorsque la lumière atteint la rétine, elle déclenche un signal électrique interprété par le cerveau. La perception de la couleur globale dépend de la répartition spectrale de la lumière.

La température de couleur, exprimée en kelvin (K), décrit cette impression : une lumière nous semblera « chaude » si elle contient une proportion impor-

FIGURE 19 →
La luminance d'un objet éclairé par une source dépend de son niveau d'éclairement E , de la direction incidente de la lumière, de la position de l'observateur et de la longueur d'onde.



T_{cp} = 6 000 KT_{cp} = 4 000 KT_{cp} = 2 700 K

tante de grandes longueurs d'onde (rouge, orange) et « froide » si elle contient davantage de courtes longueurs d'onde (bleu-violet).

La température de couleur correspond à la température à laquelle il faudrait chauffer un corps noir⁴ pour qu'il émette une lumière ayant le même aspect coloré que celle de la source. Comme pour un métal chauffé qui passe progressivement du rouge-orangé au blanc bleuté à mesure que sa température augmente. Dans l'usage, cela conduit au fait qu'une lumière dite « froide » possède une température de couleur plus élevée qu'une lumière « chaude » (Cf. Figure 20).

Dans le cas d'une source de lumière réelle (hors source à incandescence), le spectre émis ne correspond pas à celui d'un corps noir, on parle alors de température de couleur proximale T_{cp} , c'est-à-dire celle du corps noir dont la lumière serait la plus proche visuellement de celle de la source, sans qu'il y ait de correspondance physique.

Indice de rendu des couleurs

La perception que nous avons des objets qui nous entourent dépend de la manière dont ils réfléchissent la lumière qui les éclaire vers notre œil (Cf. Figure 15). Ainsi, un objet qui ne réfléchit que du vert ne paraîtra de cette couleur que si la lumière qui l'éclaire comporte du vert.

L'indice de rendu des couleurs R_a (parfois noté IRC) est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100 qui caractérise la capacité d'une source lumineuse à restituer les couleurs. Il vaut 100 pour le soleil ou pour une source à incandescence, qui possèdent un spectre continu (toutes les longueurs d'onde du spectre visible).

Un minimum de 80 est demandé pour un travail intérieur ; et de 90 si le travail nécessite la distinction des teintes, par exemple dans l'imprimerie. Cette information est généralement indiquée sur l'emballage de la source⁵.

Ce premier article a présenté les grandeurs physiques liées à la lumière. Le deuxième article (Cf. pp.40) rappelle les principaux textes de référence qui fixent les niveaux adéquats en fonction des activités : le Code du travail, qui définit les obligations du maître d'ouvrage et de l'employeur, ainsi que les normes techniques, qui précisent les critères d'éclairage applicables à la lumière naturelle comme

à la lumière artificielle, en intérieur comme en extérieur. Ces bases sont essentielles pour garantir la santé et la sécurité des travailleurs. Les articles suivants approfondissent l'apport en lumière naturelle et en éclairage artificiel (Cf. pp. 49-58 et 59-71), afin d'assurer un éclairage optimal dans toutes les situations de travail. Enfin, le dernier article (Cf. pp. 72-75) propose un panorama sur les effets non visuels de la lumière, en lien avec la santé et la sécurité au travail. ●

1. Il existe deux types de photorécepteurs rétiniens impliqués dans la vision : les cônes (au centre de la rétine, responsables de la perception des couleurs) et les bâtonnets (en périphérie de la rétine, davantage sollicités en faible luminosité).

2. Une lampe à décharge produit de la lumière en faisant circuler un courant électrique entre deux électrodes, à travers un gaz ou une vapeur métallique. L'arc électrique ainsi créé provoque l'émission lumineuse.

3. La référence historique est la bougie (candel en anglais), qui présente une intensité lumineuse de 1 cd et génère un éclairage de 1 lx à une distance de 1 m autour d'elle.

4. Un corps noir est un objet idéal qui absorbe la totalité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. Il émet un rayonnement uniquement en fonction de sa température, décrit par la loi de Planck.

5. D'autres indicateurs existent pour caractériser la capacité d'une source à restituer les couleurs, notamment l'indice de fidélité R_f issu de la méthode TM-30, plus pertinent que l'indice de rendu des couleurs R_a pour les sources led. Cette métrique n'est toutefois pas encore intégrée dans les normes d'éclairage en vigueur (telles que la norme NF EN 12464-1), qui continuent de s'appuyer sur l'indice R_a .

↑ FIGURE 20
Bureau éclairé avec des sources de températures de couleur variant de 2 700 K à 6 000 K. C'est la plage de températures de couleur communément rencontrée pour l'éclairage des lieux de travail.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DILAURA D. ET AL. – *The lighting handbook: reference and application* [en ligne], 10^e ed. New York, Illuminating engineering society of North America, 2011. Accessible sur : www.ies.org

[2] BURRUS J. – *La photométrie en éclairage*. Société d'éditions Lux.

[3] FLORU R. – *Éclairage et vision* [en ligne]. INRS, 1996, Note scientifique et technique. Accessible sur : https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420151v1/file/INRS_149.pdf

[4] RÈGLEMENT (UE) 2019/2020 DE LA COMMISSION du 1^{er} octobre 2019 établissant des exigences d'écoconception pour les sources lumineuses et les appareillages de commande séparés. Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R2020>

[5] DIRECTIVE 2011/65/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32011L0065>

ÉCLAIRAGE DES LIEUX DE TRAVAIL : NORMES ET RÉGLEMENTATION

Pour prévenir les accidents et préserver la santé et la sécurité des salariés, l'éclairage doit à la fois garantir une bonne visibilité et un confort visuel adapté aux tâches quotidiennes des salariés. Cet article expose les exigences du Code du travail ainsi que les normes techniques qui permettent de concevoir un environnement lumineux en adéquation avec les principes de prévention des risques professionnels. Elles traduisent, sous forme d'objectifs photométriques, les grandeurs vues dans le premier article afin de définir des critères concrets d'éclairage adaptés aux différentes activités.

MAXIME
BERGET,
JEAN-MARC
DENIEL
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Les documents de référence

Les principaux textes relatifs à l'éclairage des lieux de travail sont le Code du travail, ainsi que des normes techniques d'applications volontaires, considérées comme des références de bonnes pratiques indispensables. Elles définissent l'ensemble des critères techniques nécessaires à un éclairage de qualité :

- les articles R. 4213-1 à R. 4213-4 du Code du travail précisent les obligations du maître d'ouvrage lors de la conception des lieux de travail¹ [1] ;
- les articles R. 4223-1 à R. 4223-12 du Code du travail définissent les obligations de l'employeur en matière d'éclairage [2] ;
- la norme NF X 35-103 expose les principes ergonomiques applicables à l'éclairage des postes de travail. Cette norme met l'accent sur l'équilibre des luminances dans le champ visuel [3] ;
- les normes NF EN 12464-1 et -2 spécifient respectivement les exigences d'éclairage pour les lieux de travail intérieurs et extérieurs, en particulier des niveaux d'éclairement à maintenir [4,5] ;
- la norme NF EN 17037 traite de l'éclairage naturel dans les bâtiments, en mettant l'accent sur le confort des occupants [6].

Le *Tableau 1* établit la correspondance entre chaque critère technique d'éclairage et les textes de référence.

Le Code du travail

Le Code du travail constitue le socle réglementaire en matière d'éclairage des lieux de travail. Il fixe des exigences générales visant à garantir

la sécurité et la santé des travailleurs. Il précise également que la mise en œuvre de ces dispositions relève de responsabilités distinctes selon les acteurs concernés :

- les articles R. 4213-1 à R. 4213-4 définissent la responsabilité du maître d'ouvrage. Il doit, lors de la conception des locaux, notamment prévoir des ouvertures vers l'extérieur pour favoriser l'éclairage naturel et la vue sur l'extérieur [1] ;
- les articles R. 4223-1 à R. 4223-12 relèvent des obligations de l'employeur. Ils rappellent que l'éclairage doit être adapté à l'activité exercée, et abordent plusieurs aspects techniques. Par exemple, l'article R. 4223-4 fixe des valeurs minimales d'éclairement en lux, à maintenir au niveau du plan de travail ou au sol, selon le type de local ou d'espace extérieur. L'article R. 4223-8 évoque également la nécessité d'un bon rendu des couleurs. Toutefois, ces indications restent générales et ne couvrent ni l'ensemble des situations de travail, ni les critères qualitatifs comme l'uniformité, l'éblouissement ou la température de couleur [2].

Ces articles traitent de l'éclairage général des lieux de travail. D'autres articles traitent de situations particulières, comme l'éclairage de sécurité (article R. 4227-14), l'éclairage des machines (article R. 4312-1), etc.

Des commentaires techniques sur ces articles ont été fournis dans la circulaire du 11 avril 1984. Les niveaux d'éclairement doivent par exemple être considérés comme des valeurs minimales à maintenir². Il reste cependant à compléter ces exigences réglementaires par les recommandations

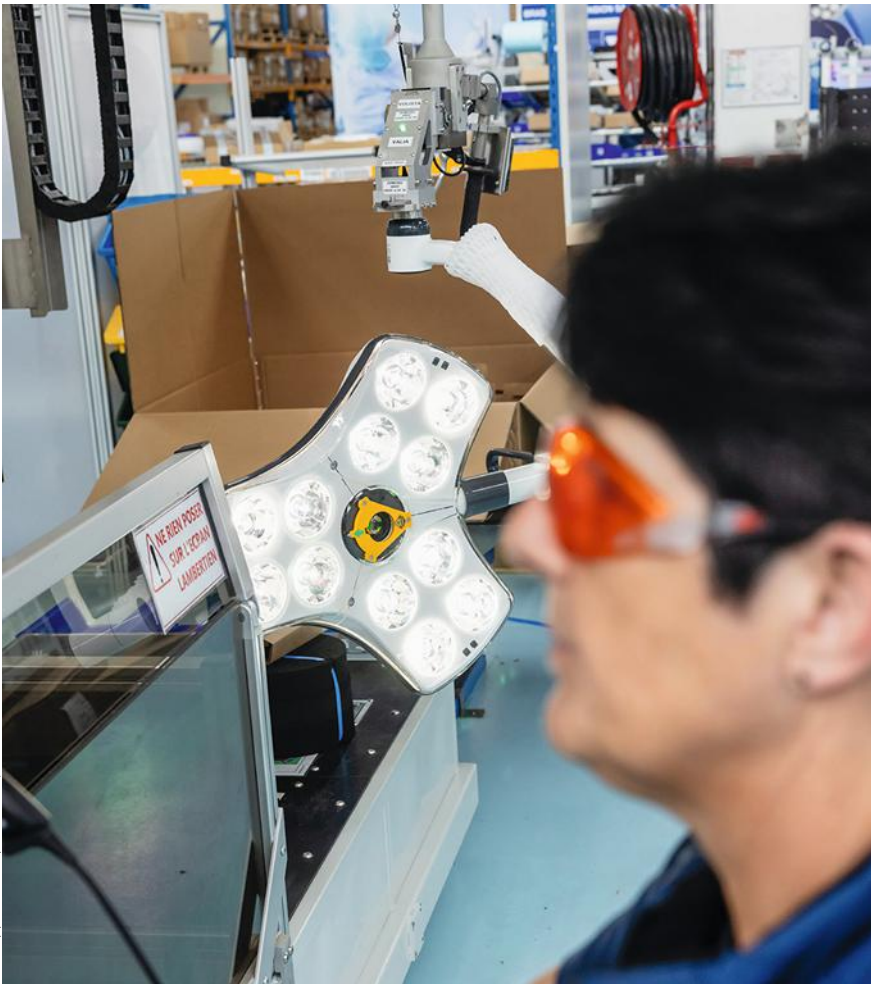
des normes, qui traduisent les objectifs à atteindre en critères précis, mesurables et directement exploitables sur le terrain.

La norme relative à l'ergonomie visuelle

La norme NF X 35-103 présente des principes ergonomiques pour concevoir l'éclairage des lieux de travail [3]. Elle ne se limite pas à des critères quantitatifs d'éclairage : elle prend en compte l'ensemble des conditions de perception visuelle, en s'appuyant sur la notion centrale de luminance. Elle insiste sur trois points fondamentaux : des niveaux de luminance adaptés aux tâches à réaliser, des contrastes de luminance suffisants entre les objets et leur environnement pour faciliter la discrimination des détails, et un équilibre des luminances dans le champ de vision pour éviter les éblouissements et la fatigue visuelle.

Pour les contrastes, la norme ne fixe pas de valeurs absolues mais recommande des rapports de luminance adaptés à la nature et à la précision de la tâche. Elle ne définit pas non plus de valeurs de luminance chiffrée et renvoie aux normes NF EN 12464-1 et NF EN 12464-2 pour les valeurs d'éclairage, en rappelant que la loi de Lambert³ peut être utilisée en première approximation [4,5]. Elle préconise néanmoins des rapports de luminance entre les différentes zones du champ visuel :

- la zone de tâche et son environnement immédiat ;
- les différentes zones de déplacement de l'opérateur ;



© Philippe Castano pour l'INRS / 2024

		CODE DU TRAVAIL												NORMES TECHNIQUES			
		OBLIGATIONS DU MAÎTRE D'OUVRAGE		OBLIGATIONS DE L'EMPLOYEUR													
Critères	Textes	R4213-2	R4213-3	R4223-1	R4223-2	R4223-3	R4223-4	R4223-5	R4223-6	R4223-7	R4223-8	R4223-9	R4223-10	R4223-11	12464-1 & -2	17037	X 35-103
Définition des zones à éclairer				✓											✓		
Pourquoi éclairer-on?					✓										✓		✓
Équilibre des luminances									✓		✓				✓		✓
Niveau d'éclairement							✓	✓							✓		
Protection contre le rayonnement solaire										✓							
Limitation de l'éblouissement											✓				✓	✓	✓
Rendu des couleurs											✓				✓		✓
Fluctuation de la lumière											✓				✓		
Confort thermique												✓					
Accessibilité des organes de commande													✓				
Facilité de l'entretien de l'installation														✓			
Utilisation de la lumière naturelle		✓				✓										✓	
Vue sur l'extérieur			✓													✓	

↑ TABLEAU 1 Correspondance entre critère d'éclairage et document réglementaire ou normatif.



N° RÉF.	TYPE D'AIRE DE LA TÂCHE /ZONE D'ACTIVITÉ	E _m (lx)		U ₀	R _a	R _{UGL}	E _{m,z} (lx)	E _{m,mur} (lx)	E _{m,plafond} (lx)	EXIGENCES SPÉCIFIQUES (les références sont internes à la norme)
		EXIGÉ a)	MODIFIÉ b)				U ₀ ≥ 0,10			
34.1	Classement, reprographie, etc.	300	500	0,40	80	19	100	100	75	–
34.2	Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Pour le travail sur écran, cf. 5.9. Pour la luminosité de la pièce, cf. 6.7 et annexe B. Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, cf. 6.2.4. Pour les petites cellules de bureaux, l'exigence relative au mur s'applique au mur de face. Pour les autres murs, une exigence inférieure de 75 lx minimum pourrait être acceptée.
34.3	Dessin industriel	750	1 500	0,70	80	16	150	150	100	Pour le travail sur écran, cf. 5.9. Pour la luminosité de la pièce, cf. 6.7.
34.4	Postes de travail de conception assistée par ordinateur	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Pour le travail sur écran, cf. 5.9.
34.5.1	Salles de conférence et de réunion	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, cf. 6.2.4.
34.5.2	Table de conférence	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, cf. 6.2.4.
34.6	Réception	300	750	0,60	80	22	100	100	75	Si le bureau de réception comprend des tâches régulières sur le poste de travail, il convient de les éclairer en conséquence.
34.7	Archives	200	300	0,40	80	25	75	75	50	–

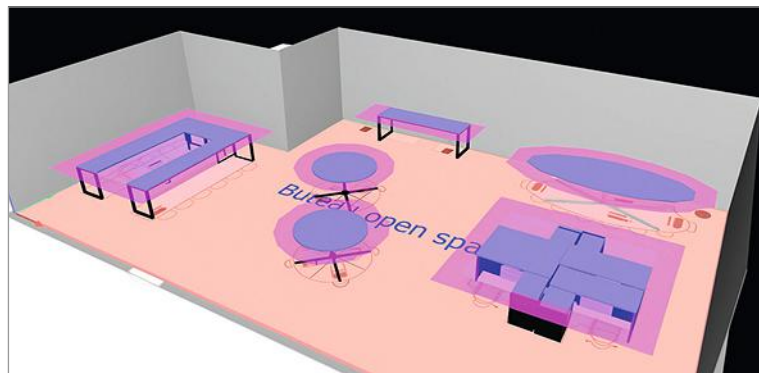
a) Exigé : valeur minimale.

b) Modifié : prend en compte des caractéristiques communes propres au contexte (difficulté, détail, capacités visuelles du salarié, etc.).

↑ **TABLEAU 2** Tableau (extrait : n° 34 de la norme NF EN 12464-1) listant les exigences minimales pour les activités de bureau* [4].

Les colonnes bleues indiquent l'éclairement moyen à maintenir garantissant une bonne visibilité, tandis que les colonnes vertes correspondent aux valeurs recommandées pour un confort visuel optimal.

- les différentes parties de la zone de travail elle-même, en vision rapprochée.
- Ces rapports ont pour but de garantir un équilibre lumineux visant à limiter l'éblouissement et la fatigue visuelle.



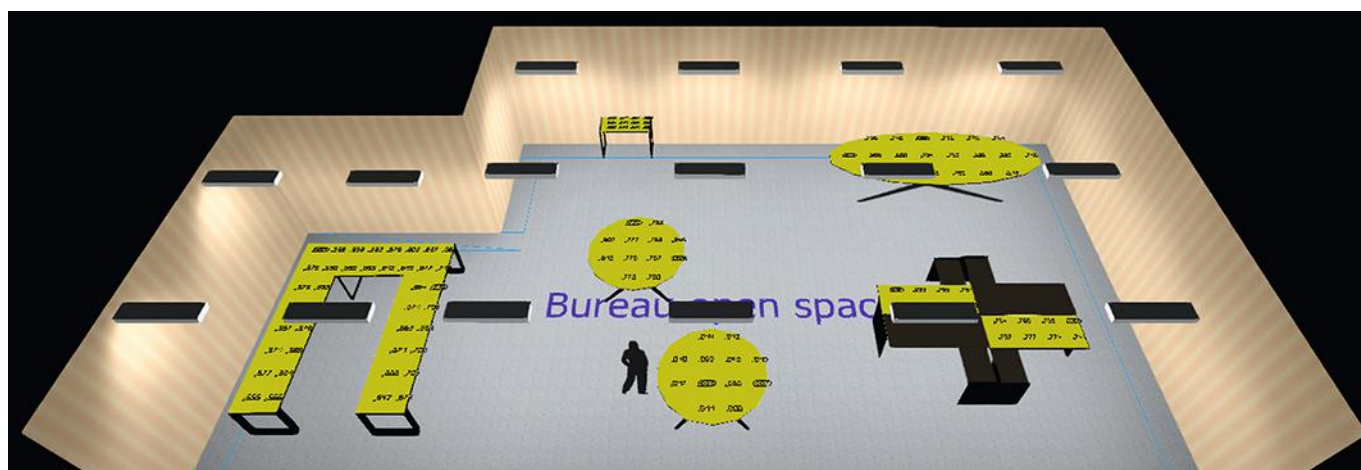
↑ **FIGURE 1** Définition des zones de travail selon la norme NF EN 12464-1.

La « zone d'activité » dans laquelle est effectué le travail principal est représentée en bleu. Il s'agit de la surface des bureaux. La zone adjacente est en rose, et la zone environnante représente le sol aux alentours en orange.

Un autre point essentiel concerne le choix des matériaux et des textures des plans de travail, à adapter en fonction de la luminance des objets à percevoir. Par exemple, une surface trop claire risque d'éblouir, tandis qu'un fond trop sombre peut masquer des objets peu lumineux. Enfin, la qualité de la lumière, en précisant des critères relatifs à la température de couleur T_{cp} et à l'indice de rendu des couleurs R_a (Cf. Article pp. 30-39). Ces paramètres influencent la capacité à distinguer les objets, à reconnaître les couleurs correctement, et contribuent de manière globale au confort visuel et à la qualité de l'environnement de travail.

Les normes relatives à l'éclairage artificiel des lieux de travail intérieurs et extérieurs

Les normes NF EN 12464-1 et -2 définissent les exigences quantitatives (niveaux d'éclairement) et qualitatives (équilibre des luminances dans le champ de vision, qualité de la lumière) nécessaires à l'installation d'éclairage pour que celle-ci adapte la tâche de l'opérateur et son environnement à



ses capacités visuelles [4,5]. Ces exigences sont regroupées sous forme de tableaux (Cf. exemple dans le Tableau 2) par type d'activité. La quantité de lumière est exprimée en éclairage moyen à maintenir. Le confort visuel dépend quant à lui de l'uniformité de l'éclairage⁴, de la qualité de la lumière, de la limitation des éblouissements et de la capacité à percevoir facilement les volumes dans l'environnement.

Différenciation des zones visuelles : activité, environnement immédiat et fond

La norme NF EN 12464-1 distingue trois types de zones visuelles, chacune soumise à des exigences spécifiques en matière d'éclairage (Cf. Figure 1) :

- la zone d'activité : endroit précis où s'effectue la tâche principale. C'est dans cette zone que l'éclairage moyen à maintenir doit atteindre la valeur recommandée pour l'activité concernée (Cf. Tableau 2, colonne bleue) ;
- la zone environnante immédiate : adjacente à la zone d'activité, elle est située à la même hauteur et doit assurer une transition visuelle sans rupture brutale de contraste ;
- la zone de fond : située au niveau du sol ou à proximité, elle représente l'arrière-plan du champ de vision.

L'éclairage des différentes zones est hiérarchisé : celui de la zone environnante est défini en fonction de la zone d'activité. Celui de la zone de fond est à son tour déterminé en proportion de la zone environnante. *In fine*, cette hiérarchie garantit une progression confortable des luminances dans le champ de vision, essentielle au confort visuel et à la réduction de la fatigue oculaire.

Uniformité de l'éclairage

Pour garantir une répartition homogène de la luminance sur la zone d'activité, et ainsi assurer une bonne visibilité sans contraste excessif, la norme utilise la notion d'uniformité d'éclairage

U_0 (Cf. Tableau 2). Cette grandeur correspond au rapport entre l'éclairage minimal E_{mini} et l'éclairage moyen E_{moyen} mesurés sur la zone de travail suivant un maillage adapté à ses dimensions (Cf. Figure 2) :

$$U_0 = \frac{E_{\text{mini}}}{E_{\text{moyen}}}$$

Une valeur élevée de U_0 indique une répartition homogène de la lumière sur la surface.

Qualité de la lumière

→ Température de couleur et indice de rendu des couleurs

Les exigences minimales concernant la température de couleur T_{cp} et l'indice de rendu des couleurs R_a (Cf. Article pp. 30-39) sont spécifiées dans les tableaux qui regroupent les objectifs photométriques propres à chaque activité. Une colonne

↑ FIGURE 2
Exemple de maillage utilisé pour calculer l'uniformité de l'éclairage. Les points sont répartis sur les zones d'activité, les zones environnantes, les murs et le plafond, selon un pas adapté aux dimensions de chaque zone. L'éclairage est mesuré en chaque point, puis la valeur minimale est rapportée à la valeur moyenne afin d'obtenir l'uniformité U_0 (logiciel utilisé : Dialux [6]).



