

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.

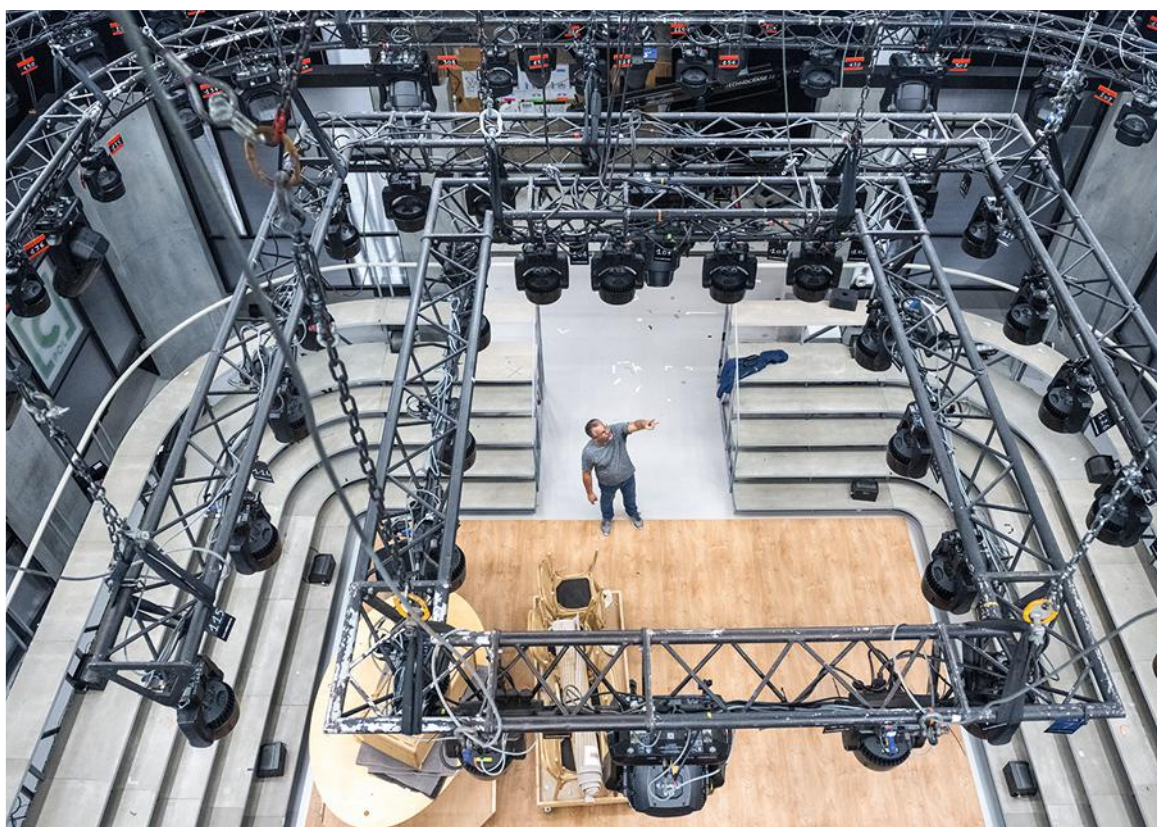
**MAXIME
VAN DER HAM**
Sarese
(bureau
d'études
réseaux,
éclairage) /
Institut de
formation
à l'éclairage
professionnel
(IFEP)