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS / 2025

N° RÉF.	TYPE D'AIRE DE LA TÂCHE/ZONE D'ACTIVITÉ	E _M (lx)		U ₀	R _a	R _{UGL}	E _{m,x} (lx)	E _{m,z} (lx)	E _{m,plafond} (lx)	EXIGENCES SPÉCIFIQUES
		EXIGÉ a)	MODIFIÉ b)				U ₀ ≥ 0,10			
29.1	Coupage, dorure, impression en relief, gravure des clichés, travail au marbre et sur plaque, machines à imprimer, fabrication de matrices	500	750	0,60	80	19	150	150	75	–
29.2	Triage du papier et impression à main	500	750	0,60	80	19	150	150	75	–
29.3	Composition typographique, retouche, lithographie	1000	1500	0,70	80	19	150	150	100	–
29.4	Contrôle des couleurs en polychromie	1500	2000	0,70	90	16	150	150	100	4 000 K ≤ T _{cp} ≤ 6 500 K
29.5	Gravure sur acier et sur cuivre	2000	3000	0,70	80	16	150	150	100	Pour l'éclairage dirigé, cf. 5.6.4.

a) Exigé : valeur minimale

b) Modifié : Prend en compte des caractéristiques communes propres au contexte (difficulté, détail, capacités visuelles du salarié, etc.).

↑ TABLEAU 3
Extrait de la norme NF EN 12461-1 : objectifs photométriques relatifs aux activités industrielles des imprimeries. En plus de l'indice de rendu des couleurs, une exigence est donnée pour la température de couleur.

spécifique existe pour l'indice de rendu des couleurs, la température de couleur est quant à elle indiquée dans la colonne « Exigences spécifiques », si l'activité nécessite une valeur spécifique (Cf. Tableau 3).

→ Modulation temporelle de la lumière

La modulation temporelle de la lumière désigne une variation dans le temps du flux lumineux ou de sa composition spectrale. Elle peut être régulière (périodique, liée au courant d'alimentation) ou irrégulière (défaut d'alimentation, instabilité). Elle se distingue des évolutions lentes du flux ou de la chromaticité, qui sont dues au vieillissement ou à l'altération de la source, et ne sont pas considérées comme une modulation.

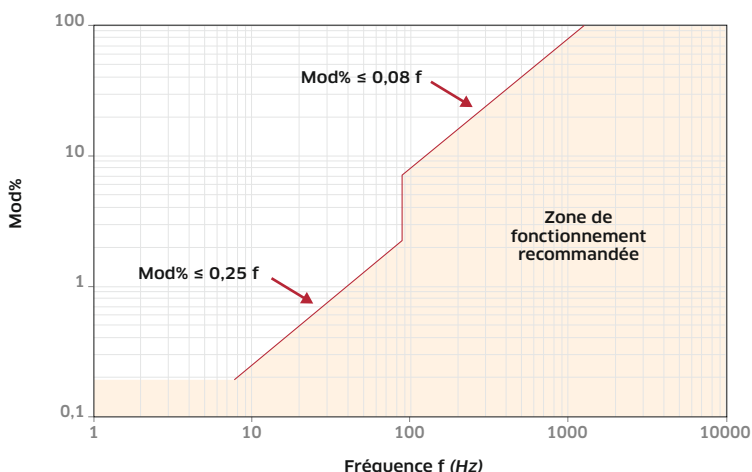
Lorsqu'elle est cyclique, la modulation se caractérise par sa fréquence f (Hz) et son amplitude relative, mesurée par le pourcentage de modulation : $\text{Mod}\% = (A - B) / (A + B)$, où A et B représentent respectivement les valeurs maximale et minimale du

flux lumineux. Ses effets dépendent du contexte :

- scintillement : lorsque l'observateur et l'environnement sont immobiles. Il peut provoquer fatigue visuelle, maux de tête et baisse de concentration, notamment pour les tâches visuelles exigeantes (travail prolongé sur écran, lecture fine, contrôle qualité).
- effet stroboscopique : lorsque des objets en mouvement paraissent immobiles ou ralentis. Ce phénomène peut induire des erreurs de perception et accroître le risque d'accidents dans les environnements industriels.

La norme NF EN 12464-1 stipule que les installations doivent éviter ces effets négatifs, sans fixer toutefois de valeurs chiffrées. En complément, la norme américaine IEEE 1789-2015 (Cf. Figure 3) propose des limites de Mod% en fonction de la fréquence [7,8]. Ainsi, plus la fréquence est basse, plus la modulation doit rester faible pour éviter tout effet visuel indésirable.

↓ FIGURE 3
Valeurs maximales du pourcentage de modulation Mod% en fonction de sa fréquence à ne pas dépasser pour éviter tout effet lié au scintillement.

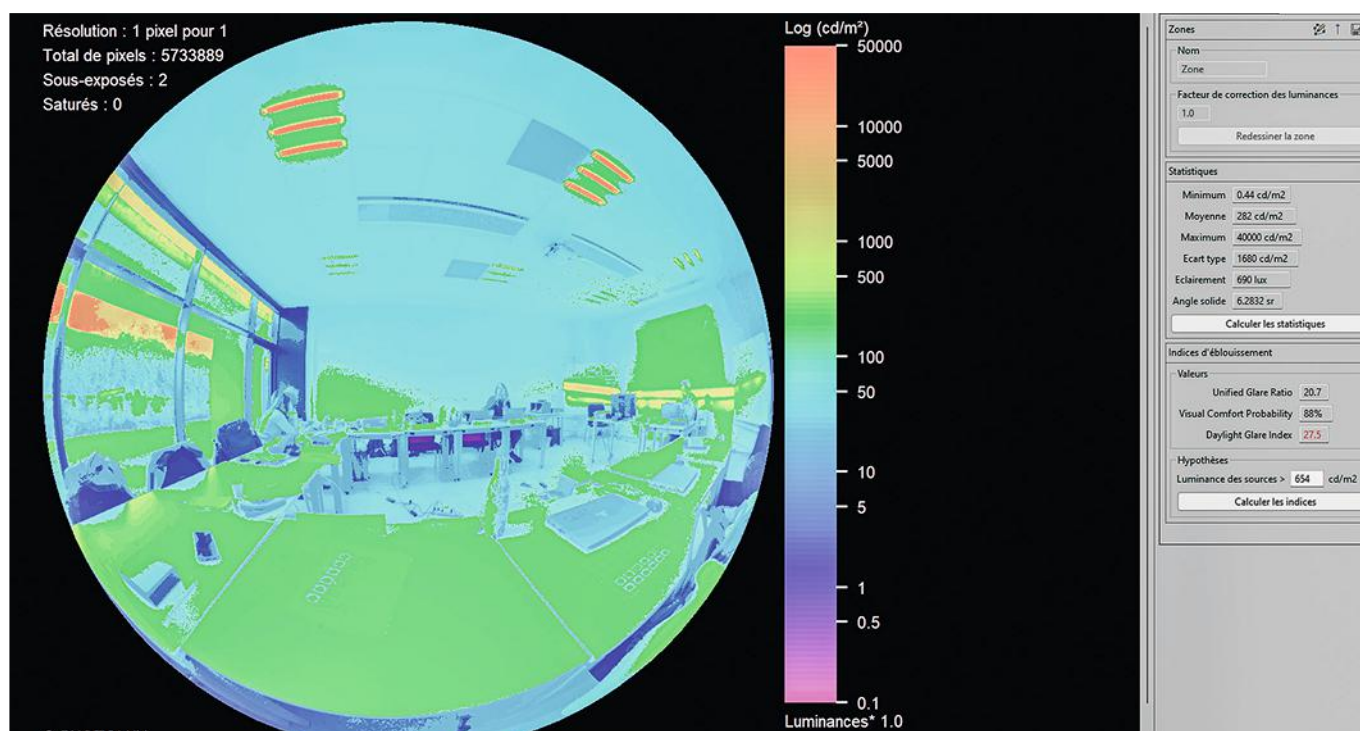


Limitation de l'éblouissement

L'éblouissement se produit lorsqu'une ou plusieurs zones lumineuses créent de trop forts contrastes dans le champ de vision du salarié. Elles perturbent la vision, provoquent une gêne visuelle, accentuent la fatigue et nuisent à la concentration.

Pour limiter ce phénomène, les normes NF EN 12464-1 (pour l'intérieur) et NF EN 12464-2 (pour l'extérieur) définissent un seuil à ne pas dépasser : le taux d'éblouissement limite est noté R_{UGL} ou R_{UG} selon la norme concernée. Ce seuil dépend de l'activité exercée.

Plus les valeurs de ces deux indices sont élevées, plus l'éblouissement ressenti sera important. Leur expression tient notamment compte des écarts de luminance entre les luminaires et leur environne-



↑ FIGURE 4 Mesure de la luminance d'une salle de réunion réalisée avec un « UGR-mètre » équipé d'un objectif très grand angle (« fisheye »). Le résultat est présenté sous forme d'une image en fausses couleurs : dans ce cas, les luminances varient de 1 cd/m² à 50 000 cd/m² selon l'échelle visible à droite. Le logiciel analyse la luminance de chaque luminaire ainsi que la luminance moyenne du fond, puis calcule l'indice d'éblouissement R_{UGL} . Ordres de grandeur : $R_{UGL} < 16$: aucune gêne ; $19 < R_{UGL} < 25$: gêne modérée ; $R_{UGL} > 28$: éblouissement fort.

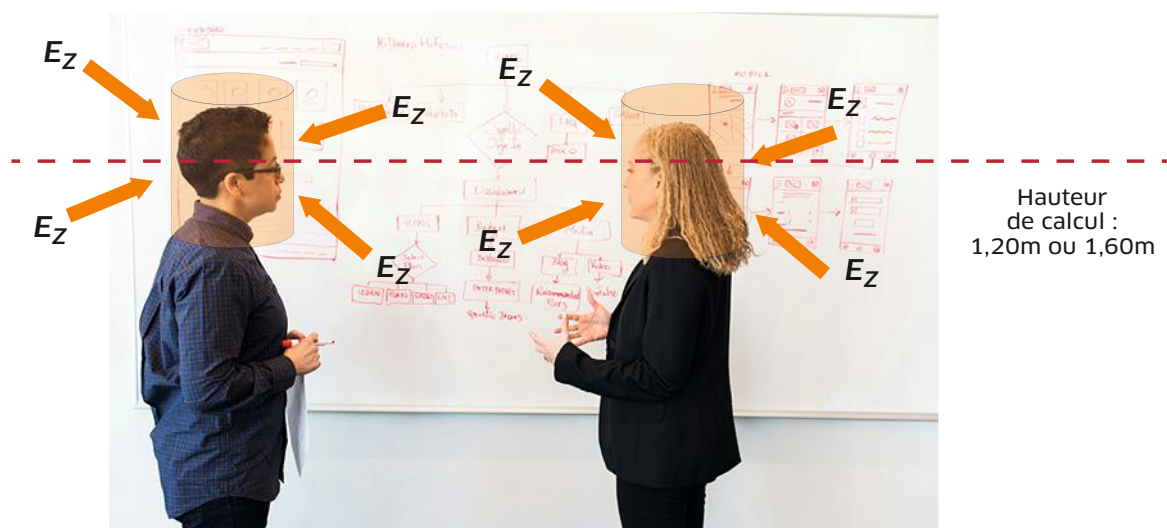
ment. Plus ceux-ci sont importants, plus l'inconfort visuel augmente.

Ces indices peuvent être estimés à l'aide de logiciels spécialisés, ou mesurés à l'aide d'appareils. Il s'agit de caméras ou appareils photo étalonnés en luminance. Une fois la photo prise depuis le poste de travail, un logiciel de post-traitement permet d'évaluer le niveau d'éblouissement réel dans la direction du regard du salarié (Cf. Figure 4).

Éclairage de l'environnement des postes de travail

Dans les espaces intérieurs, trois critères supplémentaires doivent être pris en compte pour garantir un bon équilibre des luminances et faciliter la perception des volumes et des obstacles.

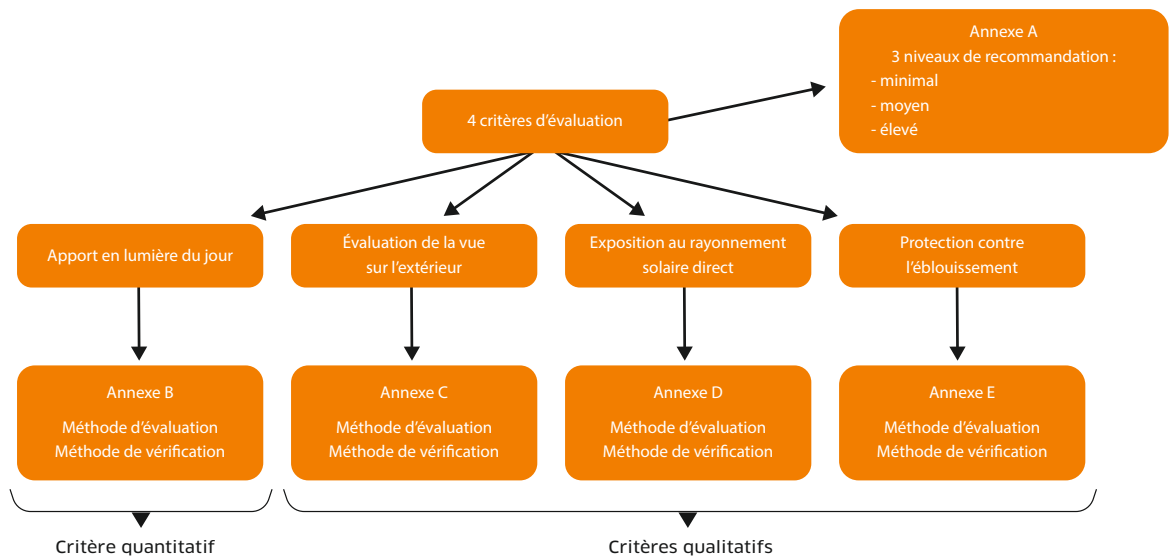
Les deux premiers concernent l'équilibre des luminances dans le champ de vision : il s'agit d'assurer un niveau d'éclairement suffisant sur les murs ($E_{m,mur}$) et le plafond ($E_{m,plafond}$). Ces valeurs sont spé-



← FIGURE 5 Le calcul des éclairagements cylindriques est opéré à 1,20 m ou 1,60 m de hauteur, selon qu'une personne est assise ou debout. Ce type d'éclairage permet une meilleure perception des volumes.



FIGURE 6 →
Représentation
schématique des
quatre critères
d'évaluation pour
la quantité et
la qualité de la
lumière naturelle
dans un local,
définis par
la norme
NF EN 17037.



cifiées dans la norme NF EN 12464-1 selon l'activité exercée.

Le troisième critère est destiné à améliorer la perception des volumes dans l'espace. Il s'agit de l'éclairement cylindrique moyen ($E_{m,z}$), évalué autour d'un point donné. Un éclairement cylindrique correct implique que la lumière provienne de plusieurs directions. Cela améliore la perception des volumes et des reliefs, notamment pour la reconnaissance des visages (Cf. Figure 5).

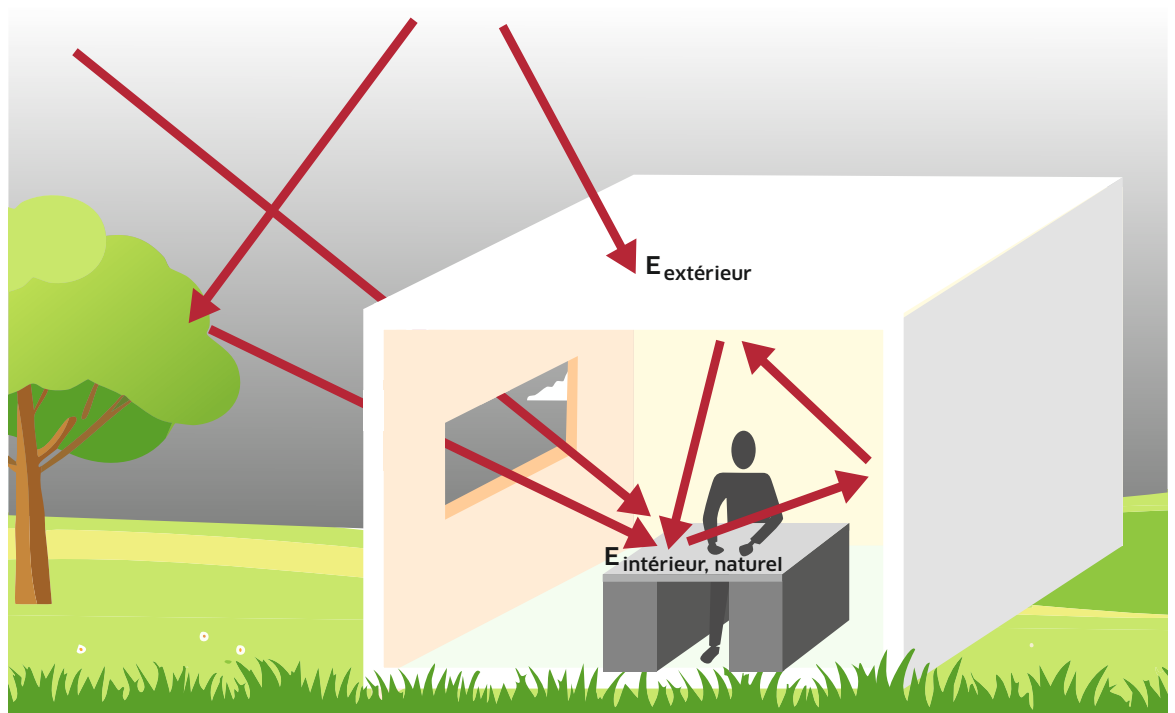
La norme relative à l'éclairage naturel dans les locaux de travail

Comme pour l'éclairage artificiel, le Code du travail énonce uniquement des principes généraux concer-

nant l'éclairage naturel : les bâtiments doivent être conçus de manière à permettre l'usage de l'éclairage naturel pour l'éclairage général ; ils disposent autant que possible d'une lumière naturelle suffisante ; des ouvertures doivent être présentes à hauteur des yeux des occupants.

La norme NF EN 17037 vient compléter ces dispositions [6]. Elle s'applique à tous les espaces pouvant être occupés de manière régulière et prolongée, à l'exception de ceux où l'éclairage naturel serait inadapté à la nature des activités exercées. Elle propose quatre indicateurs (Cf. Article 3 pp. 49-58) : l'apport en lumière du jour, l'évaluation de la vue sur l'extérieur, l'exposition au rayonnement solaire direct et la protection contre l'éblouissement.

FIGURE 7 →
L'éclairage
naturel en un
point intérieur
résulte de la
lumière directe
du ciel,
de la lumière
réfléchie par
l'environnement
et de la lumière
réfléchie par
l'intérieur de la
pièce. L'éclairement
extérieur n'est dû
qu'à la lumière
directe du ciel,
sans réflexions sur
l'environnement.





© Guillaume J. Plisson pour l'INRS / 2024

Ces indicateurs permettent d'évaluer le confort visuel des salariés vis-à-vis de l'éclairage naturel. Chaque indicateur est associé à une méthode d'évaluation et de vérification (Cf. Figure 6). Trois niveaux de performance sont proposés : minimal, moyen et élevé. L'atteinte du niveau minimal est recommandée pour tous les lieux de travail.

Apport en lumière du jour

Selon le niveau de performance visé, la norme préconise que l'éclairage naturel atteigne 300 lux, 500 lux ou 750 lux sur une portion définie de la surface utile, à une hauteur de 85 cm du sol, représentative d'un poste de travail assis. Deux méthodes d'évaluation sont proposées. Toutes deux nécessitent l'utilisation d'un logiciel de simulation.

→ Méthode n° 1 : calcul du facteur de lumière du jour

Le facteur de lumière du jour D_T est défini en un point du local comme le rapport entre l'éclairage naturel en ce point et l'éclairage extérieur en site dégagé (Cf. Figure 7) :

$$D_T = \frac{E_{\text{intérieur, naturel}}}{E_{\text{extérieur}}}$$

Cette méthode de calcul se fait sous l'hypothèse d'un ciel couvert normalisé, sans apport de lumière

directe du soleil. Elle ne prend en compte ni l'orientation des ouvertures, ni le climat lumineux local. Elle ne reflète pas les conditions réelles, mais permet de comparer plusieurs configurations d'un même espace (taille et position des ouvertures, couleurs des parois, etc.).

→ Méthode n° 2 : calcul des éclairagements sur un plan de référence

Cette méthode repose sur des valeurs d'éclairage atteint sur le plan de référence, en tenant compte de la météo locale *via* un fichier climatique horaire.

Évaluation de la vue sur l'extérieur

Une vue est jugée de qualité si elle comprend trois composantes : le ciel, le paysage et le sol. Pour chaque niveau de recommandation, la norme précise des seuils à respecter pour l'angle de vision horizontal offert, la distance de visibilité vers l'extérieur et le nombre de composantes visibles (cf. Figure 8).

Exposition au rayonnement solaire direct

Une exposition modérée au soleil direct est considérée comme bénéfique au bien-être des occupants. Cet aspect, même s'il est important, sort du cadre de l'étude de l'éclairage.



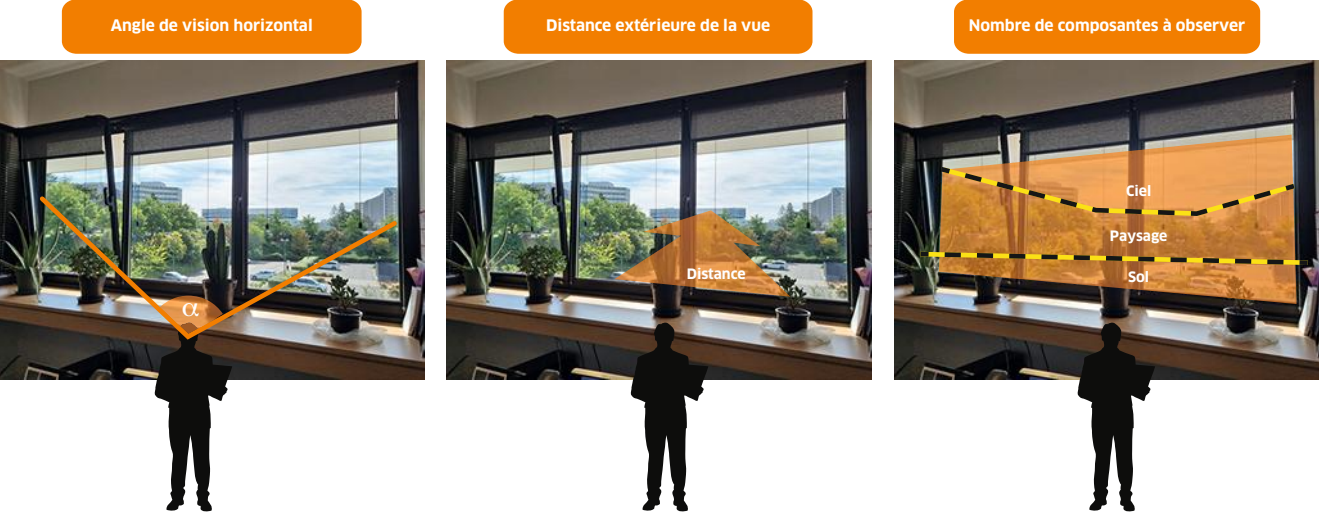


FIGURE 8 ➤ Critères de qualité de la vue sur l'extérieur définis par la norme NF EN 17037.

PARAMÈTRES*			
Niveau de recommandation pour la vue sur l'extérieur	Angle de vision horizontal	Distance extérieure de la vue	Nombre de composantes à observer depuis au moins 75 % de la surface utile: • ciel • paysage (urbain et/ou naturel) • sol
Minimal	$\geq 14^\circ$	$\geq 6 \text{ m}$	Au moins la composante de paysage est incluse
Moyen	$\geq 28^\circ$	$\geq 20 \text{ m}$	La composante de paysage et une composante supplémentaire sont incluses dans la même ouverture avec vue
Élevé	$\geq 54^\circ$	$\geq 50 \text{ m}$	Toutes les composantes sont incluses dans la même ouverture avec vue

* Pour un espace avec une profondeur de pièce supérieure à 4 m, il est recommandé que la somme correspondante des dimensions de la (des) ouverture(s) avec vue soit au moins égale à 1 m x 1,25 m (largeur x hauteur).

Protection contre l'éblouissement

La norme introduit l'indice DGP (de l'anglais *daylight glare probability* pour « probabilité d'éblouissement par la lumière du jour » ; Cf. Article pp. 49-58), qui quantifie la probabilité qu'un observateur ressente un éblouissement causé par la lumière naturelle. L'évaluation de la DGP est applicable à un espace comportant des ouvertures vitrées, verticales ou inclinées. Le calcul du DGP repose sur des rapports de luminance, de façon similaire à l'indice UGR utilisé pour l'éclairage artificiel, mais il intègre des paramètres propres à la lumière du jour (position et dimension des ouvertures, luminance des parois, éclairage ambiant). De par sa complexité, il nécessite le recours à un spécialiste. ●

- 1. Cette partie du Code du travail est en cours de « transfert » dans le code de la construction. Ce transfert concerne toutes les dispositions du Code du travail destinées aux maîtres d'ouvrage.
- 2. L'éclairage à maintenir est obtenu après une certaine durée d'utilisation, et prend en compte la salissure du matériel, de l'environnement qui limite la réflexion de la lumière, et l'altération des sources liée à leur durée d'utilisation.
- 3. Cette loi permet d'évaluer simplement la luminance d'une surface en fonction de son éclairage ; Cf. Article p. 30.
- 4. Uniformité d'éclairage U_0 : rapport de l'éclairage minimal sur l'éclairage moyen, cette notion est détaillée dans la suite de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ARTICLES R. 4213-1 À R. 4213-4 du Code du travail. Accessibles sur : www.legifrance.gouv.fr

[2] ARTICLES R. 4223-1 À R. 4223-12 du Code du travail. Accessibles sur : www.legifrance.gouv.fr

[3] NORME NF X 35-103 – Ergonomie. Principes d'ergonomie applicables à l'éclairage des lieux de travail. Afnor, 2013. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).

[4] NORME NF EN 12464-1 – Lumière et éclairage. Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail intérieurs. Afnor, 2021. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).

[5] NORME NF EN 12464-2 – Lumière et éclairage. Éclairage des lieux de travail – Partie 2 : lieux de travail extérieurs. Afnor, 2024. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).

[6] NORME NF EN 17037 – Lumière naturelle dans les bâtiments. Afnor, 2021. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).

[7] IEEE 1789-2015 – Institute of Electrical and Electronics Engineers recommended practices for modulating current in high-brightness leds for mitigating health risks to viewers. IEEE, 2015.

[8] MILLER N.J., LEHMAN B. – Flicker: understanding the new IEEE recommended practice. US Department of energy, 2015. Accessible sur : https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/miller%2Blehman_flicker_lightfair2015.pdf

ÉCLAIRAGE NATUREL DANS LES LOCAUX PROFESSIONNELS

Cet article met en avant les caractéristiques de la lumière naturelle et de ses variations (qualité, puissance...) en rappelant les documents de référence, les façons de la capter et de la caractériser. Il met également l'accent sur plusieurs points de vigilance, comme les risques liés à la surchauffe, à l'éblouissement... Il revient aussi sur certains outils utilisés pour le dimensionnement des ouvertures lumineuses, en fonction notamment des activités exercées dans les locaux concernés.

BERNARD PAULE, ISCIA VOS
Estia,
Lausanne
(Suisse)

YANNICK SUTTER
École
nationale
supérieure
d'architecture
de Montpellier

La lumière naturelle, dont les variations offrent un éventail infini de nuances, est un élément clé de notre quotidien. Cette lumière gratuite offre par définition un rendu des couleurs parfait. Elle nous permet de percevoir les contours et les limites de notre environnement et d'apprécier la matérialité des objets qui le composent. L'alternance des périodes de jour et de nuit impacte la biologie humaine *via* les rythmes circadiens. Par conséquent, l'accès à la lumière naturelle est un facteur déterminant pour notre santé. Celle-ci doit cependant être maîtrisée à l'intérieur des bâtiments, afin de pouvoir accompagner hommes et femmes dans la réalisation des tâches correspondant à leur travail. Ceci suppose de considérer simultanément les aspects concernant le confort visuel et thermique ainsi que les demandes énergétiques associées aux besoins de lumière, de chaleur et de froid des bâtiments.

Documents de référence

L'éclairage naturel a fait l'objet de nombreuses recherches ayant donné lieu à de multiples publications [1-3]. La norme européenne NF EN 17037 fournit des recommandations pour optimiser l'éclairage naturel selon quatre critères d'évaluation [4] :

- la quantité de lumière disponible ;
- la vue extérieure ;
- l'exposition au soleil ;
- et la protection contre l'éblouissement.

Pour chacun de ces critères, cette norme édicte des recommandations indépendamment de l'affectation

des locaux et définit trois niveaux de performance : « minimal, moyen et élevé ». Chaque critère peut être validé selon une méthode simplifiée, ou une méthode avancée qui nécessite généralement des calculs plus détaillés. Cet article propose de passer en revue ces quatre thématiques, afin d'en faire ressortir les éléments clés, ainsi que des recommandations issues de retours d'expériences.

Quantité de lumière disponible

La performance visuelle, c'est-à-dire la capacité à distinguer et à traiter des informations, est liée au système visuel de l'observateur et à la quantité de lumière disponible. Plus le niveau de détail d'une tâche est élevé, plus l'apport de lumière doit être important. Ceci se traduit par les différents niveaux d'éclairement recommandés en fonction des activités [5]. Dans les locaux de travail, 300 lux à 750 lux sont généralement requis pour réaliser la plupart des activités professionnelles, tous types d'éclairage confondus.

Critères de la norme NF EN 17037

Le *Tableau 1* indique les valeurs d'éclairement en lumière naturelle recommandées par la norme pour les locaux équipés d'ouvertures en façade :

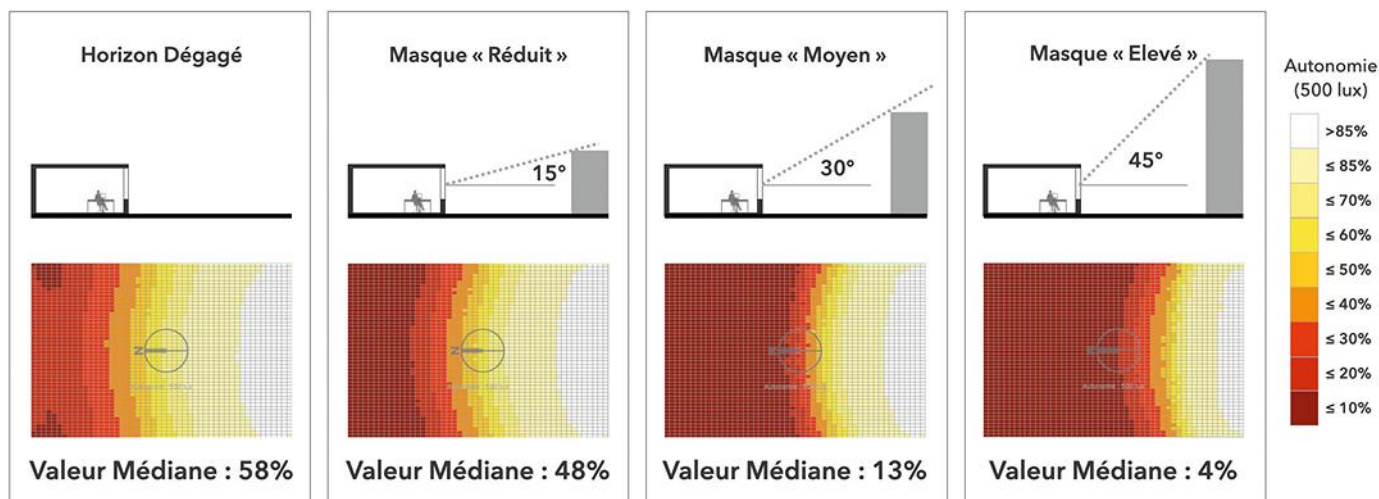
- pour « l'éclairement cible », l'objectif doit concerner 50 % de la surface du local ;
- pour « l'éclairement minimal cible », l'objectif porte sur 95 % de la surface du local.

Concrètement, le niveau moyen de l'éclairement cible suppose que 50 % de la surface du local bénéficie d'un éclairement de 500 lux pendant la moitié

NIVEAU DE RECOMMANDATION POUR L'ÉCLAIREMENT	ÉCLAIREMENT CIBLE	ÉCLAIREMENT MINIMAL CIBLE
Minimal	300 lux	100 lux
Moyen	500 lux	300 lux
Élevé	750 lux	500 lux

↑ **TABLEAU 1** Niveaux d'éclairement recommandés par la norme NF EN 17037 pour les locaux munis d'ouvertures en façade.





↑ FIGURE 1 Influence de la hauteur angulaire des masques extérieurs (obstacles extérieurs limitant la vue du ciel) sur l'autonomie en éclairage naturel. (Simulations : DIAL+, caractéristiques géométriques du local : L = 6 m, l = 4 m, h = 2,70 m). Une valeur médiane de 58 % indique que 58 % de la surface du local bénéficie d'un éclairement ≥ 500 lux pendant 50 % de la période considérée (de 7 h à 18 h).

des heures de jour. Ceci fait référence à la notion « d'autonomie en éclairage naturel », c'est-à-dire au temps pendant lequel l'éclairement intérieur est atteint grâce à la lumière naturelle seule. Si la valeur médiane de l'autonomie est supérieure à 50 % pour 500 lux requis, le niveau « moyen » est atteint. Dans la pratique, ces recommandations sont ambitieuses et le niveau « minimal » assurera un éclairage naturel raisonnable [6]. La méthode simplifiée de vérification mobilise le concept de facteur de lumière du jour (Cf. Article 2 pp. 40-48) et la méthode avancée nécessite le recours aux simulations dynamiques utilisant des données climatiques.

Influence de l'environnement extérieur

La quantité de lumière disponible à l'intérieur des locaux dépend fortement de l'environnement du bâtiment. La Figure 1 permet de comparer les valeurs d'autonomie en lumière diffuse en fonction de la hauteur angulaire des obstructions extérieures. Dans cet exemple, la valeur cible est de 500 lux sur

la période comprise entre 7 h et 18 h, avec les données climatiques de la ville de Bourges (coordonnées géographiques = 47° N, 2,4° E).

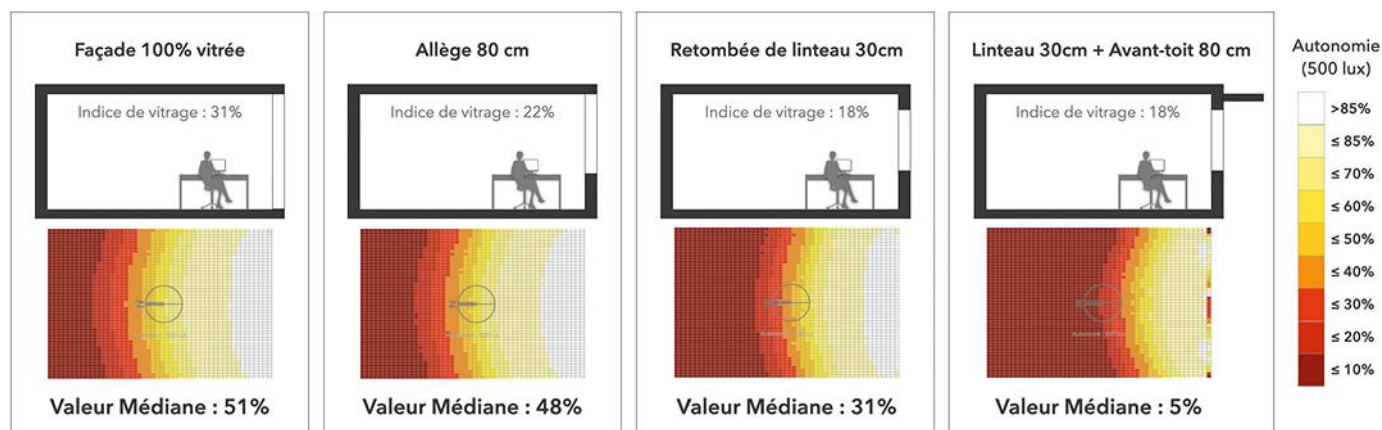
Les résultats affichés correspondent aux valeurs d'autonomie sur un plan de référence situé à 80 cm du sol. Ceci permet de visualiser pour chaque zone du local le pourcentage de temps pendant lequel l'éclairement requis est atteint.

Ceci montre qu'en environnement urbain dense, il est difficile d'éclairer suffisamment la partie arrière des locaux situés dans les étages inférieurs à l'aide de lumière naturelle.

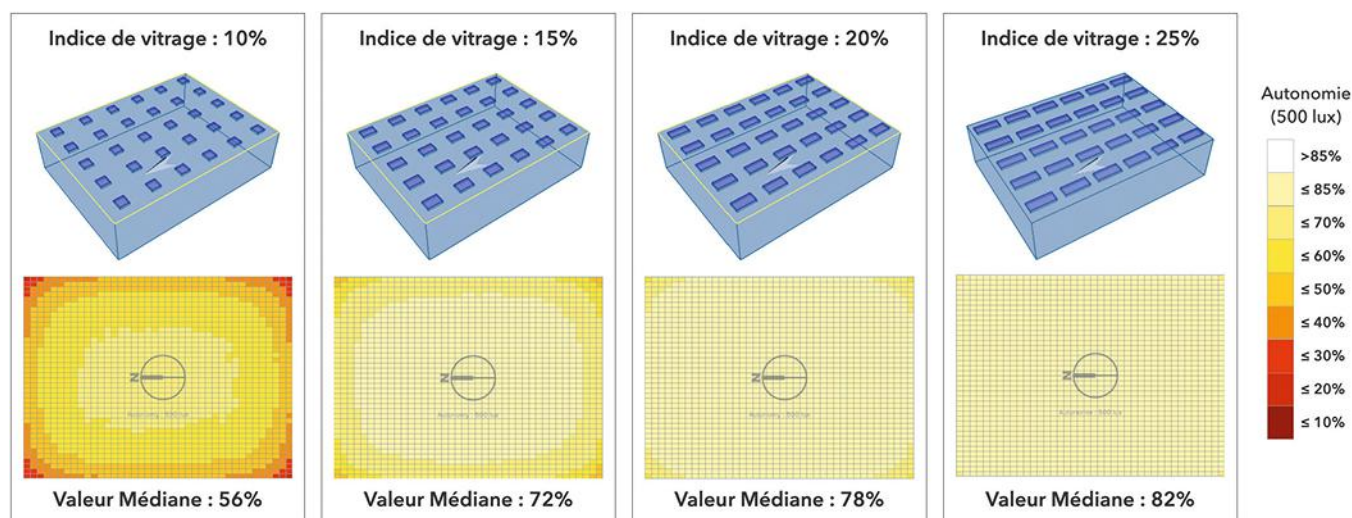
Influence de la configuration des locaux et des ouvertures

→ Ouvertures en façade

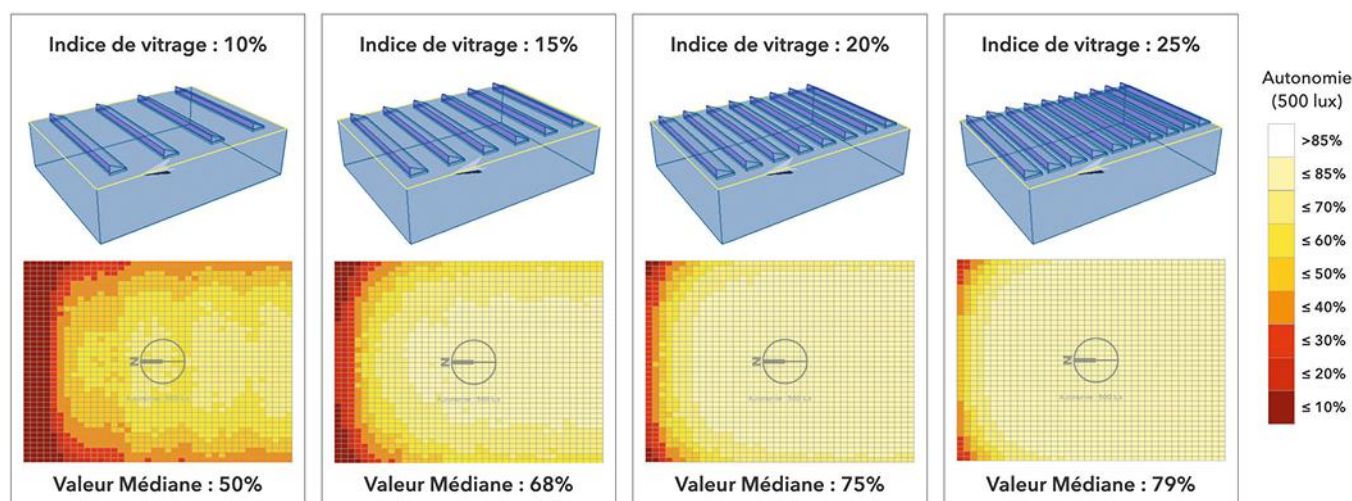
La Figure 2 permet de comparer les performances associées à quatre typologies d'ouvertures. La première configuration correspond à une façade entièrement vitrée. La deuxième est équipée d'un bandeau horizontal vitré, avec une allège de 80 cm.



↑ FIGURE 2 Influence de la configuration de la façade sur l'autonomie en éclairage naturel (500 lux) (vue en plan de l'autonomie en lumière du jour pour un éclairement de 500 lux. L = 6 m, l = 4 m, h = 2,70 m, masque d'horizon : 15°, simulations : DIAL+).



↑ FIGURE 3 Influence de l'indice de vitrage dans le cas d'ouvertures zénithales horizontales (vue en plan de l'autonomie en lumière du jour pour un éclairement de 500 lux / vitrages diffusants ; $T_v = 0,55$ / $L = 40$ m, $l = 30$ m, $h = 10$ m, masque d'horizon : 15° , simulations : DIAL+).



↑ FIGURE 4 Influence de l'indice de vitrage dans le cas de sheds verticaux orientés au nord (vue en plan de l'autonomie en lumière du jour pour un éclairement de 500 lux / vitrages clairs ; $T_v = 0,80$ / $L = 40$ m, $l = 30$ m, $h = 10$ m, masque d'horizon : 15° , simulations : DIAL+).

La troisième intègre une retombée de linteau de 30 cm. Enfin, la quatrième est équipée d'un débord extérieur de 80 cm. Les simulations sont réalisées avec un masque d'horizon de 15° (Cf. cas n°2 de la Figure 1).

La comparaison des deux premiers cas montre que la partie basse des vitrages a une influence limitée sur l'éclairage du plan de travail. L'observation des deux derniers cas montre que la présence d'éléments opaques en partie haute des ouvertures (retombée de linteau et avant-toit) induit une baisse significative des apports lumineux.

Les locaux industriels ont parfois la chance de pouvoir accéder directement au ciel par l'intermédiaire d'ouvertures en toiture ; ces ouvertures sont dites zénithales.

→ Ouvertures zénithales horizontales

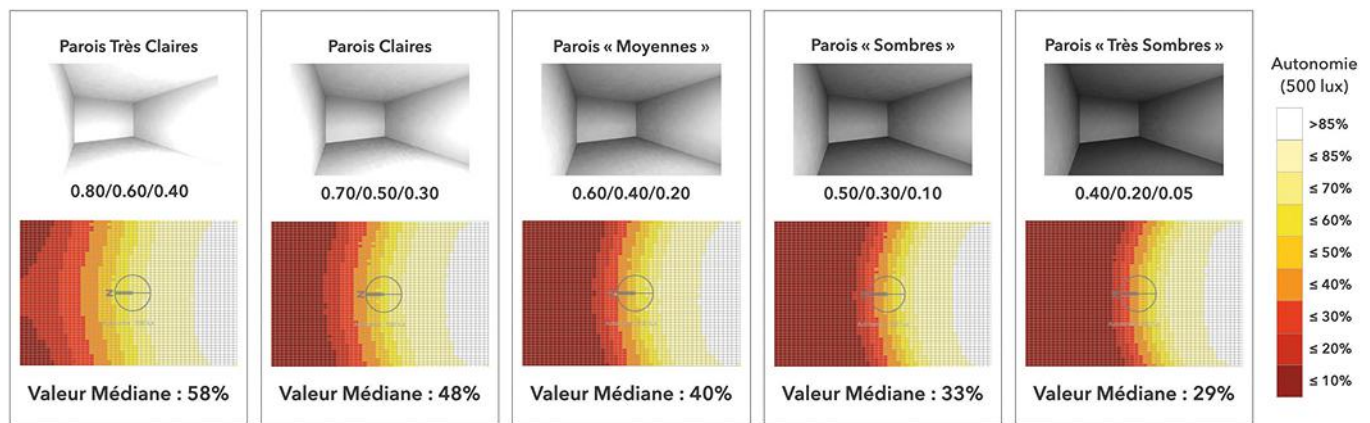
La Figure 3 montre que dans le cas d'ouvertures

zénithales horizontales, un indice d'ouverture de 10 % (la surface vitrée représente 10 % de la surface du local) permet à la valeur médiane de l'autonomie de dépasser 50 % pour un éclairement requis de 500 lux. L'absence de masques liés à l'environnement explique l'efficacité de ce type d'ouvertures. Pour éviter le risque d'éblouissement lié aux pénétrations solaires directes, il est recommandé d'utiliser des vitrages diffusants (opaques) qui induisent une réduction du facteur de transmission lumineuse T_v .

→ Ouvertures zénithales verticales (sheds)

L'architecture industrielle comporte de nombreux exemples de bâtiments équipés de sheds dont les vitrages verticaux sont orientés au nord. La Figure 4 montre que si cette option présente des performances légèrement plus réduites, le potentiel d'éclairage naturel reste très élevé et cette variante permet aux usagers d'avoir une vision directe du ciel grâce





↑ FIGURE 5 Influence de la clarté des parois intérieures sur la disponibilité de lumière naturelle (vue en plan).
Les valeurs mentionnées en dessous des images correspondent aux facteurs de réflexion du plafond, des murs et du sol (ex. : 0.80/0.60/0.40 : indique que le plafond, les murs et le sol réfléchissent respectivement 80 %, 60 % et 40 % de la lumière qu'ils reçoivent) (images : Daylight Visualizer/simulations : DIAL+).