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

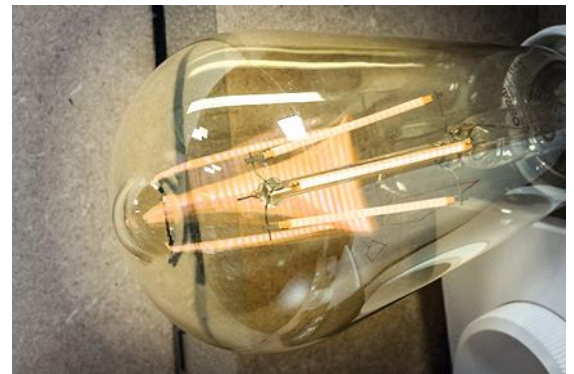
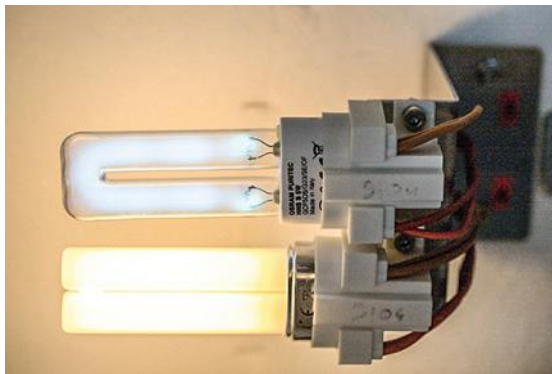
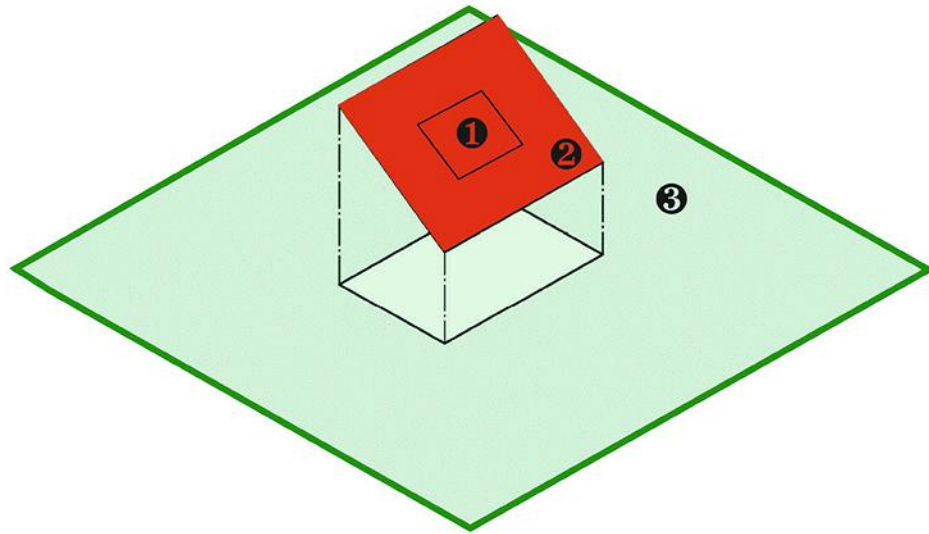
Une bonne installation d'éclairage intérieur doit réduire le risque d'accident, tout en répondant à trois exigences : fonctionnalité, en lien avec la difficulté de la tâche visuelle ; ergonomie, en assurant un confort visuel adapté à l'environnement lumineux ; et économie, en maîtrisant les coûts d'installation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

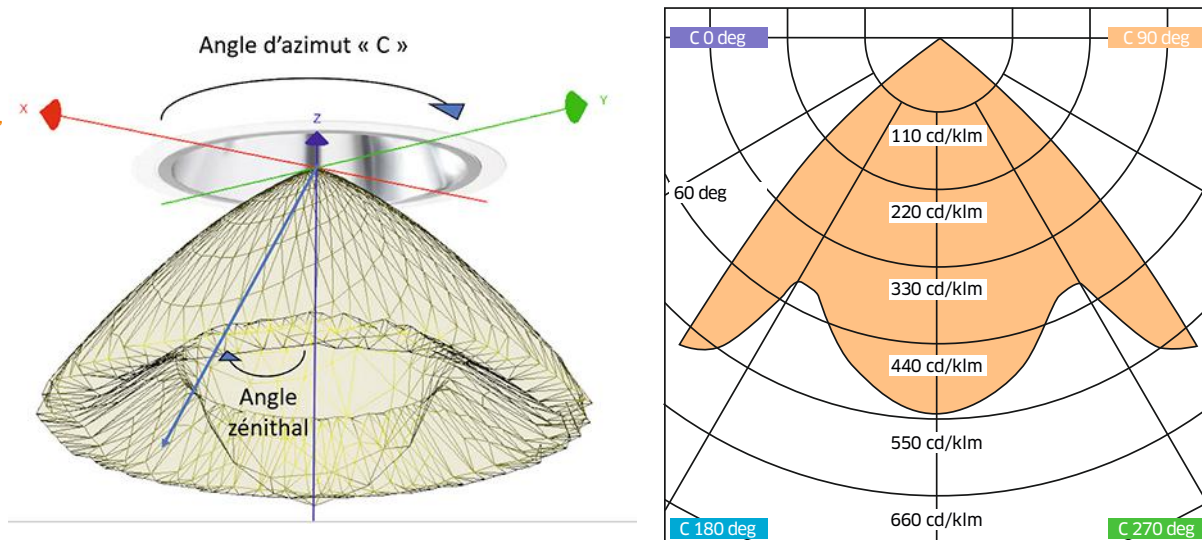
Une fois la source choisie pour la qualité de la lumière qu'elle délivre vis-à-vis de l'activité, le luminaire est sélectionné selon plusieurs critères : sa distribution spatiale d'intensité lumineuse, qui définit la forme du faisceau lumineux, son implantation possible dans le lieu de travail (encastré, 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