à l'utilisation de verres transparents. Par ailleurs, on note que la surface arrière des sheds offre une exposition très favorable à la mise en place de panneaux solaires photovoltaïques.

Le guide de l'éclairage naturel zénithal proposé par le GIF-Lumière (Groupement des fabricants et fabricants-installateurs de matériel coupe-feu et d'évacuation des fumées) est une ressource de référence pour la conception des espaces mobilisant les prises de jour en toiture [7].

→ Clarté des parois intérieures

La Figure 5 montre que la clarté des parois intérieures a une forte influence sur la disponibilité de lumière à l'arrière des locaux. Sauf exigence particulière liée à un usage spécifique, il est donc fortement recommandé de privilégier les parois claires.

Retours d'expérience et bonnes pratiques concernant la quantité de lumière

→ Caractéristiques des ouvertures

- La partie haute des ouvertures en façade est déterminante pour contribuer à l'éclairage des portions de l'espace éloignées des façades. Il est donc primordial de limiter au minimum les retombées de linteau.
- À l'opposé, les apports de lumière en provenance de la partie basse des façades (allège) ne contribuent que faiblement à l'éclairage du plan de travail, tout en augmentant les échanges thermiques.
- Pour les ouvertures en façade, un indice de vitrage (surface de verre rapportée à la surface du local) proche de 20 % est souhaitable.
- Pour les ouvertures en toiture, il est recommandé dans la plupart des cas de limiter l'indice de vitrage à 15 % afin de réduire les risques de surchauffe. En effet, les toitures, de par leur orientation horizontale, reçoivent beaucoup plus de rayonnement solaire direct en été, lorsque le soleil est haut. L'emploi de matériaux translucides peut également limiter l'éblouissement direct dans le cas des ouvertures horizontales.

Caractéristiques des parois

- La clarté des parois intérieures influence de façon très importante le potentiel d'éclairage naturel des parties situées à l'arrière des locaux.
- Le plafond, notamment, constitue une sorte de ciel intérieur, il est donc recommandé de le traiter avec la couleur la plus claire possible (un plafond sombre donne l'impression de réduire la hauteur du local et ne permet pas de mettre en œuvre un éclairage artificiel indirect).
- Cette recommandation est aussi valable pour les parois verticales qui, lorsqu'elles sont de teinte sombre, peuvent donner le sentiment de restreindre la taille des locaux.
- Le sol est la première surface sur laquelle la lumière naturelle se réfléchit. Sa couleur et sa clarté présentent une influence forte sur l'ambiance lumineuse d'un espace.

→ Position des postes de travail

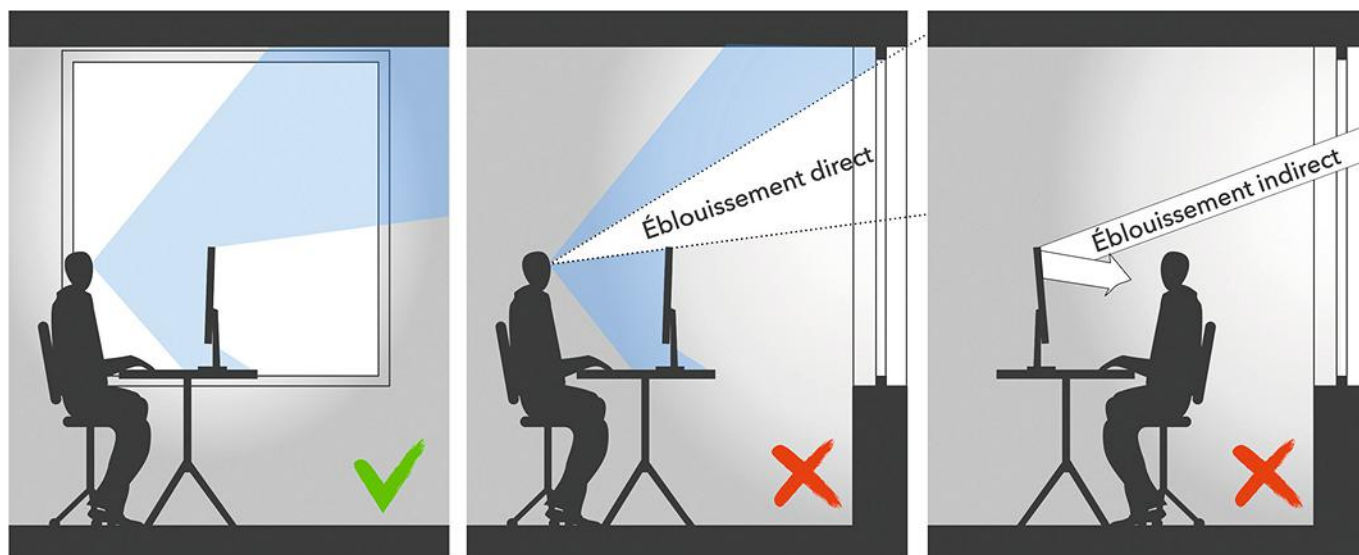
- Pour le travail sur ordinateur, les écrans doivent être positionnés perpendiculairement au plan des ouvertures de façon à limiter les risques d'éblouissement direct (présence du ciel dans l'axe du regard) et indirect (reflets sur les écrans ; Cf. Figure 6).
- Il est recommandé de ne pas positionner les postes de travail permanents à une distance supérieure à deux fois la hauteur du point haut des vitrages (Cf. Figure 7).

Vue sur l'extérieur

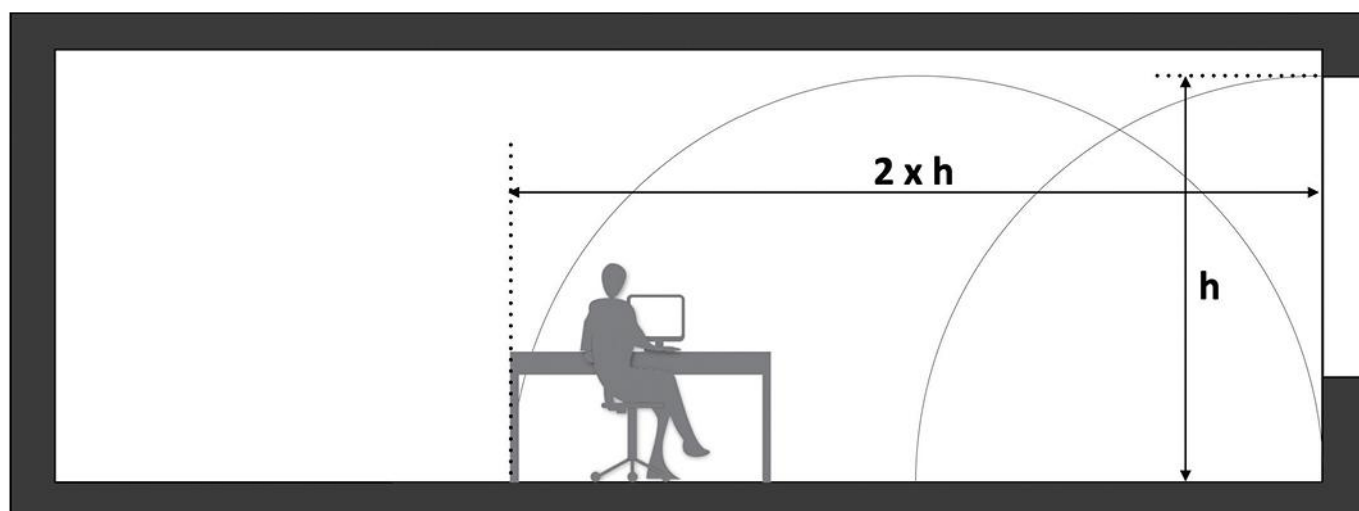
Bénéficier d'une vue vers l'extérieur est un impératif en ce qui concerne les locaux de travail [5]. La vue permet de se repérer dans l'espace, de rester connecté avec le déroulement de la journée et les conditions climatiques mais aussi de reposer les yeux. En effet, la vision lointaine permet de libérer les muscles ciliaires qui contrôlent la courbure du cristallin et donc de mettre l'œil en repos.

Critères de la norme NF EN 17037

La norme NF EN 17037 propose une analyse de la vue vers l'extérieur selon trois critères [4] :



↑ FIGURE 6 Recommandation relative à la position des postes de travail sur écran.



- l'angle de vision horizontal ;
- la distance par rapport aux obstacles extérieurs ;
- les composantes du paysage observables (ciel, paysage urbain et sol ; Cf. Figure 9).

Le Tableau 2 indique les exigences requises pour atteindre les différents niveaux de recommandation.

Influence des paramètres environnementaux et architecturaux

→ Influence de l'implantation des ouvertures

L'angle de vision horizontale vers l'extérieur dépend fortement de la taille et de la distribution des ouvertures. La Figure 8 montre, pour un local donné, la cartographie de la vue horizontale vers

l'extérieur associée à trois configurations d'ouvertures typiques.

On peut conclure de cette analyse que, plus un espace est profond, plus la surface d'ouverture doit couvrir sa façade en largeur pour être conforme à la norme NF EN 17037.

→ Influence de l'environnement

Comme évoqué précédemment, l'environnement extérieur du bâtiment conditionne fortement le potentiel de vue. En milieu urbain, le niveau « élevé » selon la norme NF EN 17037 (accès aux trois composantes : ciel, paysage et sol) est parfois difficile à atteindre (Cf. Figure 9).

↑ FIGURE 7 Recommandation quant à la distance maximale d'implantation des postes de travail permanents.

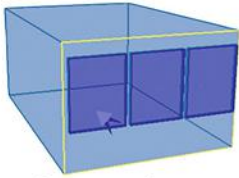
NIVEAU DE RECOMMANDATION POUR LA VUE	ANGLE DE VISION HORIZONTAL	DISTANCE DE LA VUE EXTÉRIEURE	NOMBRE DE COMPOSANTES À OBSERVER POUR 75% DE LA SURFACE UTILE
Minimal	≥ 14°	≥ 6 m	Paysage
Moyen	≥ 28°	≥ 20 m	Paysage + Sol ou Ciel
Élevé	≥ 54°	≥ 50 m	Paysage + Sol + Ciel

← TABLEAU 2 Évaluation de la vue sur l'extérieur depuis une position donnée [4].

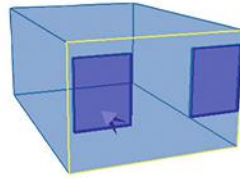


Angle de vision horizontale

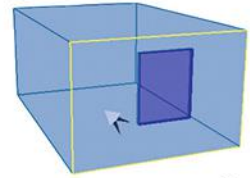
■ >54° ■ >28° ■ >14° ■ <14°



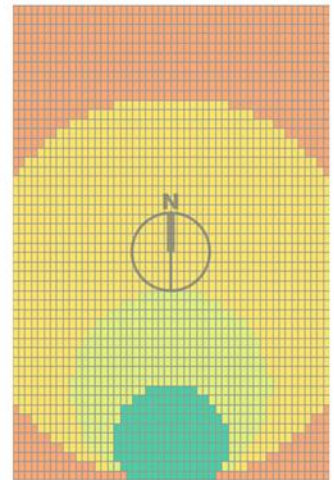
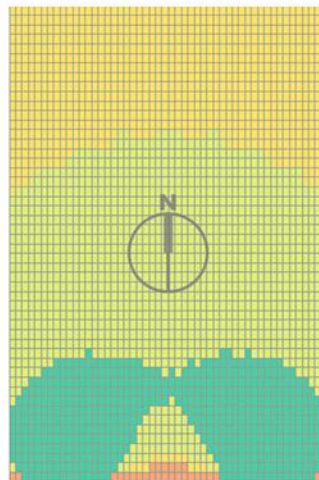
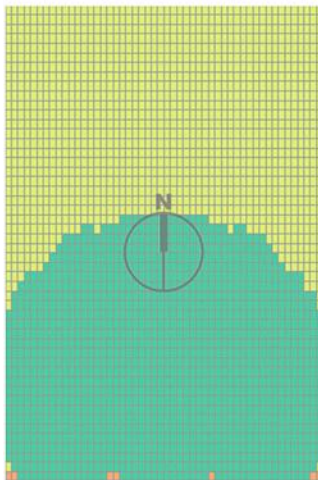
Bandeau vitré horizontal



Alternance surfaces opaques & vitrées



Ouverture ponctuelle



↑ FIGURE 8
Exemple de caractérisation de la vue horizontale pour différentes configurations d'ouvertures (vues en plan : la couleur de chaque maille indique l'angle de vision horizontale vers l'extérieur depuis chaque emplacement dans le local).

Retours d'expérience et bonnes pratiques concernant la vue extérieure

→ Géométrie des ouvertures

- Les typologies de façades basées sur une alternance de bandes verticales opaques et vitrées se traduisent par un fractionnement important de l'angle de vision horizontale [8]. De plus, cette configuration risque d'entraîner un éblouissement d'inconfort lié à de forts contrastes de luminance.
- À l'inverse, les ouvertures en bandes horizontales favorisent une vue large et panoramique du paysage environnant.

→ Ressenti des utilisateurs

- Le fait de pouvoir être observé depuis l'extérieur est parfois mentionné comme une contrainte par les usagers. Il arrive en effet que les façades 100 % vitrées soient obstruées par des éléments de mobilier ou bien que les rideaux ou les protections solaires soient abaissés même lorsque le soleil est absent, ce qui péjore l'accès effectif à la lumière du jour.
- Pour les bâtiments de grande hauteur, la sensation de vertige peut être accentuée par l'absence d'allèges opaques et inciter les usagers à décaler leur poste de travail vers l'intérieur.
- Les façades 100 % vitrées favorisent les échanges thermiques (augmentation du risque de surchauffe en été et de sensation de froid en hiver).

Exposition au soleil

Critères de la norme NF EN 17037

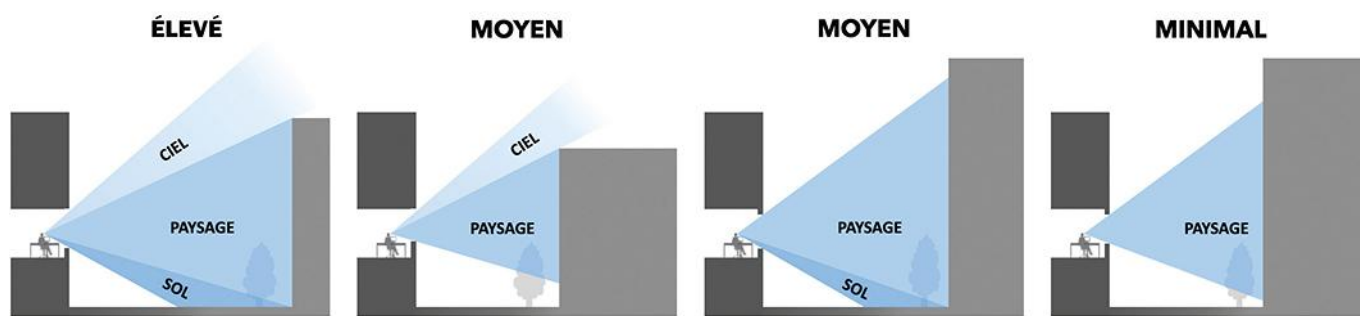
Les pénétrations solaires à l'intérieur d'un espace constituent indiscutablement un point positif qui contribue à l'agrément visuel et aux apports de chaleur en hiver. Cependant, la présence de rayons solaires directs dans le champ visuel n'est pas toujours adaptée dans un espace de travail, dans la mesure où les niveaux de luminance en jeu induisent un potentiel d'éblouissement élevé. Par ailleurs, le contrôle des gains solaires en période estivale représente un enjeu primordial pour maîtriser le risque de surchauffe.

La norme NF EN 17037 propose de valoriser le nombre d'heures d'exposition au soleil direct pour la période hivernale, à une date comprise entre le 1^{er} février et le 21 mars. Les différents niveaux de performance sont présentés dans le *Tableau 3*.

Retours d'expérience et bonnes pratiques concernant l'exposition au soleil

→ Protections solaires

- Les protections solaires fixes ne constituent pas à elles seules une réponse adéquate pour contrôler les rayons solaires. Il est donc indispensable de bénéficier de systèmes mobiles.
- Compte tenu de la gestion parfois irrégulière des utilisateurs, la motorisation et l'automatisation des protections solaires mobiles peuvent



↑ FIGURE 9 Représentation simplifiée du nombre de composantes potentiellement vues depuis l'intérieur d'un local.

NIVEAU DE RECOMMANDATION POUR L'EXPOSITION AU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT	EXPOSITION AU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT
Minimal	1,5 h
Moyen	3 h
Élevé	4 h

← TABLEAU 3 Recommandations relatives à l'exposition au rayonnement direct [4].

être utiles pour optimiser la gestion des apports solaires et lumineux [9]. L'automatisation permet notamment de réduire l'occultation lorsque le rayonnement direct n'est plus présent, et que l'occupant ne le remarque pas [10].

- Dans la pratique, les automatismes privilégiant quelques mouvements par jour lorsque les usagers sont absents constituent une réponse efficace et bien acceptée. Ces mouvements doivent être adaptés en fonction de l'orientation et de la saison afin de contribuer efficacement à la gestion du climat intérieur.

→ Ventilation naturelle

- Il est important de s'assurer que les protections solaires ne constituent pas un obstacle à la ventilation naturelle.
- À ce titre, les brise-soleil à lames orientables sont favorables (notamment pour la ventilation nocturne) dans la mesure où ils assurent une protection contre la pluie tout en laissant passer l'air à travers les lames.
- À l'inverse, les stores verticaux en toile peuvent constituer un obstacle au passage de l'air et favoriser la création d'un « bouchon » d'air chaud devant la fenêtre.

Protection contre l'éblouissement

En pratique, le risque d'éblouissement est renforcé par trois facteurs :

- la présence de fortes luminances dans l'axe du regard (centre de la scène) ;
- les écarts de luminances importants dans une même scène visuelle ;
- la présence de fortes luminances dans la partie basse du champ visuel.

Dans la pratique, la maîtrise de l'éblouissement

doit être assurée par les protections solaires mobiles. Leur présence est indispensable sur toutes les façades exposées au rayonnement direct afin de pouvoir adapter les conditions de travail en fonction des conditions climatiques et de la nature des activités pratiquées.

Critères de la norme NF EN 17037

La méthode détaillée de caractérisation de l'éblouissement selon la norme NF EN 17037 mobilise l'indicateur DGP (de l'anglais *daylight glare probability*) [11]. Celui-ci traduit, pour une scène lumineuse donnée, le pourcentage de personnes qui seront potentiellement éblouies. Pour calculer cet indicateur, plusieurs approches sont possibles. Sur site, il convient de réaliser plusieurs photos de la même scène avec différentes combinaisons d'indices d'ouverture et de temps d'exposition, afin de capter toute la dynamique lumineuse de la scène (images HDR : *High dynamic range*). En phase conception, il est possible de réaliser des simulations à l'aide de logiciels spécialisés [12]. Ces procédures sont complexes et peu adaptées au quotidien.

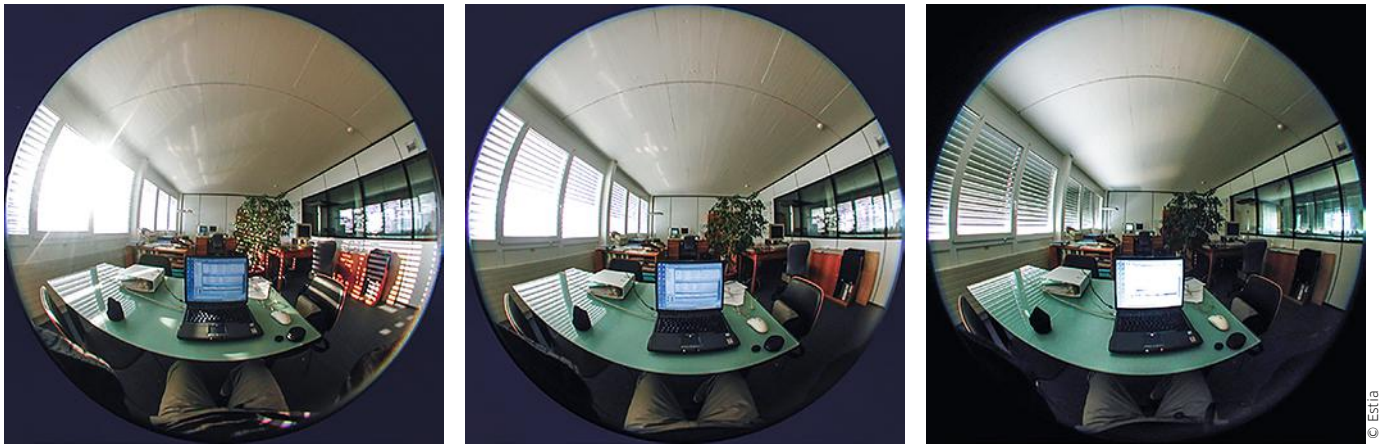
La méthode simplifiée de vérification de ce critère varie en fonction du type de protection solaire. On peut retenir que, dans le cas de stores opaques, le niveau de performance « élevé » est atteint pour ces dispositifs, dès lors qu'ils sont contrôlables par les occupants et qu'ils permettent de masquer totalement la vue du soleil lorsqu'ils sont en position fermée.

Retours d'expérience et bonnes pratiques concernant le contrôle de l'éblouissement

→ Stores en toile

Le choix d'un store en toile doit tenir compte des observations suivantes :





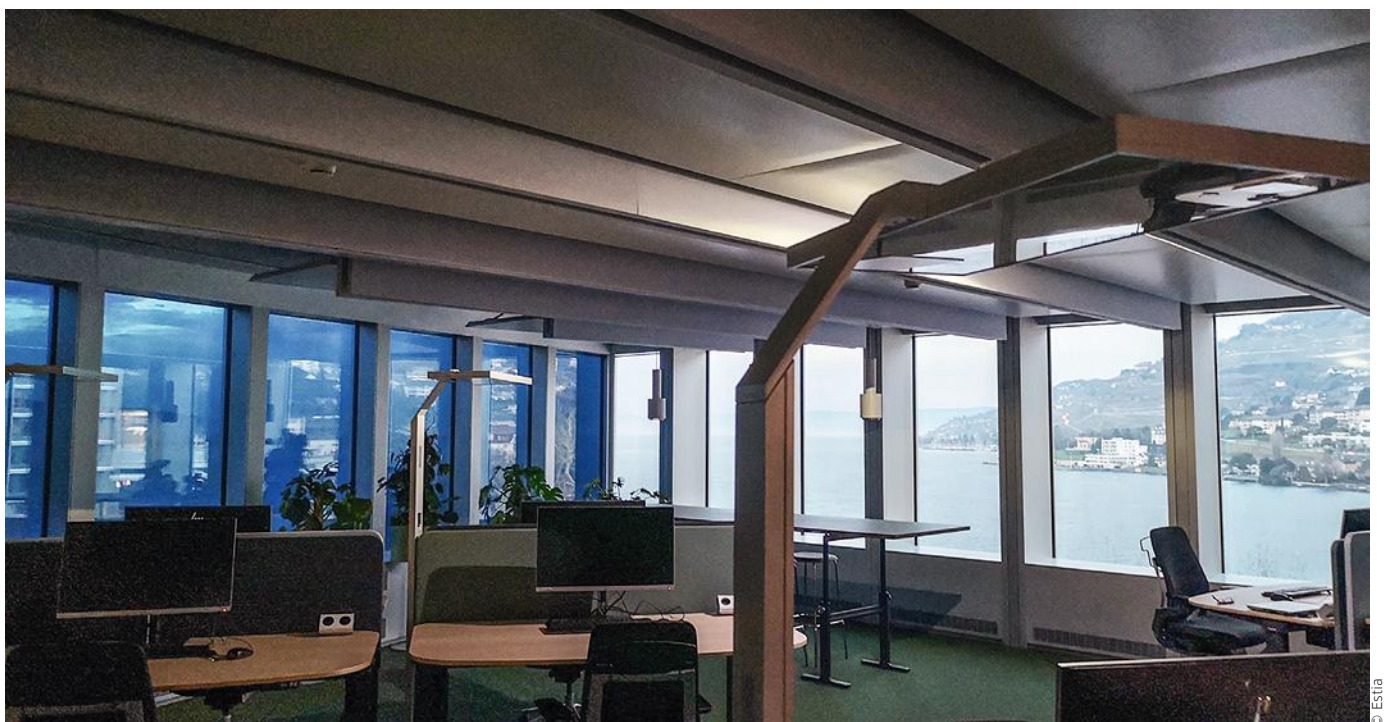
↑ FIGURE 10 Effets lumineux obtenus en fonction de l'inclinaison des lames. À gauche : le soleil pénètre à travers les lames et provoque un risque d'éblouissement élevé. Au centre : les lames sont inclinées de façon à bloquer les rayons directs et créent une ambiance tamisée. À droite : les lames en position fermée orientées vers le plafond laissent passer une partie des rayons et illuminent le plafond.

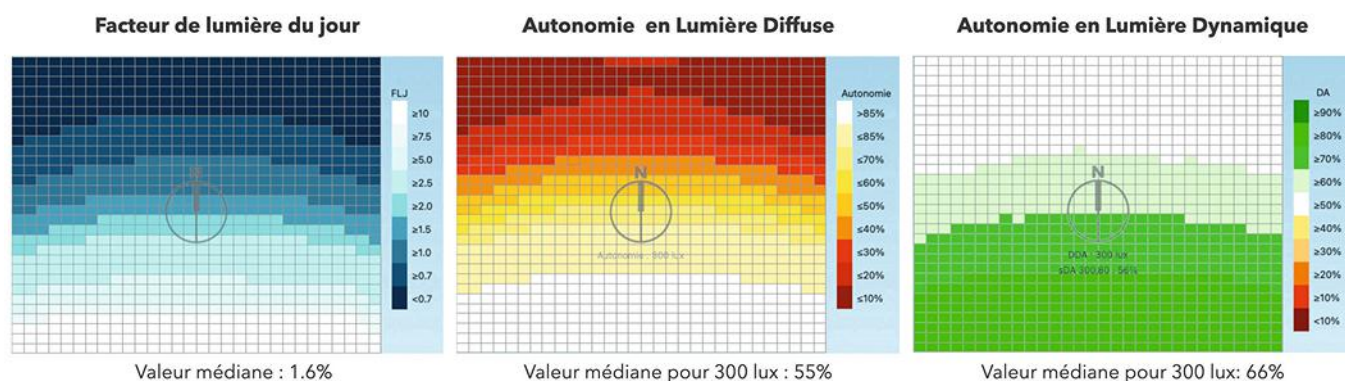
↓ FIGURE 11 Photographie d'un local situé dans l'angle d'un bâtiment et dont les façades sont équipées de verres électrochromes. Sur la partie gauche, les vitrages sont teintés au maximum : $TL \approx 1\%$, tandis qu'à droite, les vitrages sont à l'état clair : $TL \approx 56\%$.

- plus la couleur de la toile est claire, plus la transmission lumineuse est élevée (effet de diffusion à travers le tissu) ;
- plus le taux de perforation est important, plus la vision vers l'extérieur est préservée, mais plus le risque d'éblouissement est élevé (pour les tâches exigeantes, le taux de perforation ne devrait pas excéder 3 %) ;
- plus la couleur de la face intérieure de la toile est sombre, plus la vision vers l'extérieur est favorisée ;
- plus la couleur de la face extérieure de la toile est claire, plus l'absorption des rayons solaires est faible.

→ Brise-soleil à lames orientables

Les brise-soleil à lames orientables (BSO) constituent un outil très complet pour contrôler les risques d'éblouissement. Leur principal avantage réside dans la possibilité d'adapter l'inclinaison des lames en fonction de la hauteur du soleil, ce qui permet de ne pas bloquer complètement les apports lumineux et de préserver une partie de la vue vers l'extérieur (Cf. Figure 10). L'utilisation de lames claires permet de favoriser la réflexion de la lumière en direction du plafond et d'éviter que l'absorption des rayons solaires ne se traduise par un échauffement important du store. On évitera également le recours aux





finitions de type « brossé » qui peuvent créer des lignes éblouissantes.

→ Vitrages à teinte variable

Les vitrages à teinte variable (technologies électrochrome ou thermochrome) permettent de moduler la transmission du verre en fonction de l'exposition au soleil, tout en préservant la vue vers l'extérieur. Concrètement, le vitrage peut s'assombrir ou s'éclaircir, ce qui permet de réguler de façon souple les apports solaires et lumineux (Cf. Figure 11). Concernant les verres électrochromes, les performances des produits disponibles sur le marché actuellement montrent que cette technologie permet de résoudre à la fois la problématique des risques de surchauffe et celle de l'éblouissement. En effet, pour une configuration en double vitrage, la transmission lumineuse (coefficient TL) peut varier entre 0,59 (état clair) et 0,01 (état teinté maximal), tandis que la transmission énergétique (coefficient g) varie entre 0,40 (état clair) et 0,03 (teinte maximale). Cette technologie offre un potentiel intéressant dans le cadre de la rénovation de bâtiments équipés de verres teintés ou réfléchissants, ou bien dans le cas où la façade ne peut pas être modifiée.

→ Configuration des locaux

- S'assurer que la direction du regard est parallèle au plan de la façade vitrée.
- Pour le travail sur écran ainsi que les locaux scolaires, éviter les locaux d'angle vitrés sur deux faces contiguës.
- Éviter l'emploi de matériaux brillants pour les revêtements intérieurs.
- Les éléments présents dans l'environnement extérieur peuvent constituer des sources d'éblouissement (façades vitrées, véhicule en stationnement, etc.), ce qui justifie la présence de protections solaires mobiles, y compris sur des façades peu exposées au rayonnement direct.
- Selon le type de stores, la protection contre l'éblouissement peut entraîner une variation importante de l'autonomie en lumière du jour.

- Le fait de travailler avec un écran en mode « sombre », qui se traduit par une baisse de la luminance des informations affichées, induit parfois une tendance à baisser les protections solaires afin de réduire les contrastes dans le champ visuel. Ce comportement réduit encore l'apport de lumière naturelle dont bénéficie l'utilisateur et peut avoir des effets préjudiciables à la santé du salarié.

Outils de simulation numérique

De nombreux outils de simulation numérique sont actuellement disponibles sur le marché [12-14]. Ils permettent de calculer la disponibilité de la lumière naturelle à l'intérieur des locaux à l'aide d'algorithmes de lancer de rayons [15].

Parmi les indicateurs permettant de quantifier les apports de lumière naturelle, sont mentionnés notamment :

- le facteur de lumière du jour FLJ (Cf. Figure 12, à gauche) : cet indicateur définit, pour un ciel couvert standard (correspondant au modèle CIE ou Moon & Spencer : la luminance du ciel au zénith et égale à trois fois la luminance à l'horizon), le ratio entre l'éclairement sur le plan de référence à l'intérieur d'un local et l'éclairement sur le plan horizontal extérieur en site dégagé. Même si cet indicateur ne prend en compte ni l'orientation des ouvertures ni le climat du lieu où se situe le projet, il est utile pour comparer rapidement différentes variantes d'un même local ;
- l'autonomie en lumière diffuse (en anglais : *diffuse daylight autonomy* ; Cf. Figure 12, au centre) : cet indicateur utilise les résultats de FLJ pour calculer l'éclairement à l'intérieur du local en considérant l'éclairement horizontal diffus extérieur sur la base des données météorologiques du lieu d'implantation ;
- l'autonomie en lumière dynamique (en anglais : *diffuse daylight autonomy* ; Cf. Figure 12, à droite) : cet indicateur est basé sur une simulation dynamique annuelle (données climatiques horaires). Il permet de prendre en compte les apports de lumière directe du soleil. Certains

↑ FIGURE 12 Exemples de résultats de simulations de la quantification des apports de lumière naturelle pour un local sans stores via différents indicateurs (données climatiques de Bourges).



LIEUX DE TRAVAIL	CARACTÉRISTIQUES	CONTRAINTES	RECOMMANDATIONS	PROTECTIONS SOLAIRES
Bureaux	• Travail à l'écran	• Éblouissement direct • Reflets sur les écrans • Locaux parfois profonds (open spaces)	• Pas de fenêtres dans l'ergorama • Pas de fenêtres dans le dos	• Mobiles • Maintien de la vue vers l'extérieur • Gestion par zone • Resets quotidiens
Écoles	• Vision du tableau • Lecture/écriture sur papier	• Profondeur importante	• Parfois très claires • Pas de parois vitrées dans le dos des élèves	• Mobiles • Maintien de la vue vers l'extérieur • Resets quotidiens
Industrie	• Travail sur machine	• Dangers liés à l'éblouissement • Éclairement adapté aux exigences de précisions	• Lumière zénithale uniforme • Quelques points de vue vers l'extérieur	• Mobiles • Resets quotidiens
Hôpitaux	• Longues périodes dans locaux aveugles (circulations)	• Pas de contact visuel avec l'extérieur • Faible exposition à la lumière du jour • Préserver l'intimité dans les chambres	• Points de vue vers l'extérieur dans les circulations • Salles de pause vitrées sur l'extérieur • Hauteur d'allèges -70 cm	• Maintien de la vue vers l'extérieur
Commerces	• Caisses	• Pas de vue vers l'extérieur • Pas de lumière du jour	• Quelques points de vue vers l'extérieur • Éclairage circadien • Salles de pause vitrées sur l'extérieur	–
Restauration	• Travail en cuisine	• Pas de contact visuel avec l'extérieur • Faible exposition à la lumière du jour	• Points de vue vers l'extérieur • Salles de pause vitrées vers l'extérieur	• Maintien de la vue vers l'extérieur

↑ **TABLEAU 4**
Aperçu des contraintes et recommandations pour différentes activités de travail représentatives sur la base de retours d'expériences de projets (données Estia).

logiciels permettent d'intégrer la position des protections solaires en fonction du flux énergétique incident, ce qui donne une indication plus précise de la contribution à l'éclairage naturel des locaux. Le temps de calcul nécessaire pour ces simulations est plus important.

Points de vigilance concernant les outils de simulation

- Lorsque les modèles 3D sont complexes, la réalisation de simulations numériques peut nécessiter un temps de calcul élevé. Nous recommandons de procéder à des simulations sur des zones « représentatives » des bâtiments afin de

permettre la comparaison de différentes options dès la phase d'avant-projet.

- Les images de synthèse générées dans le cadre des concours d'architecture sont parfois « trompeuses » et peuvent induire des représentations abusives de la disponibilité de lumière naturelle [16].

Prise en compte des usages

Les exigences en matière d'éclairage naturel sont intimement liées aux différents types d'activités pratiquées dans les locaux. Le *Tableau 4* donne un aperçu des points à considérer pour quelques affectations typiques. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] **FENÊTRES : DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES.** *Cahiers techniques du moniteur des travaux publics et du bâtiment*, 2011, 5632.

[2] **PAULE B., SUTTER Y., COURRET G.** – Solutions de conception pour l'éclairage naturel. *Techniques de l'ingénieur*, 2020, C3316 V3.

[3] **SUTTER Y. (DIR.)** – *Guide Biotech – Éclairage naturel*. ICEB/ARENE le-de-France, 2014.

[4] **NORME NF EN 17037** – *Lumière naturelle dans les bâtiments*. Afnor, 2021.

[5] **NORME NF EN 12464-1** – *Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail intérieurs*. Afnor, 2021.

[6] **PAULE B., FLOURENTZOS F.** – *Perspective on daylight provision according to the new European standard "Daylight in Buildings" (EN 17037)*. In: *Proceedings of the CISBAT Conference*, Lausanne, 2019.

[7] **GIF LUMIÈRE** – *Le guide de l'éclairage naturel zénithal*. 2018. Accessible sur :

https://www.gif-lumiere.com/wp-content/uploads/2018/06/Guide-Eclairage-GIF-Lumiere_WEB.pdf

[8] **PAULE B. ET AL.** – *How current trends in the design of facades influence the functional quality of interior spaces*. In: *Proceedings of the CISBAT conference*, Lausanne, 2015.

[9] **PAULE B. ET AL.** – *Shading device control: effective impact on daylight contribution*. In: *Proceedings of the CISBAT conference*, Lausanne, 2015.

[10] **SUTTER Y. ET AL.** – *The use of shading systems in VDU task offices: a pilot study*. *Energy and buildings*, 2006, 38, 7, pp. 780-789. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.010>

[11] **WIENOLDJ. ET AL.** – *Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras*. *Energy and buildings*, 2006, Vol. 38, 7, pp. 743-757. Accessible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778806000715>

[12] **SITE WEB RADIANCE** [consulté en mars 2025] – Accessible sur : <https://www.radiance-online.org/>

[13] **SUTTER Y. ET AL.** – *Outils et méthodes pour l'éclairage naturel*. *Techniques de l'ingénieur*, 2020, C3315.

[14] **SITE WEB ENERGIE PLUS** [consulté en mars 2025] – Accessible sur : <https://energieplus-lesite.be/theories/eclairage12/physique-lumiere/simuler-l-eclairage/>

[15] **WARD G.J.** – *The RADIANCE lighting simulation and rendering system*. Lawrence Berkeley laboratory, 1994. Accessible sur : <https://radsite.lbl.gov/radiance/papers/sg94.1/Siggraph1994a.pdf>

[16] **PAULE B., PEREIRA J.** – *How daylight representation in architectural competitions images can lead to an erroneous interpretation of projects*. In: *Proceedings of the CISBAT conference*, Lausanne, 2021.

ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL DANS LES LOCAUX PROFESSIONNELS

Cet article présente les étapes clés d'un projet d'éclairage artificiel : rappel des principes de base, analyse des besoins visuels selon l'activité et les recommandations normatives, choix des sources et des luminaires, puis illustrations par des exemples concrets. Enfin, sont abordées les méthodes de contrôle et de mesure permettant de vérifier la qualité des installations.

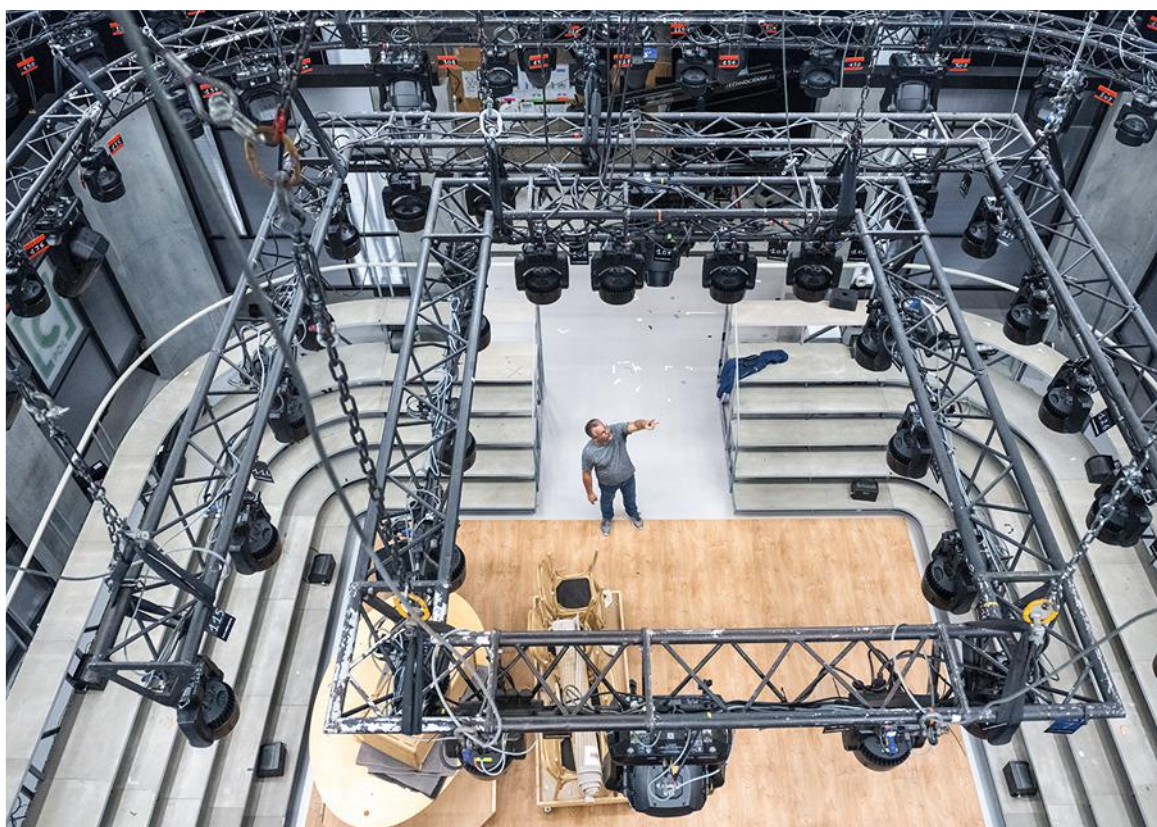
**MAXIME
VAN DER HAM**
Sarese
(bureau
d'études
réseaux,
éclairage) /
Institut de
formation
à l'éclairage
professionnel
(IFEP)

L'éclairage artificiel joue un rôle essentiel pour la santé et la sécurité des travailleurs lorsque la lumière naturelle est insuffisante : un niveau lumineux suffisant limite la fatigue visuelle et les risques d'accidents, tandis qu'un éclairage mal conçu peut provoquer des éblouissements, une mauvaise perception de l'environnement ou une ambiance inappropriée. Comme pour la lumière naturelle, il est nécessaire de prévoir l'installation d'éclairage artificiel en fonction des besoins réels du local de travail.

Principes généraux

Une bonne installation d'éclairage intérieur doit réduire le risque d'accident, tout en répondant à trois exigences : fonctionnalité, en lien avec la difficulté de la tâche visuelle ; ergonomie, en assurant un confort visuel adapté à l'environnement lumineux ; et économie, en maîtrisant les coûts d'installation et d'exploitation.

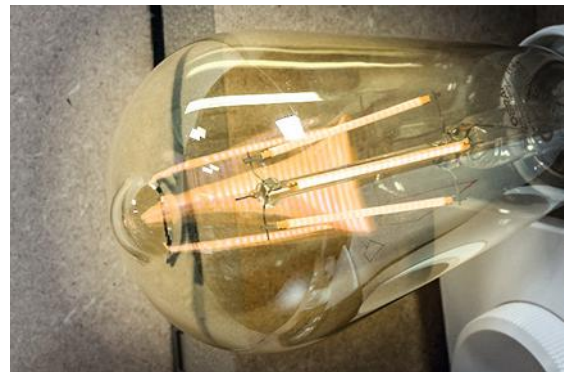
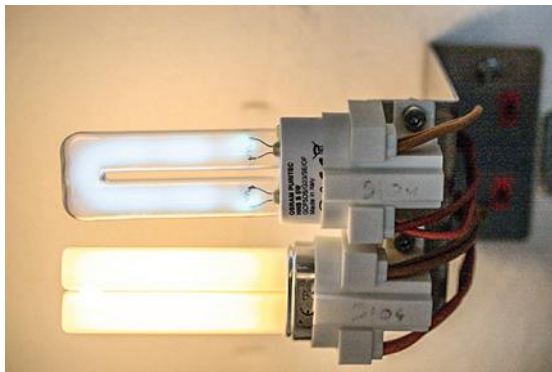
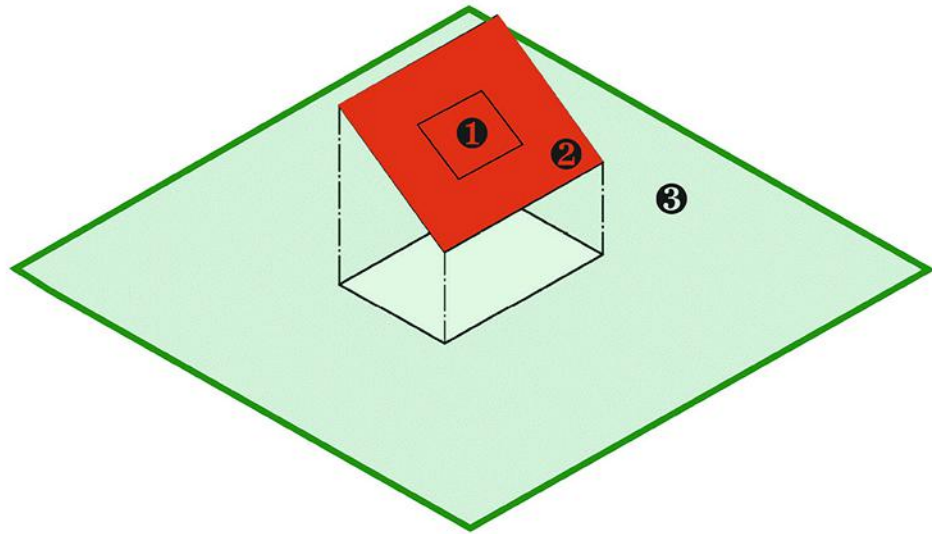
Un accident peut être causé directement par un éclairage inadapté, en raison d'une mauvaise prise d'information liée à un manque de contraste (par exemple, chute ou non-détection des piétons lors



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2024



FIGURE 1 →
Représentation
schématique
arbitraire des trois
zones du champ
visuel d'une zone
de travail
selon la norme
NF EN 12464-1 :
(1) zone d'activité,
(2) zone
environnante,
(3) zone de fond.



↑ FIGURE 2 À gauche, décharge électrique dans un tube. En haut, on distingue l'arc maintenu dans un gaz émettant un rayonnement optique principalement ultraviolet. En bas, les parois internes du tube, recouvertes d'une poudre fluorescente, transforment ces UV en lumière. À droite : une source led imitant des filaments incandescents. On distingue les diodes électroluminescentes, dont la lumière bleue est transformée en lumière chaude par des matériaux luminescents déposés à leur surface.

d'une conduite d'engin) ou à un éblouissement (mauvaise manœuvre, etc.). Il peut aussi survenir de manière indirecte, lorsque l'éclairage favorise la fatigue visuelle et diminue l'attention.

La difficulté d'une tâche visuelle dépend des contrastes de luminance et de couleur entre la cible et le fond sur lequel elle se détache, des dimensions des détails à percevoir, ainsi que de la durée pendant laquelle l'attention visuelle doit être maintenue.

Comme l'indique la norme NF EN 12464-1, l'augmentation du niveau d'éclairement permet d'améliorer la sensibilité aux contrastes, réduisant ainsi la difficulté de la tâche visuelle et les risques associés [1]. Cela permet notamment de compenser la dégradation des performances visuelles liée à l'âge et à la durée du travail au poste.

Bien éclairer dès la phase de conception

Nous savons aujourd'hui que la lumière n'intervient pas uniquement dans le mécanisme de la vision : elle agit également sur des fonctions biologiques non visuelles, notamment à travers la synchronisa-

tion du rythme circadien, dont dépendent des processus essentiels comme le sommeil, l'attention, les performances cognitives ou la mémoire [2]. Or, les exigences de réduction de consommation d'énergie tendent à réduire les niveaux d'éclairement à l'intérieur des bâtiments [3,4].

Dès le début de la conception architecturale, le maître d'œuvre devra opérer les arbitrages techniques et financiers nécessaires pour garantir puis maintenir des conditions d'éclairage favorables à la sécurité, au bien-être et à la performance visuelle des salariés.

Analyser les besoins

La norme NF EN 12464-1 référence les bonnes pratiques en éclairage des lieux de travail intérieurs. Quel que soit leur usage, elle tient compte des besoins visuels, de la modularité des espaces et de leur mode d'occupation. Comme illustré sur la Figure 1, la norme NF EN 12464-1 définit trois zones dans le champ visuel [1] :

- la zone d'activité : l'endroit où le travail est effectivement réalisé ;

Distributions spatiales d'intensités lumineuses selon les optiques utilisées

A10-A32 large 100 % direct
A40-A44 moyen 100 % direct
A50-A80 étroit 100 % direct
B21-B22 large 75 % direct
B31-B33 normal 75 % direct
B41-B63 étroit 75 % direct
C11-C33 large 50 % direct
C42-C63 moyen/étroit 50 % direct
D11-D63 tous 25 % direct
E02-E73 large 0 % direct
FL (FLOOD)
MP – Optique microprismatique (large faisceau)
MPA – Opt. microprismatique (faisceau asymétrique)
O – Revêtement PMMA (large faisceau)
SP (SPOT)
VERT (réflecteur vertical)
VFM (VERY WIDEFLOOD)
WWR (LÈCHE-MUR, À DROITE)

Types d'implantation dans un local de travail

Encastré – Suspendu
Encastrés de sol
Plafonnier – Suspension – Encastré
Encastré
Encastré dans le mur
Fixation murale
Luminaire sur pied, lampadaire
Montage transformateur
Plafonnier
Plafonnier/encastré
Plafonnier/suspension
Suspendu

← FIGURE 3
Les diverses déclinaisons d'un même luminaire.
(source « Types d'implantation dans un local de travail » : <https://www.zumtobel.com/fr-fr/products/anwendungen.html>).

- la zone environnante : une bande entourant la zone d'activité dans le champ visuel ;
- la zone de fond : l'environnement plus large autour des deux zones précédentes.

La norme NF EN 12464-1 associe, à chaque type de lieu de travail, un tableau d'objectifs à atteindre en matière d'éclairage (Cf. Article pp. 40-48) : éclairage à maintenir ($\bar{E}_m [lx]$) et uniformité U_0 , éblouissement R_{UGL} , modelé ($\bar{E}_{m,z} [lx]$), perception du fond ($\bar{E}_{m,mur}$ et $\bar{E}_{m,plafond} [lx]$), rendu des couleurs R_a et température apparente $T_{cp} [K]$ de la lumière, ainsi que sa variation temporelle (papillotement P_{st}^{LM} et effet stroboscopique SVM).

Les sources de lumière disponibles

Malgré la généralisation des luminaires à LED dans les installations neuves, le remplacement complet du parc existant n'est pas encore achevé, et les luminaires équipés de lampes à décharge (Cf. Figure 2 à gauche) restent très répandus dans les lieux de travail. En intérieur, il s'agit principalement des tubes fluorescents T12, puis T8 et enfin T5 ou lampes fluocompactes, souvent appelées à tort « néons ».

Ces lampes à décharge tendent à être progressivement remplacées par des luminaires équipés de sources led, lors d'opérations de rénovation ou directement dans les travaux neufs. Les avantages techniques et économiques des led sont nombreux : meilleur rendement lumineux, émission limitée au domaine visible, allumage instantané, insensibilité aux cycles marche/arrêt, et grande compacité facilitant l'intégration dans les luminaires. En revanche, elles peuvent présenter certains inconvénients : papillotement, baisse du flux lumineux (Cf. Article pp. 30-39) en cas de gestion thermique insuffisante, dérive chromatique vers

le bleu en vieillissant, et impossibilité fréquente de remplacer la source sans changer le luminaire complet.

Les luminaires et la distribution de l'intensité lumineuse

Le luminaire désigne l'enveloppe mécanique qui intègre les sources lumineuses. Il assure l'étanchéité à l'eau et à la poussière vis-à-vis de l'environnement, et constitue l'interface de fixation au local de travail. L'alimentation électrique peut être intégrée ou déportée. Enfin, il comporte un ensemble d'éléments qui forment le système optique : réfracteurs transparents à la lumière, réflecteurs, diffuseurs, etc. Son rôle est de distribuer la lumière depuis la source vers l'espace de travail.

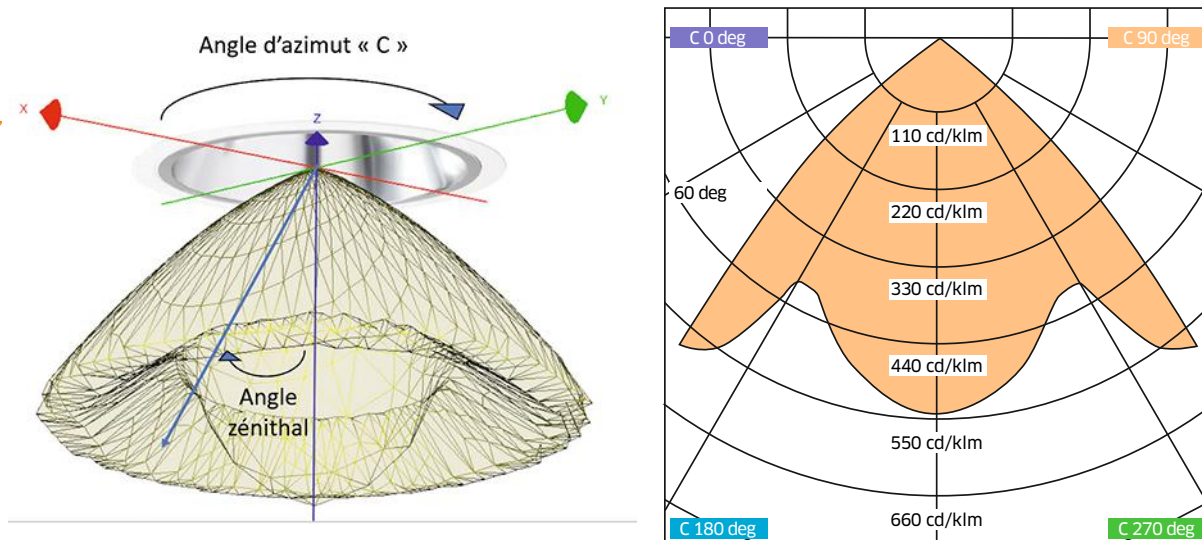
Une fois la source choisie pour la qualité de la lumière qu'elle délivre vis-à-vis de l'activité, le luminaire est sélectionné selon plusieurs critères : sa distribution spatiale d'intensité lumineuse, qui définit la forme du faisceau lumineux, son implantation possible dans le lieu de travail (encastré, suspendu, sur mât, etc.), sa forme et ses dimensions (Cf. Figure 3).

Dans les catalogues des fabricants, la distribution spatiale de la lumière apparaît sous forme de diagrammes polaires, pour un demi-plan correspondant à un azimut donné (souvent 0°, 90°, 180° et 270°) en fonction de l'angle zénithal (de 0° à 180°). L'unité utilisée est le candela pour une représentation absolue, ou le candela pour 1000 lumen de source dans le cas d'une représentation relative (Cf. Figure 4).

Grâce à une grande variété d'optiques et de modes de fixation, les luminaires s'adaptent à tous les espaces et à leurs contraintes d'usage (Cf. Tableau 1).



FIGURE 4 →
À gauche : représentation 3D de la distribution de lumière par un luminaire encastré, au centre d'un repère permettant de visualiser les angles d'azimut C et zénithal γ . À droite : cette représentation est projetée sur un plan sous la forme d'un graphe polaire.



Conception : prise en compte de l'évolution d'un projet dans le temps

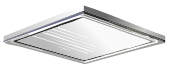
Lors de la conception, l'éclairagiste (*i.e.*, le professionnel en charge de l'étude d'éclairage) doit tenir compte de la dépréciation du flux lumineux dans le temps à partir des données disponibles (fournisseur, environnement thermique, empoussièrement du local, étanchéité des luminaires choisis, etc.). Ce facteur est intégré en amont de l'étude d'éclairage, afin de s'assurer que les éclairagements attendus seront atteints à tout moment. Sont détaillés par la suite trois cas d'étude mettant en œuvre ces concepts. Pour chacun d'entre eux, les besoins en objectifs photométriques sont traduits dans un logiciel de conception d'éclairage. Des luminaires appropriés au projet sont ensuite proposés, ainsi qu'une évaluation de l'effet de leur implantation dans le projet.

Premier projet : bureau en open space

Recueil des besoins, objectifs photométriques

La norme NF EN 12464-1 catégorise les espaces de travail selon la précision des tâches à accomplir. Plus les tâches sont précises et minutieuses, plus les exigences sont élevées [1]. Comme indiqué sur le *Tableau 2* pour les espaces de bureau, huit sous-catégories correspondent à des objectifs d'éclairement et d'uniformité sur la zone d'activité, de rendu des couleurs R_a et d'éblouissement R_{UGL} . En complément, la norme spécifie également des niveaux d'éclairement à respecter dans l'environnement proche : éclairagements cylindriques pour le modelé, éclairagements moyens aux murs et au plafond. Dans le cas présent, les postes de travail sont des postes de CAO (catégorie 34.4 de la norme). Ces objectifs sont intégrés dans les logiciels de simulation d'éclairage comme ReluxDesktop [5] :

TABEAU 1 →
Différents types de luminaires.

	« Downlight », petit hublot encastré dans le plafond.
	« Plafonnier » de forme linéaire, éventuellement suspendu. Il peut mixer les émissions directes de lumière (vers le bas) et indirectes (lumière dirigée vers le plafond).
	« Encastré » en faux plafond, de forme souvent carrée.
	« Applique » carrée, ronde ou rectangulaire, majoritairement fixée sur les murs.
	Projecteur souvent de forme tubulaire et fixé sur rail.

N° RÉF.	TYPE D'AIRE DE LA TÂCHE/ZONE D'ACTIVITÉ	E _m (lx)		U ₀	R _a	R _{UGL}	E _{m,z} (lx)	E _{m, mur} (lx)	E _{m, plafond} (lx)	EXIGENCES SPÉCIFIQUES (les références sont internes à la norme)
		EXIGÉ a)	MODIFIÉ b)				U ₀ ≥ 0,10			
34.1	Classement, reprographie, etc.	300	500	0,40	80	19	100	100	75	–
34.2	Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	1000	0,60	80	19	150	150	100	Pour le travail sur écran, cf. 5.9. Pour la luminosité de la pièce, cf. 6.7 et annexe B. Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, cf. 6.2.4. Pour les petites cellules de bureaux, l'exigence relative au mur s'applique au mur de face. Pour les autres murs, une exigence inférieure de 75 lx minimum pourrait être acceptée.
34.3	Dessin industriel	750	1500	0,70	80	16	150	150	100	Pour le travail sur écran, cf. 5.9. Pour la luminosité de la pièce, cf. 6.7.
34.4	Postes de travail de conception assistée par ordinateur	500	1000	0,60	80	19	150	150	100	Pour le travail sur écran, cf. 5.9.
34.5.1	Salles de conférence et de réunion	500	1000	0,60	80	19	150	150	100	Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, cf. 6.2.4.
34.5.2	Table de conférence	500	1000	0,60	80	19	150	150	100	Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, cf. 6.2.4.
34.6	Réception	300	750	0,60	80	22	100	100	75	Si le bureau de réception comprend des tâches régulières sur le poste de travail, il convient de les éclairer en conséquence.
34.7	Archives	200	300	0,40	80	25	75	75	50	–

a) Exigé : valeur minimale.

b) Modifié : prend en compte des caractéristiques communes propres au contexte (difficulté, détail, capacités visuelles du salarié, etc.).

↑ **TABLEAU 2** Extrait de la norme NF EN 12464-1 : contraintes d'éclairage (tableau n° 34 [1]).

Sélectionner le profil d'utilisation

Normes / Profils: SN EN 12464-1 (11.2021) (new)

Recherchez: ☐ Seulement les favoris

Utilisation	Em,r	Em,u	Uo	RUGL	Ra	Em, mur	Em, pla...	Em,z	Hauteur ...
E: Bureaux									
34: Bureaux									
34.1: Classement, reprographie, etc.	300	500	0.40	19	80	100	75	100	0.750
34.2: Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.3: Dessin industriel	750	1500	0.70	16	80	150	100	150	0.750
34.4: Postes de travail de conception assistée par ordinateur	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.5.1: Salles de conférence et de réunion	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.5.2: Table de conférence	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.6: Réception	300	750	0.60	22	80	100	75	100	1.100
34.7: Archives	200	300	0.40	25	80	75	50	75	0.750

← **TABLEAU 3**
Prise en compte des objectifs photométriques (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

le local est classifié sous la catégorie « Bureaux/Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données » (34.2) et le logiciel affiche les objectifs photométriques à atteindre (Cf. *Tableau 3*).

Choix et implantation des luminaires

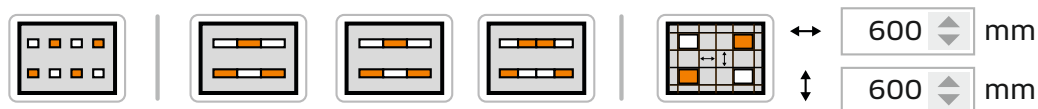
Dans un bureau, caractériser les trois zones (activité, environnement, fond) est assez simple car l'espace est souvent centré autour du bureau (zone d'activité unique). En cas de zones d'activité multiples (poste d'opération d'une part, et bureau

d'autre part), la définition des besoins doit être plus fine : il convient alors d'identifier clairement les différentes zones visées par la norme.

Ici, la géométrie de l'open space rend le choix des luminaires évident. Comme illustré sur la *Figure 5*, on paramètre le logiciel de conception lumineuse pour les implanter selon un calepinage régulier. Traditionnellement, le choix se porte vers des dalles carrées encastrées dans le faux plafond, ou vers des plafonniers. Ces luminaires offrent une distribution lumineuse similaire : orientée



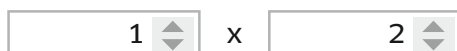
Disposition des luminaires



Orientation sur axe majeur



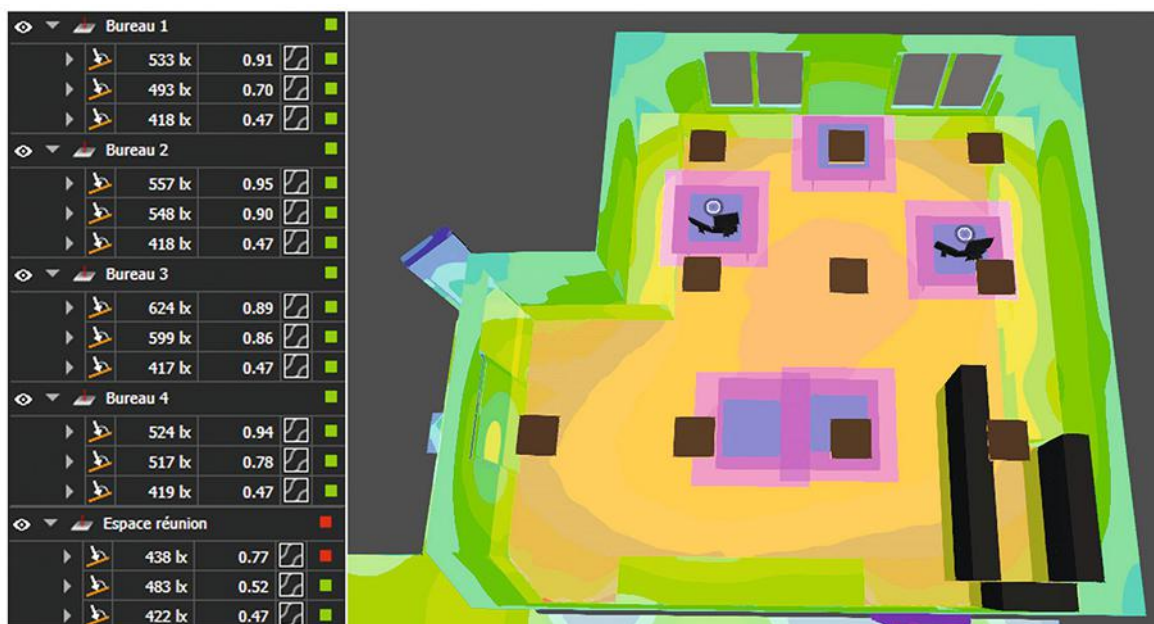
Nombre de luminaires



↑ FIGURE 5 Exemple de disposition possible pour un calepinage régulier dans un local : paramètres de disposition, d'espacement et d'orientation (logiciel utilisé : ReluxDesktop, projet Sarese).



↑ FIGURE 6 Postes de CAO en open space (catégorie 34.4 de la norme NF EN 12464-1). Le luminaire entouré est doté d'une cellule photosensible pour limiter la consommation énergétique de l'installation, en modulant son flux lumineux pour compléter l'éclairage naturel. Ci-dessous : vue en 3D du local, faisant apparaître la distribution lumineuse des luminaires (logiciel utilisé : ReluxDesktop).



↑ FIGURE 7 Résultats de la simulation de l'éclairage (logiciel utilisé : Dialux [6]).

vers le sol et symétrique. Comme illustré sur la Figure 6, une implantation suivant une grille régulière permet d'assurer une uniformité de l'éclairage conforme aux exigences de la norme : $U_0 \geq 0,60$ sur la zone d'activité et $U_0 \geq 0,40$ sur la zone environnante.

Les luminaires sont éloignés des murs afin de maximiser l'efficacité de l'installation : la lumière émise atteint en priorité l'espace dédié au travail, tandis que les parois sont éclairées par la lumière résiduelle ou réfléchie.

En complément, et conformément à la réglementation environnementale en vigueur [4], la gradation de l'éclairage vise à réduire la consommation électrique par adaptation à la lumière du jour et détection de présence. Pour cela, le bureau est divisé en deux zones : une première proche des fenêtres, bénéficiant d'un facteur de lumière du jour élevé, et le reste du local. Les luminaires sont alors organisés en mode « maître-esclaves » : l'un d'eux intègre un détecteur de présence et de lumière du jour, et pilote de manière groupée les autres luminaires connectés.

Même si, en cas d'activités multiples, les exigences varient suivant les zones, il est déconseillé de déséquilibrer l'implantation ou la puissance des luminaires : cela compromettrait une future réorganisation de l'espace de travail.

Simulations numériques et résultats

→ Niveaux d'éclairage et uniformité

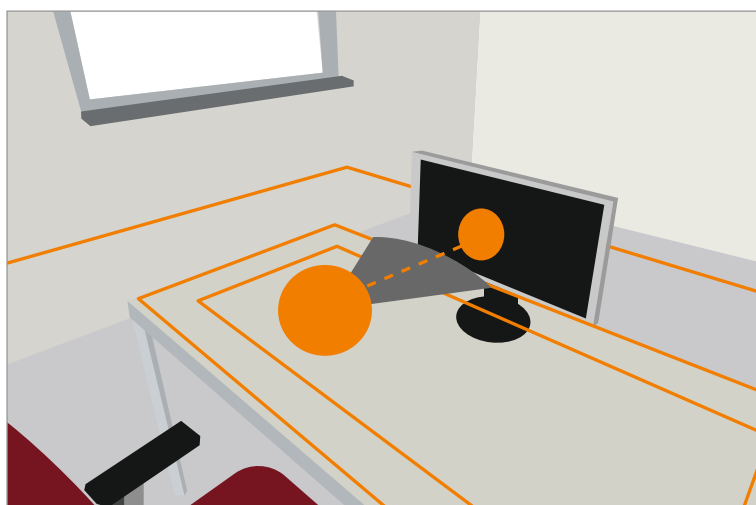
La Figure 7 présente, à droite, les niveaux d'éclairage obtenus dans le local sous forme de fausses couleurs. À gauche figurent les éclairages moyens et les uniformités calculés pour chaque poste (bureau 1 à 4 et espace réunion) et pour chaque zone cible (zone d'activité, zone environnante et zone de fond). Un carré vert indique que la consigne est respectée.

Sur la table dédiée aux réunions, les 500 lux recommandés par la norme ne sont pas atteints. Toutefois, cette table n'étant utilisée que pour des réceptions ou de petites réunions, une consigne réduite à 300 lux peut être jugée acceptable. On note que son positionnement contre un mur n'est pas optimal.

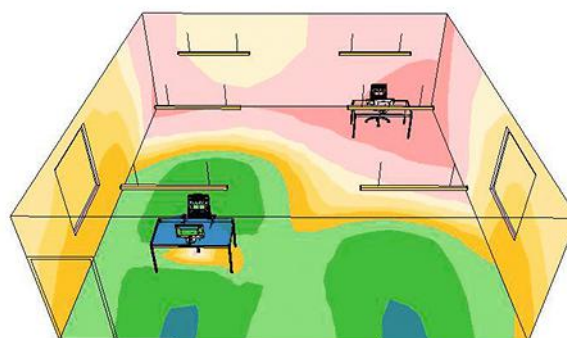
→ Éblouissement

L'indice d'éblouissement d'inconfort R_{UGL} doit rester inférieur à la valeur limite fixée par la norme. Il peut être calculé à l'aide du logiciel de conception photométrique, selon de multiples angles de direction et de vision et à des hauteurs différentes. La colonne R_{UGL} (Cf. Tableau 2) indique les seuils à ne pas dépasser dans le cas des bureaux.

Tel qu'illustré sur la Figure 8, le calcul de l'éblouissement est réalisé à l'aide d'un capteur virtuel positionné à la place de l'observateur dans le

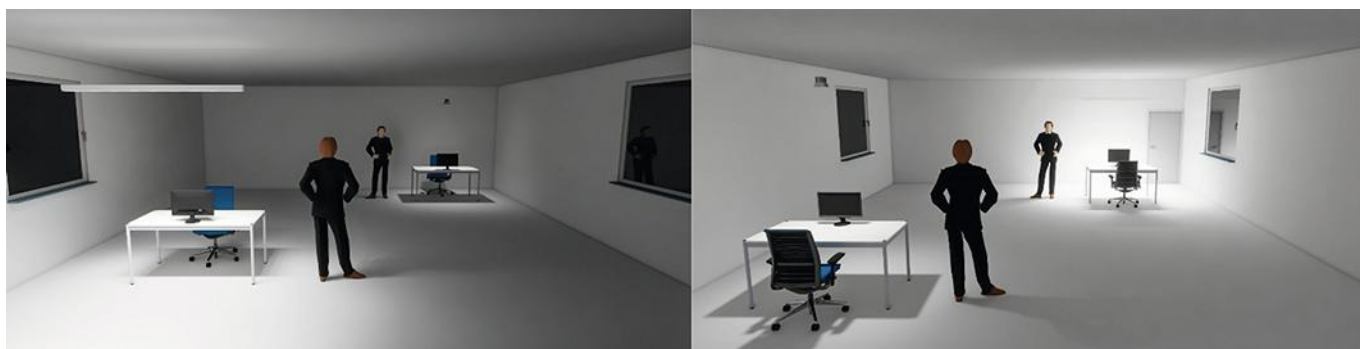


↑ FIGURE 8 Capteur virtuel d'éblouissement R_{UGL} dans le modèle 3D du projet d'éclairage (logiciel utilisé : ReluxDesktop).



↑ FIGURE 9 Simulation d'une panne partielle de l'éclairage artificiel. En haut : rendu visuel. En bas : éclairages en fausses couleurs, exprimés en lux (logiciel utilisé : ReluxDesktop).





↑ FIGURE 10 Dans les deux situations présentées, les objectifs photométriques sont respectés.
À gauche : déséquilibre des luminances dans le champ visuel, créant une ambiance lugubre. À droite : situation plus homogène (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

↓ FIGURE 11
Exemple
d'éclairage d'un
cabinet dentaire :
l'éclairage général
est assuré par
des plafonniers,
un éclairage de
renforcement est
assuré par une
source articulée au
niveau du patient

modèle 3D. La direction du regard est initialement orientée vers l'écran, mais pour mieux représenter le comportement réel d'un salarié, l'évaluation de l'indice d'éblouissement se fait en explorant un cône de vision de 30° autour de cet axe principal. Ce cône tient compte des variations naturelles du regard dans un champ de vision horizontal de $\pm 30^\circ$ autour de cet axe principal. Dans ce cas d'étude, $R_{UGL} = 18,2$; ce qui est conforme aux exigences pour le travail sur écran ($R_{UGL} \leq 19$)¹.



Exemples d'éclairage inadapté

→ Éclairage hétérogène

Une panne partielle de l'installation d'éclairage (simulée) réduit l'uniformité générale (Cf. Figure 9) : elle tombe à 0,25 sur la zone d'activité (le bureau) et à 0,10 sur la zone environnante, ce qui devient insuffisant au regard des objectifs fixés par la norme. Dans ce cas, il ne faut pas tarder à intervenir sur l'installation pour retrouver un fonctionnement normal.

→ Déséquilibre des luminances

Comme illustré sur la Figure 10, un déséquilibre de luminances peut altérer le confort visuel. Même si les objectifs photométriques sont respectés sur le plan de travail, un contraste excessif entre les surfaces peut générer une ambiance visuelle perçue comme triste et dissymétrique.

Deuxième étude de cas : un cabinet dentaire

Recueil des besoins, objectifs photométriques

Le projet étudié ici concerne un cabinet dentaire (Cf. Figure 11), pour lequel la norme NF EN 12464-1 recense les différentes zones et tâches associées dans son tableau n°56 (Cf. Tableau 4).

La norme distingue l'éclairage général de l'éclairage localisé sur le patient, qui nécessite un niveau d'éclairage deux fois plus élevé. Les objectifs à atteindre pour l'environnement proche (éclairage cylindrique, murs et plafond) sont également spécifiés. Comme dans le cas précédent, le cabinet est identifié dans le logiciel, ici en tant qu'« établissement de santé – dentistes », ce qui permet d'accéder directement aux consignes (Cf. tableau 5). Dans ce cas précis, identifier les zones est plus complexe car plusieurs activités coexistent (poste d'opération, bureau, etc.). Il est donc essentiel de définir avec précision les besoins pour associer chaque zone aux exigences correspondantes de la norme.

Choix et implantation des luminaires

Le choix des luminaires peut sembler complexe en raison des différentes zones d'activité. En

N° RÉF.	TYPE D'AIRE DE LA TÂCHE /ZONE D'ACTIVITÉ	E _m (lx)		U ₀	R _a	R _{UGL}	E _{m,z} (lx)	E _{m,mur} (lx)	E _{m,plafond} (lx)	EXIGENCES SPÉCIFIQUES (les références sont internes à la norme)
		EXIGÉ a)	MODIFIÉ b)							
56.1	Éclairage général	500	750	0,60	90	19	150	150	100	Il convient que l'éclairage ne soit pas éblouissant pour le patient.
56.2	Sur le patient	1 000	1 500	0,70	90	—	150	150	100	—
56.3	Champ opératoire	—	—	—	—	—	—	—	—	Appliquer les exigences spécifiques de l'EN ISO 9680
56.4	Appariement à la couleur des dents	—	—	—	—	—	—	—	—	Appliquer les exigences spécifiques de l'EN ISO 9680

a) Exigé : valeur minimale.
b) Modifié : prend en compte des caractéristiques communes propres au contexte (difficulté, détail, capacités visuelles du salarié, etc.).

↑ TABLEAU 4 Extrait de la norme NF EN 12464-1 (tableau n°56 des objectifs photométriques).

Sélectionner le profil d'utilisation										
Normes / Profils		SN EN 12464-1 (11.2021) (new)								
Recherchez		dentiste								
		☐ Seulement les favoris								
Utilisation										
Em,r Em,u Uo RUGL Ra Em,mur Em,plaf... Em,z Hauteur p...										
I: Établissements de santé										
56: Établissements de santé – Dentistes										
56.1: Éclairage général 500 750 0.60 19 90 150 100 150 0.850										
56.2: Sur le patient 1000 1500 0.70 --- 90 150 100 150 0.850										
56.3: Champ opératoire --- --- --- --- --- --- --- --- 0.850										
56.4: Appariement à la couleur des dents --- --- --- --- --- --- --- --- 0.850										

← TABLEAU 5 Objectifs photométriques affichés dans le logiciel ReluxDesktop après caractérisation du local (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

réalité, la zone la plus exigeante – où se trouve le patient – est spatialement limitée. Il est alors envisageable de concevoir un éclairage général à l'aide de luminaires identiques, disposés selon un calepinage régulier, puis de renforcer localement certaines zones par un éclairage d'appoint. Dans cette approche, c'est l'éclairement moyen minimal (500 lux) demandé par la norme qui guide le calepinage. L'éclairage général est assuré par des dalles encastrées ou des plafonniers, tandis que l'accentuation est réalisée au moyen d'une suspension située au-dessus du poste d'opération, comme illustré sur la Figure 12.

Simulations numériques et résultats

→ Niveaux d'éclairement et uniformité

Le calcul donne un résultat moyen de 522 lux et une uniformité générale $U_0 = 0,84$ sur l'ensemble de la pièce pour 25 luminaires installés. Les deux zones normatives sont distinctes (Cf. Figure 13). Les résultats montrent que :

- le niveau d'éclairement requis sur la zone « patient » n'est pas atteint ;
- le niveau d'éclairement moyen sur le bureau est quant à lui surdimensionné.

À partir de cette première configuration, l'éclairagiste peut optimiser l'installation pour satisfaire l'ensemble des exigences. Une solution consiste à réduire la puissance des luminaires assurant l'éclairage général, et ajouter un luminaire sus-

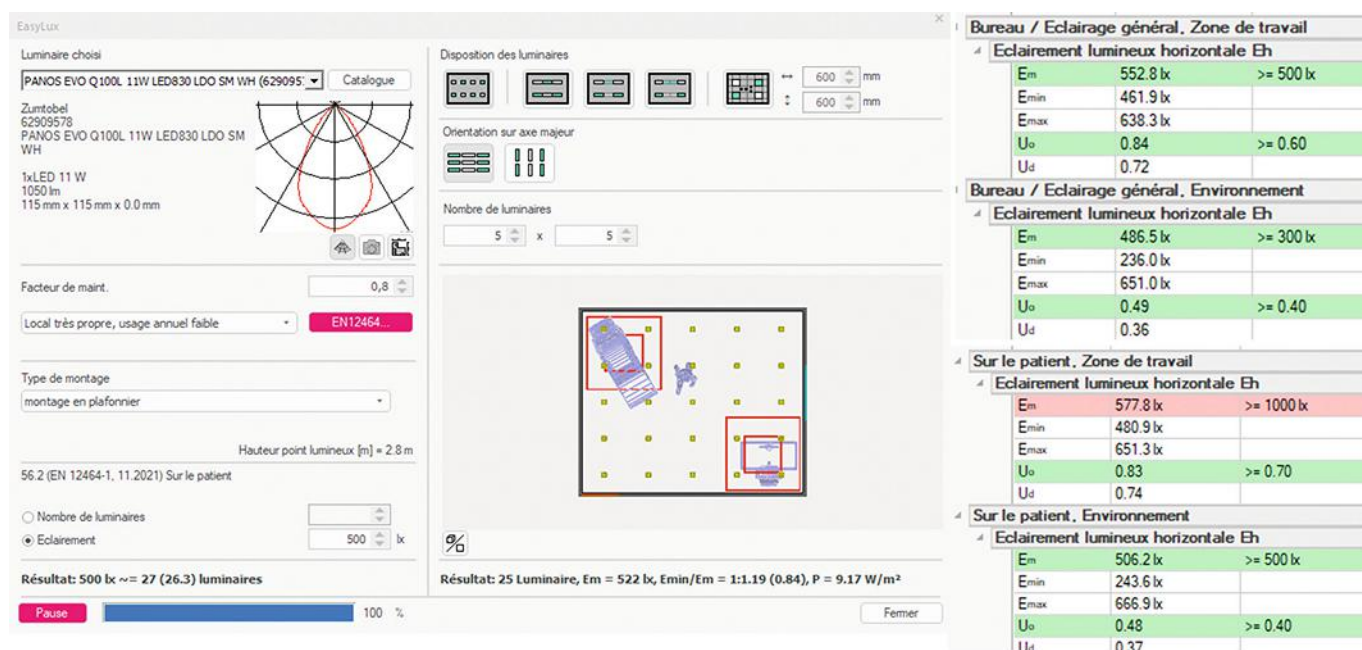
pendu à émission directe/indirecte au-dessus du poste opératoire. Cette solution et les résultats qui en découlent sont illustrés sur la Figure 14.

→ Éblouissement

Le capteur pour l'évaluation de l'éblouissement d'inconfort est positionné à la place du dentiste, et dirigé en direction du patient. L'activité du dentiste étant centrée sur le patient, le cône de vision sera cette fois pris avec un angle d'ouverture de 15° (Cf. Figure 15). L'indice R_{UGL} autour de cette

↓ FIGURE 12 Plusieurs zones distinctes dans un cabinet dentaire : champ opératoire, patient, circulation, bureau.





↑ FIGURE 13 Modélisation du cabinet dentaire (observation de deux zones distinctes).

À gauche : luminaire utilisé. Au centre : vue d'ensemble du local, et calepinage. À droite : résultats des calculs (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

Sur le patient, Zone de travail			
Eclairage lumineux horizontale Eh			
E _m	1002.8 lx	>= 1000 lx	
E _{min}	879.4 lx		
E _{max}	1063.5 lx		
U _o	0.88	>= 0.70	
U _a	0.83		
Sur le patient, Environnement			
Eclairage lumineux horizontale Eh			
E _m	807.5 lx	>= 500 lx	
E _{min}	437.3 lx		
E _{max}	1008.2 lx		
U _o	0.54	>= 0.40	
U _a	0.43		

FIGURE 14 ↑→

Ajout d'un éclairage d'appoint localisé au-dessus du patient (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

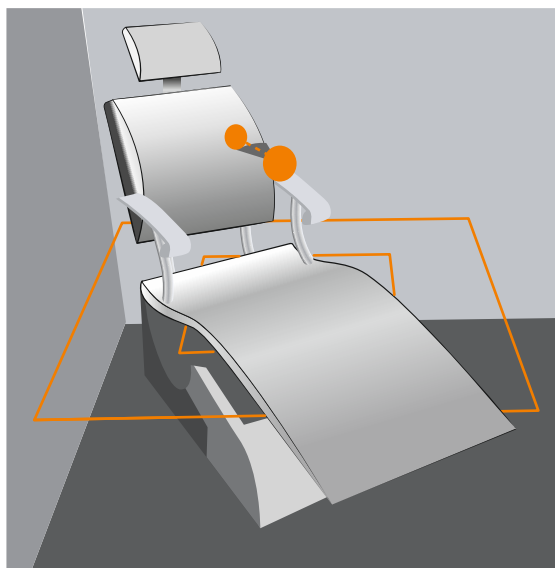
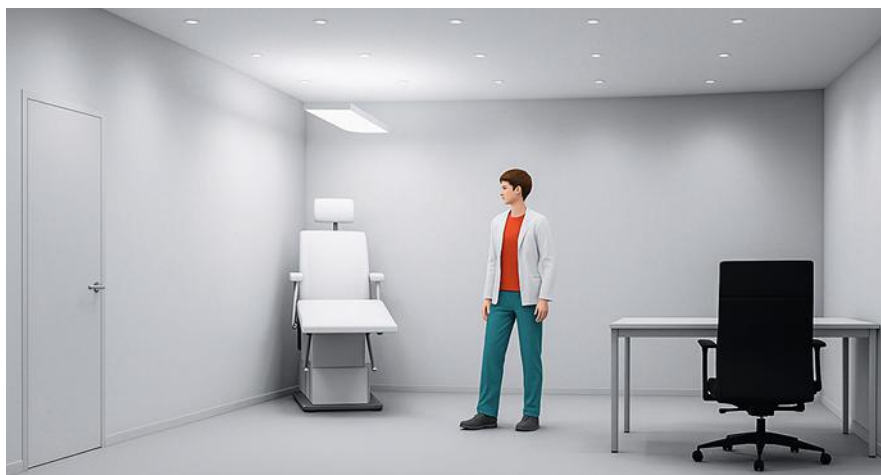


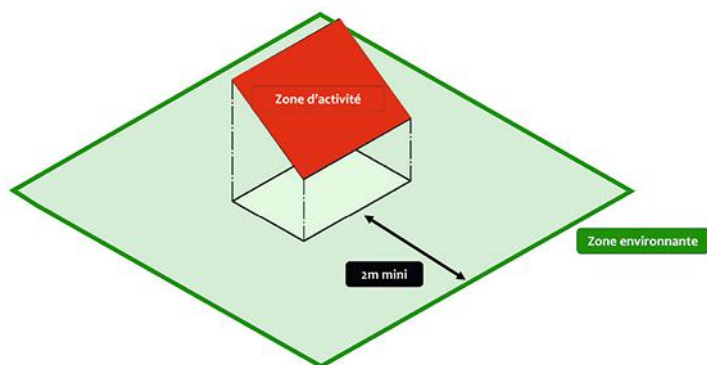
FIGURE 15 →
Point de vue et direction du regard utilisés pour estimer R_{UGL} (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

direction montre une valeur stable autour de 14,8, conforme aux objectifs fixés ($R_{UGL} \leq 19$).

Dernière étude de cas : quais de chargement d'un entrepôt industriel

Recueil des besoins, objectifs photométriques

Les lieux de travail extérieurs font l'objet de la norme NF EN 12464-2 en matière d'éclairage [7]. Le critère lié à l'éblouissement d'incapacité est revu, et adapté aux sites extérieurs : on parle d'indice R_{GL} . La logique de définition des zones à éclairer est conservée : la zone d'activité est identifiée (ici la zone de fret), et la zone environnante est son environnement immédiat (Cf. Figure 16). Comme pour la norme NF EN 12464-1, la norme NF EN 12464-2 classe les zones de travail en fonction de la difficulté de la tâche visuelle. Les « sites industriels et aires de stockage » sont traités



tés dans le tableau 5.7 de la norme (Cf. Tableau 6), qui précise les exigences en matière d'uniformité, de rendu des couleurs et de limitation de l'éblouissement.

Comme précédemment, ces objectifs sont pris en compte dans les logiciels de simulation d'éclairage. La norme NF EN 12464-2 [7] préconise de maintenir sur la zone d'activité un éclairage moyen horizontal de 20 lux et une uniformité générale $U_0 \geq 0,25$, et sur la zone environnante un éclairage moyen horizontal de 20 lux et une uniformité générale $U_0 \geq 0,40$.

Choix et implantation des luminaires

Le choix des luminaires doit s'orienter vers un modèle extérieur, conçu pour résister aux infiltrations d'eau et de poussière. Ce niveau de protection est indiqué par l'indice de protection IP : un luminaire d'extérieur présente généralement une valeur minimale de IP66. Le premier chiffre indique la protection contre les corps solides (poussières), le second les liquides. IP66 signifie une étanchéité totale à la poussière et une protection contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer. Pour le quai de chargement sont retenus des projecteurs extérieurs, avant tout pour leur efficacité lumineuse élevée et leurs multiples possibilités de

fixation (sur mât, lyre, ou directement en façade) : l'ensemble du site pourra ainsi être équipé avec le même modèle.

Simulations numériques, résultats

Les luminaires sont implantés en façade. Les calculs (Cf. Figure 17) montrent que les objectifs d'éclairage sont atteints, mais qu'une légère insuffisance d'uniformité générale U_0 subsiste sur la zone environnante. La valeur maximale de l'indice d'éblouissement d'inconfort R_{GL} atteint 38,8, inférieur aux 55 exigés.

La norme définit la zone environnante comme une bande d'au moins 2 m de large, située au-delà de la zone de travail (Cf. Figure 17). La vue en fausses couleurs révèle un déficit d'éclairage aux endroits les plus éloignés des luminaires. Pour améliorer l'uniformité, plusieurs solutions peuvent être envisagées : choisir des luminaires ayant une distribution d'intensité plus asymétrique vers l'avant, augmenter la hauteur de feu, ou encore, ajouter des mâts en périphérie de cette zone. Cette dernière solution est retenue (Cf. Figure 18).

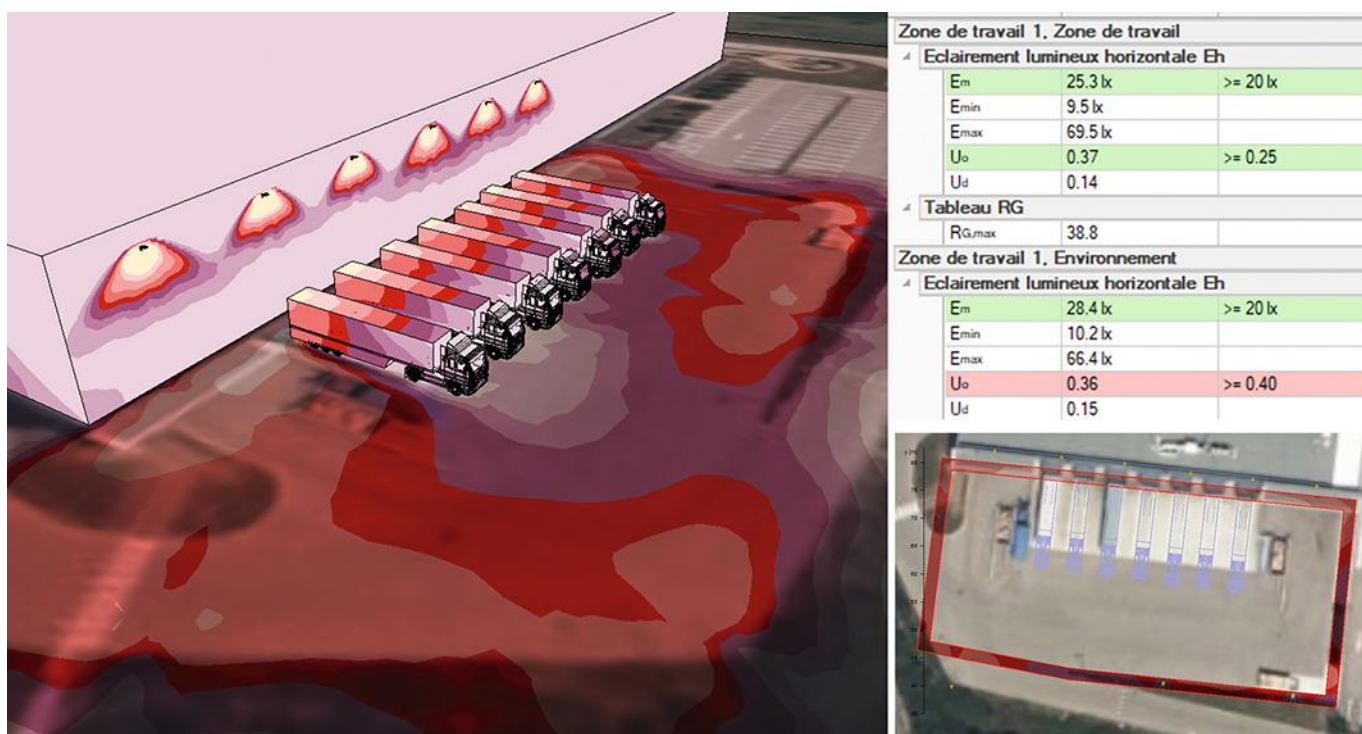
Une nouvelle simulation (Cf. Figure 19) montre que l'uniformité préconisée par la norme NF EN 12464-2 est atteinte, tout en conservant un éclairage suffisant. La puissance des luminaires utilisés

↑ FIGURE 16
À gauche, définition des zones d'activité et environnantes. À droite, application aux quais de chargement à éclairer (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

N° DE RÉF.	TYPE DE ZONE, DE TÂCHE ET D'ACTIVITÉ	E_m (lx)	U_0	R_{GL}	R_a	EXIGENCES SPÉCIFIQUES
5.7.1	Manutention de courte durée d'éléments de taille importante et de matériaux bruts, chargement et déchargement de marchandises en vrac	20	0,25	55	20	
5.7.2	Manutention continue d'éléments de taille importante et de matériaux bruts, chargement et déchargement du fret, emplacements de manœuvre des grues, plateformes ouvertes de chargement	50	0,40	50	20	
5.7.3	Lecture d'adresses, plateformes couvertes de chargement, utilisation d'outils, tâches courantes d'armaturage et de bétonnage dans les centrales à béton	100	0,50	45	20	
5.7.4	Installations électriques, de machines et de canalisations nécessitant un éclairage important, inspection	200	0,50	45	60	Utiliser un éclairage localisé

← TABLEAU 6
Extrait de la norme NF EN 12464-2 : objectifs photométriques des sites industriels et aires de stockage.





↑ **FIGURE 17**
Simulation de l'éclairage du quai de chargement (à gauche) et de son environnement (en bas à droite). En haut à droite : résultat des calculs (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

peut même être revue à la baisse pour optimiser parfaitement le projet.

Il convient de rappeler que les sites extérieurs sont concernés par l'arrêté du 27 décembre 2018 sur les nuisances lumineuses [8], avec un ensemble d'obligations (limitation de l'émission de lumière vers l'hémisphère supérieur, température de couleur, etc.).

Contrôle et mesure des installations

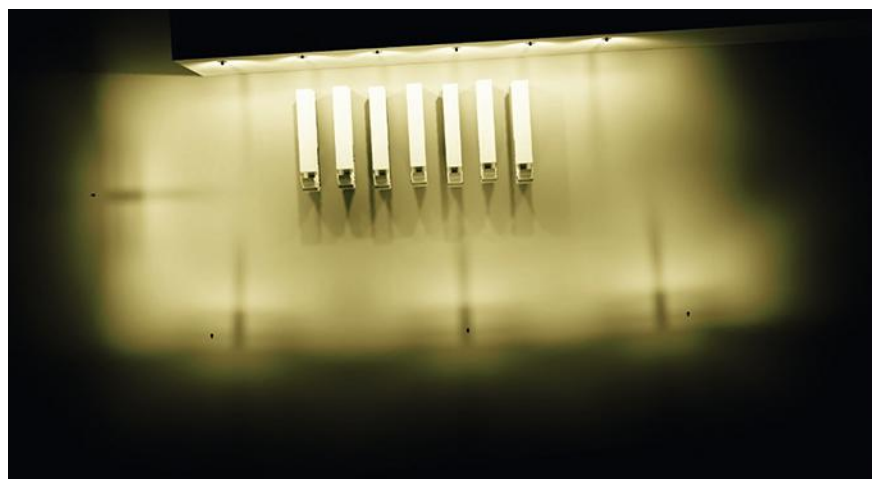
Pour s'assurer qu'une installation neuve ou existante apporte une lumière adaptée à l'activité, il

est nécessaire de réaliser des mesures photométriques. Ces vérifications permettent à la fois de contrôler la conformité réglementaire et de confirmer le respect du cahier des charges, défini en fonction des tâches, du local et du profil des salariés.

Les mesures sont réalisées à l'aide d'appareils spécifiques. Le luxmètre permet de quantifier l'éclairage sur les zones d'intérêt, qu'il s'agisse de la zone d'activité, de la zone adjacente ou de la zone de fond, ainsi que dans les circulations, sur les

FIGURE 18 →
Ajout de luminaires complémentaires (traits jaunes) pour éclairer la zone environnante (traits rouges) (logiciel utilisé : ReluxDesktop).





Résultat	Valeur	Valeur cible
Zone de travail 1, Zone de travail		
Eclairage lumineux horizontale Eh		
Em	24.1 lx	>= 20 lx
Emin	11.1 lx	
Emax	64.2 lx	
Uo	0.46	>= 0.25
Ud	0.17	
Tableau RG		
RGmax	40.5	
Zone de travail 1, Environnement		
Eclairage lumineux horizontale Eh		
Em	25.9 lx	>= 20 lx
Emin	10.9 lx	
Emax	61.3 lx	
Uo	0.42	>= 0.40
Ud	0.18	

murs ou au plafond. Le luminancemètre mesure la luminance et permet d'évaluer les contrastes entre zones voisines. L'indice d'éblouissement peut être déterminé à l'aide d'un UGR-mètre, qui exploite des images en fausses couleurs de luminance, et qui peut, dans certains cas, se substituer au luminancemètre. Pour caractériser la qualité spectrale des sources, le spectroradiomètre mesure la répartition spectrale et permet de déduire la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs. Enfin, l'analyseur de flicker sert à évaluer la modulation temporelle de la lumière et à identifier d'éventuels effets de papillotement ou de stroboscopie.

Ces contrôles peuvent être confiés à différents acteurs. Dans le cadre d'une installation neuve ou d'une rénovation, la maîtrise d'œuvre peut s'appuyer sur un bureau d'études spécialisé ou sur le fournisseur du matériel. Ils peuvent également être réalisés par des organismes de contrôle indépendants, garants d'une évaluation objective, ou par les services de prévention et de santé au travail qui effectuent des vérifications ponctuelles. Les centres de mesures physiques des Carsat/Cramif peuvent également intervenir dans le cadre de vérifications ponctuelles. Enfin, il est recommandé d'intégrer ces mesures dans un plan de maintenance périodique, comprenant le nettoyage des luminaires, le remplacement des sources et la vérification régulière des performances lumineuses, afin de garantir la pérennité de la qualité d'éclairage dans le temps.

Conclusions

Ces trois exemples montrent comment concevoir un éclairage artificiel adapté à un espace de travail. Cette démarche commence par l'analyse des besoins visuels, la définition des zones de travail et des zones environnantes, et la détermination des objectifs photométriques en lien avec les exigences normatives et réglementaires.

À l'aide d'un logiciel dédié ont été simulées différentes configurations pour valider le choix des luminaires, leur implantation, ainsi que leur puissance. Le processus s'est déroulé de manière itérative : une première modélisation permet d'identifier les insuffisances éventuelles (niveau d'éclairage, uniformité, éblouissement), puis l'installation est optimisée étape par étape.

Enfin, des dispositifs de gradation peuvent être intégrés à la conception pour tirer parti de la lumière naturelle, s'adapter à l'occupation réelle des lieux, et réduire la consommation énergétique tout en améliorant le confort visuel. ●

1. Les dispositions spécifiques relatives au travail sur écran sont détaillées sur le site de l'INRS : <https://www.inrs.fr/risques/travail-ecran/ce-qu-il-faut-retenir.html>

↑ **FIGURE 19**
Simulation d'éclairage sur une implantation adaptée pour un éclairage uniforme de la zone environnant la zone d'activité (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **NORME NF EN 12464-1** – Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail. Partie 1 : lieux de travail intérieurs. Afnor, 2021. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).
- [2] **GRONFIER C.** – Physiologie de l'horloge circadienne endogène : des gènes horloges aux applications cliniques. *Médecine du sommeil*, 2009, 6, pp. 3-11. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.msom.2009.02.002>
- [3] **ARRÊTÉ DU 22 MARS 2017** modifiant l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [4] **MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE / CENTRE D'ÉTUDES ET D'EXPERTISE SUR LES RISQUES, L'ENVIRONNEMENT, LA MOBILITE ET L'AMENAGEMENT (CEREMA)** – Réglementation environnementale des bâtiments neufs (RE-2020). Accessible sur : <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/re2020-r320.html>
- [5] **SITE RELUXNET.** Accessible sur : <https://reluxnet.relux.com/>
- [6] **DIALUX – DIAL** – Lighting design software DIALux. Accessible sur : <https://www.dial.de/en/dialux/>
- [7] **NORME NF EN 12464-2** – Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail. Partie 2 : lieux de travail extérieurs. Afnor, 2024. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).
- [8] **ARRÊTÉ DU 27 DÉCEMBRE 2018** relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr

EFFETS NON VISUELS DE LA LUMIÈRE

La lumière ne se limite pas à ses effets visuels. Si elle peut avoir des effets délétères sur l'appareil visuel, elle agit également sur l'organisme par des mécanismes physiologiques non visuels, liés à la stimulation de certaines cellules de la rétine influant sur le système nerveux et hormonal. Ainsi, la lumière qui entre dans l'œil n'est pas seulement perçue comme une couleur ou une intensité : elle peut aussi influencer la santé et la vigilance. Ce dernier article traite des risques photobiologiques et de la synchronisation de l'horloge biologique par la lumière.

DINA ATTIA
Direction de
l'évaluation
des risques,
Agence nationale
de sécurité
sanitaire, de
l'alimentation, de
l'environnement
et du travail
(Anses)

Effets photobiologiques liés aux rayonnements optiques visibles

En fonction de la composition spectrale de la lumière, de la puissance de la source, de la distribution spatiale des intensités lumineuses et de la durée d'exposition, les salariés peuvent être soumis à des risques photobiologiques. Ceux-ci se traduisent notamment par des lésions thermiques (brûlures de la peau ou de la rétine, liées à une forte intensité lumineuse), ou des effets photochimiques sur la rétine.

Le risque photochimique existe pour le domaine de longueur d'onde allant de 300 nm à 700 nm, et atteint son maximum dans la région bleue du spectre (Cf. Figure 1). C'est pourquoi on parle fréquemment de « risque lumière bleue ».

L'évaluation de ce risque repose sur la comparaison entre une « dose efficace » reçue et une valeur limite d'exposition (VLE), en dessous de laquelle aucun effet nocif n'est démontré. Cette dose correspond à l'éclairement énergétique pondéré par la courbe d'efficacité spectrale $B(\lambda)$, noté E_B , multiplié par le temps d'exposition. La VLE peut ainsi être dépassée en un temps très court si la source est très puissante, ou après un temps plus long si la source l'est moins. Le site Internet de l'INRS propose un dossier spécifique pour approfondir le sujet [1].

Dans la majorité des cas, les luminaires utilisés pour l'éclairage des lieux de travail ne présentent pas de danger pour les salariés, d'autant moins que les réflexes d'aversion¹ limitent naturellement le risque d'exposition dangereuse [2]. Toutefois, certaines sources particulières, comme les projecteurs de poursuites utilisés dans l'audiovisuel, peuvent engendrer un risque accru d'exposition à la lumière bleue.

Avant de choisir un luminaire, il est essentiel de s'informer sur son niveau de dangerosité. La norme NF EN 62471 fournit une méthode normalisée d'évaluation des risques photobiologiques associés aux lampes et appareils utilisant des lampes [3]. Elle conduit au classement des produits en quatre groupes de risques, suivant leur dangerosité :

- groupe sans risque (GR0) : la source ne présente aucun risque photobiologique ; concernant le risque lumière bleue, elle ne présente pas de risque rétinien pour une exposition de 10 000 secondes ;
- groupe de risque 1 (GR1) : risque faible. La source ne présente pas de risque dans des conditions normales d'utilisation. Elle excède les limites du groupe sans risque, mais ne présente pas de risque rétinien pour une exposition de 100 secondes ;
- groupe de risque 2 (GR2) : risque modéré. La source ne présente pas de risque dans un temps inférieur à la réponse d'aversion si sa luminance est élevée, ou en raison de l'inconfort thermique ressenti. Elle excède les limites du groupe de risque 1, mais ne présente pas de risque rétinien pour une exposition de 0,250 seconde (réflexe optico-papébral) ;
- groupe de risque 3 (GR3) : risque élevé. Les valeurs limites d'exposition sont dépassées même pour une exposition brève.

La norme NF EN 62471 est une norme harmonisée au titre de la directive « basse tension » [4]. À ce titre, tout produit mis sur le marché doit avoir été évalué conformément à cette norme, et le fabricant doit en connaître le groupe de risque photobiologique. Cette information doit pouvoir être fournie par le fabricant ou le distributeur sur demande.

Enfin, la norme NF EN IEC 62471-7, spécifiquement adaptée aux sources et luminaires destinés à l'éclairage, complète ce dispositif [5]. Elle regroupe les luminaires en fonction de leur application et de leur durée d'observation possible.

Synchronisation de l'horloge biologique par la lumière

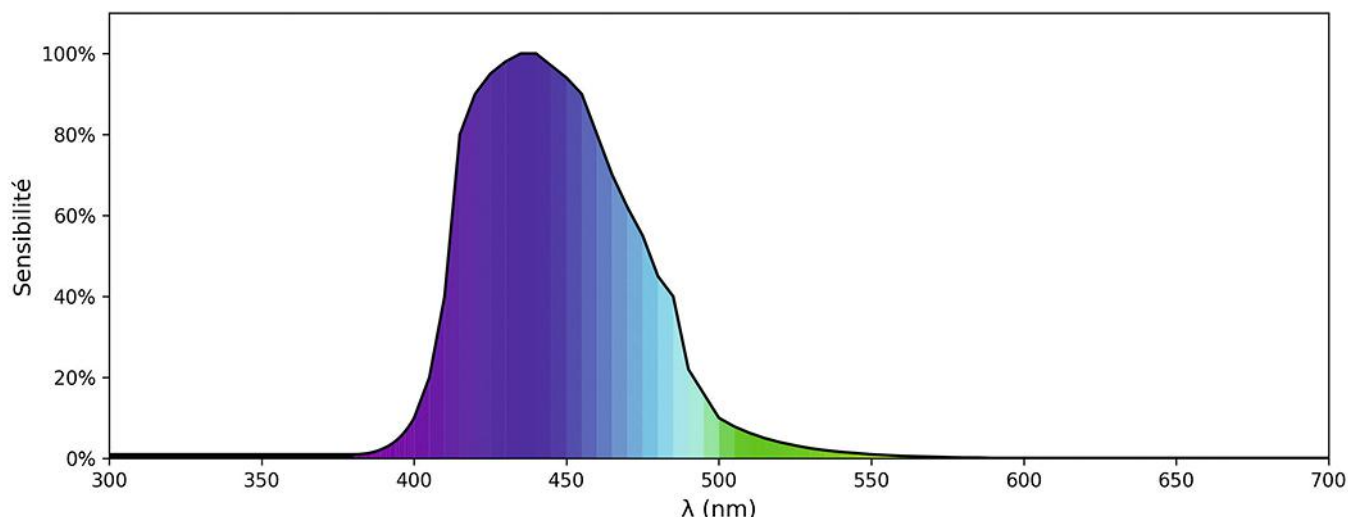
L'horloge biologique

L'être humain possède une horloge biologique interne [6] qui régule de nombreux processus physiologiques selon un rythme d'environ 24 heures, appelé rythme circadien. Cette horloge centrale, accompagnée par des horloges périphériques, organise différentes fonctions du corps (température corporelle, sécrétions hormonales, niveaux de vigilance, métabolisme, etc.) afin de prépa-

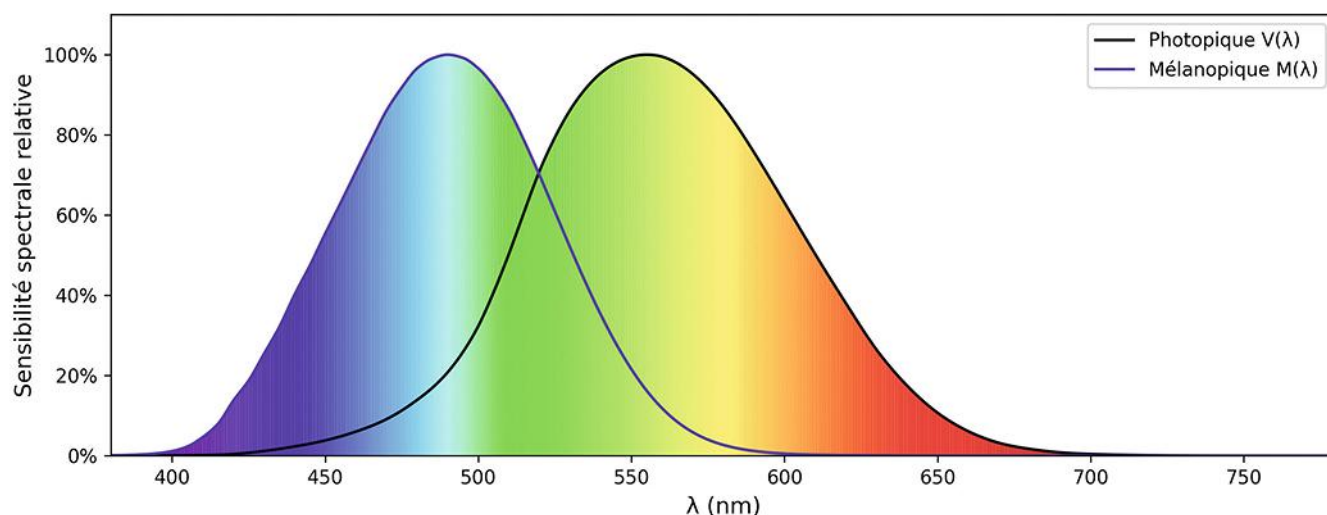
rer l'organisme aux activités de la journée ou au repos nocturne.

Cette horloge est située dans le cerveau, au niveau du noyau suprachiasmatique de l'hypothalamus. Elle fonctionne de manière autonome avec une période légèrement différente de 24 heures et doit donc être remise à l'heure quotidiennement par l'environnement extérieur, afin d'être synchronisée sur 24 heures exactement et de garantir une physiologie en harmonie : que chaque rythme soit exprimé au bon moment.

Le principal facteur (ou synchroniseur) qui permet cette mise à l'heure est la lumière, dont l'alternance jour/nuit constitue le signal le plus puissant. La lumière reçue par l'œil n'est donc pas uniquement utilisée pour la vision. Certaines cellules particulières de la rétine, appelées cellules



↑ FIGURE 1 Courbe d'efficacité $B(\lambda)$ du rayonnement optique sur la rétine, pour les effets photochimiques.



↑ FIGURE 2 Courbes de sensibilités relatives à la lumière des cellules responsables de la vision $V(\lambda)$ et de la synchronisation de l'horloge biologique $M(\lambda)$.





© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2020

ganglionnaires à mélanopsine², transmettent, *via* des voies non visuelles spécifiques, l'information d'exposition lumineuse vers les zones cérébrales responsables de la régulation circadienne. Elles sont particulièrement sensibles aux longueurs d'onde courtes (480 nm environ), c'est-à-dire à la composante bleue de la lumière.

Une exposition lumineuse adaptée en journée permet de maintenir une bonne synchronisation de l'horloge biologique et d'exprimer les rythmes biologiques au bon moment : elle favorise la vigilance, les performances cognitives, etc. À l'inverse, une exposition inappropriée (travail de nuit ou en horaires atypiques³, locaux sans fenêtres et avec un éclairage artificiel déficient, usage prolongé d'écrans en soirée) peut dérégler ce système, entraînant à terme des troubles et des pathologies [7,8].

Éclairage mélanopique

La sensibilité des photorécepteurs de la rétine impliqués dans la vision suit la courbe photopique $V(\lambda)$, dont le maximum se situe à 555 nm dans le vert-jaune (Cf. Article pp. 30-39). Les cellules ganglionnaires à mélanopsine ont quant à elles un pic de sensibilité à 480 nm dans le bleu turquoise.

L'éclairage lumineux, exprimé en lux, correspond à la puissance d'un rayonnement optique reçu par une surface, pondéré par la fonction de sensibilité visuelle $V(\lambda)$. De manière analogue, il est possible de définir un éclairage mélanopique, également exprimé en lux mélanopiques, cette fois pondéré par la fonction de sensibilité $M(\lambda)$ (Cf. Figure 2).

Cette grandeur complémentaire permet d'évaluer et de comparer l'effet d'un rayonnement optique sur la synchronisation de l'horloge biologique.

La norme CIE S 026/E définit l'ensemble des métriques nécessaires pour comparer les différents rayonnements optiques selon leurs effets non visuels [9]. Elle introduit notamment l'EDI mélanopique (*equivalent daylight D65 illuminance*), c'est-à-dire l'éclairage équivalent à celui produit par un illuminant D65, qui représente la lumière du jour normalisée et qui produit le même effet mélanopique que la source étudiée.

Le deuxième atelier international sur la photométrie circadienne et neurophysiologique, qui s'est tenu en 2019 et qui a réuni les experts sur le sujet, a abouti en 2022 au consensus suivant sur des recommandations d'éclairage mélanopique [10] :

- éclairage diurne : le niveau recommandé est

d'au moins 250 lux EDI mélanopiques, mesurés à hauteur d'œil en position assise. La lumière naturelle doit être privilégiée pour atteindre ce niveau. En cas d'éclairage artificiel complémentaire, la lumière blanche polychromatique devrait idéalement présenter un spectre enrichi en courtes longueurs d'onde, comme celui de la lumière du jour ;

- éclairage en soirée : à partir d'environ 3 heures avant le coucher, le niveau recommandé est d'au plus 10 lux EDI mélanopiques, mesurés à hauteur d'œil. Pour cela, l'éclairage devrait, autant que possible, présenter un spectre appauvri en courtes longueurs d'onde, donc être de teinte chaude ;
- éclairage nocturne : l'environnement de sommeil doit rester aussi sombre que possible. Le niveau recommandé est d'au plus 1 lux EDI mélanopique ambiant.

Ces recommandations s'appliquent à des adultes en bonne santé, âgés de 18 à 55 ans et ayant un rythme de veille diurne et de sommeil nocturne régulier. Il convient de noter qu'il n'existe, à ce jour, ni réglementation spécifique ni norme française sur ce sujet.

Application au travail de nuit et posté

Un dossier complet, relatif au travail de nuit et posté, est déjà paru dans ces colonnes [11]. À ce jour, aucune recommandation n'existe concernant les niveaux d'éclairage à apporter aux travailleurs de nuit ou postés : les données scientifiques ne permettent pas encore d'établir des seuils fiables et spécifiques, ni des moments opportuns d'exposition. Cette absence de consensus est liée à la grande complexité d'action de la lumière sur l'horloge circadienne. Il existe une courbe de réponse de phase à la lumière : c'est-à-dire qu'en fonction du moment d'exposition, les effets sur l'horloge seront différents. Certains résultats expérimentaux suggèrent qu'une augmentation de l'éclairement mélanopique sur le lieu de travail pendant la première partie de nuit améliore la vigilance et la performance des salariés pendant le travail de nuit et favorise un sommeil de qualité après le travail. Mais ces résultats sont à généraliser avec précaution car, outre l'exposition pendant la nuit, c'est l'exposition à la lumière durant les 24 heures qui va favoriser ou entraver l'adaptation au travail de nuit. Le problème du travailleur de nuit n'est pas lié au manque de lumière, mais au cycle lumière-obscurité, l'exposition à la lumière est irrégulière et directement liée aux cycles de travail, donc variable [12].

Conclusion

L'éclairage des lieux de travail repose aujourd'hui essentiellement sur des critères visuels et sur la

prévention des risques photobiologiques, encadrés par la norme NF EN 62471. Les recherches récentes ont toutefois montré que la lumière influence aussi la santé et la vigilance par des mécanismes non visuels, mesurés notamment à travers l'éclairement mélanopique. Des recommandations internationales existent désormais pour la population générale adulte, mais elles ne sont pas encore traduites en normes ou en réglementation en France.

Dans ce contexte, la conception de l'éclairage doit continuer à garantir la sécurité et la performance visuelle, tout en s'appuyant sur les connaissances scientifiques disponibles pour limiter les risques et assurer la santé des salariés. ●

1. Aversion (physiologique) : détournement du regard dans le cas d'une source trop éblouissante, ou retrait du corps près d'une source de chaleur brûlante.

2. Ou ipRGC : en anglais intrinsically photosensitive retinal ganglion.

3. Voir : <https://www.inrs.fr/actualites/travail-nuit.html>

BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS – Rayonnements optiques. Ce qu'il faut retenir. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-optiques/ce-qu-il-faut-retenir.html>

[2] INRS – Rayonnements optiques. Éclairage à led. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-optiques/eclairage-led.html>

[3] NORME NF EN 62471 – Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. Afnor, 2008. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).

[4] DIRECTIVE 2014/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014. Accessible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0035&from=FR>

[5] NORME NF EN IEC 62471-7 – Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes - Partie 7 : sources de lumière et luminaires qui émettent principalement un rayonnement visible. Afnor, 2023. Accessible sur : www.boutique.afnor.org (site payant).

[6] GRONFIER C. – Physiologie de l'horloge circadienne endogène : des gènes horloges aux applications cliniques. *Médecine du sommeil*, 2009, 6, pp. 3-11. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.msom.2009.02.002>

[7] ANSES – Évaluation des risques sanitaires liés au travail de nuit. Anses, 2016. Accessible sur : <https://www.anses.fr/sites/default/files/AP2011SA0088Ra.pdf>

[8] ANSES – Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (led). Anses, 2019. Accessible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/led-et-lumi%C3%A8re-bleue>

[9] CIE S 026/E:2018 – CIE system for metrology of optical radiation for ipRGC-influenced responses to light. CIE, 2018. Accessible sur : <https://doi.org/10.25039/S026.2018>

[10] BROWN T.M. ET AL. – Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. *PLOS Biology*, 2022, 20, e3001571. Accessible sur : <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>

[11] GAUTIER M., WEIBEL L. ET AL. – Travail de nuit et posté : état des connaissances et prévention en milieu professionnel. *Hygiène & sécurité du travail*, 270, D0 39, pp. 21-58. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=D0%2039>

[12] GRONFIER C. – Lumière : régulation du système circadien et du sommeil. 2021 [consulté en septembre 2025]. Accessible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=dgJJ5NB9bwI>