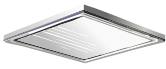


Lors de la conception, l'éclairagiste (*i.e.*, le professionnel en charge de l'étude d'éclairage) doit tenir compte de la dépréciation du flux lumineux dans le temps à partir des données disponibles (fournisseur, environnement thermique, empoûssièrement du local, étanchéité des luminaires choisis, etc.). 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'éclairage et d'uniformité sur la zone d'activité, de rendu des couleurs Ra et d'éblouissement R_{UGL} . En complément, la norme spécifie également des niveaux d'éclairage 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] :

TABLEAU 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)							
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]).

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

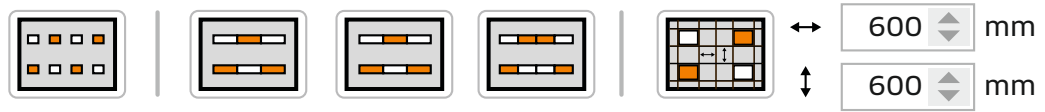
Dans un bureau, caractériser les trois zones (activité, environnement, fond) est assez simple car l'espace est souvent centré autour du bureau (zone d'activité unique). En cas de zones d'activité multiples (poste d'opération d'une part, et bureau

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



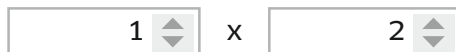
Disposition des luminaires



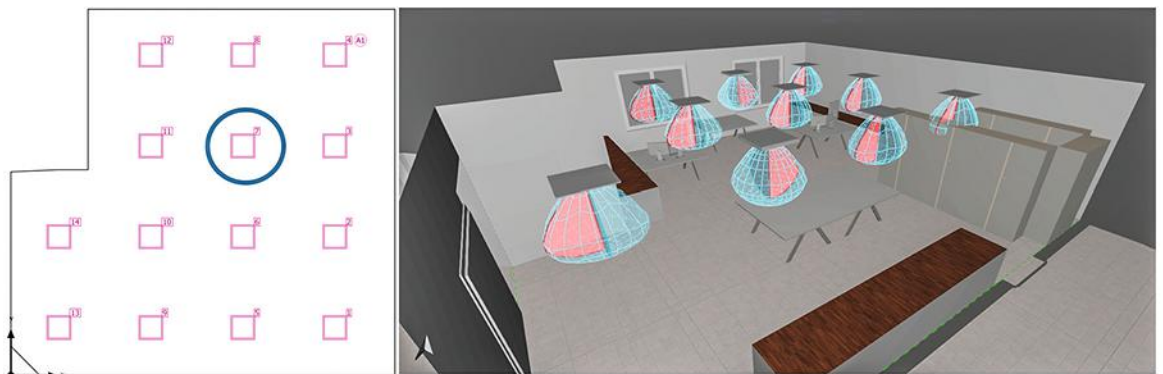
Orientation sur axe majeur



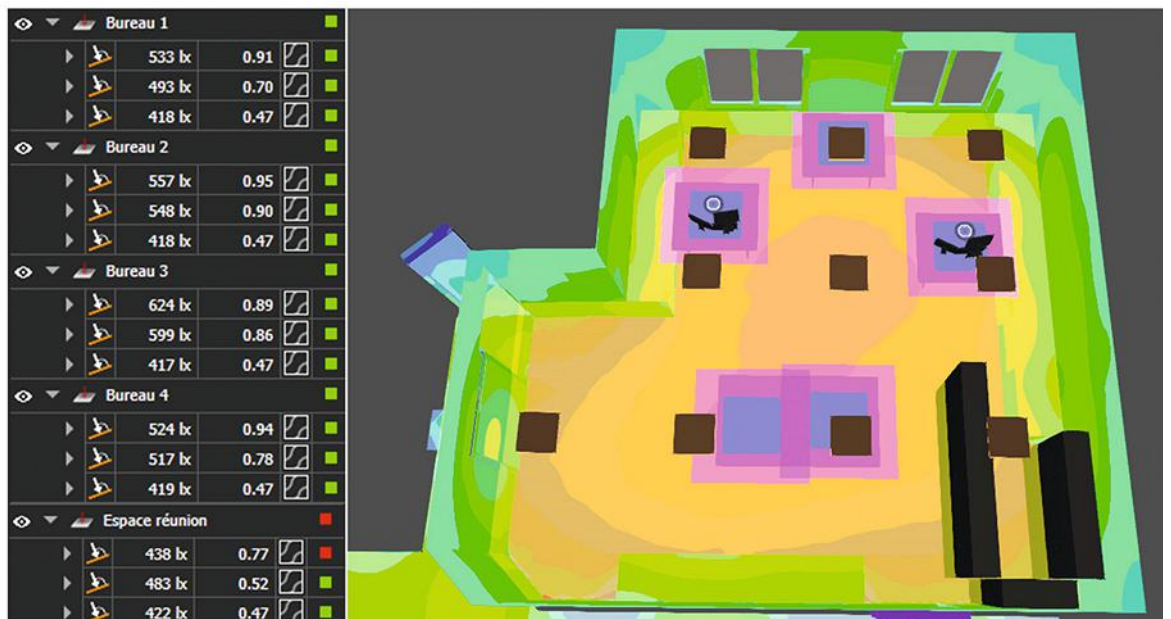
Nombre de luminaires



↑ 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

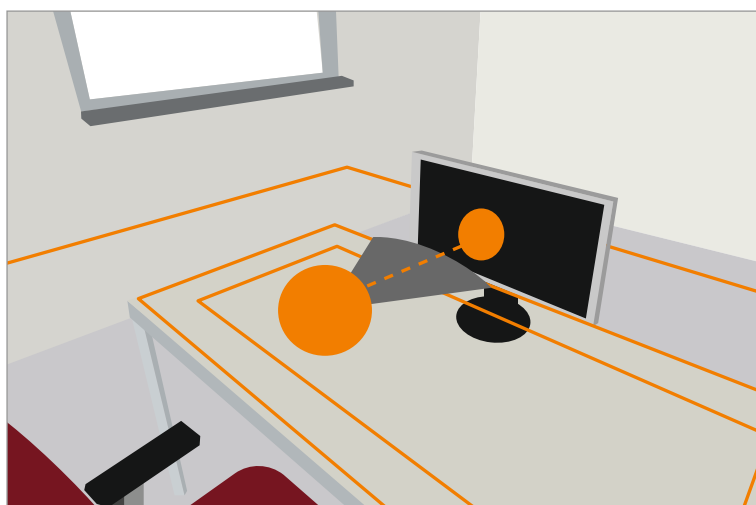
La *Figure 7* présente, à droite, les niveaux d'éclairage obtenus dans le local sous forme de fausses couleurs. À gauche figurent les éclairages moyens et les uniformités calculés pour chaque poste (bureau 1 à 4 et espace réunion) et pour chaque zone cible (zone d'activité, zone environnante et zone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

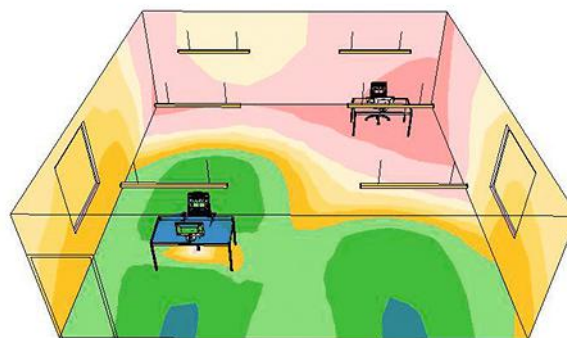
→ Éblouissement

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

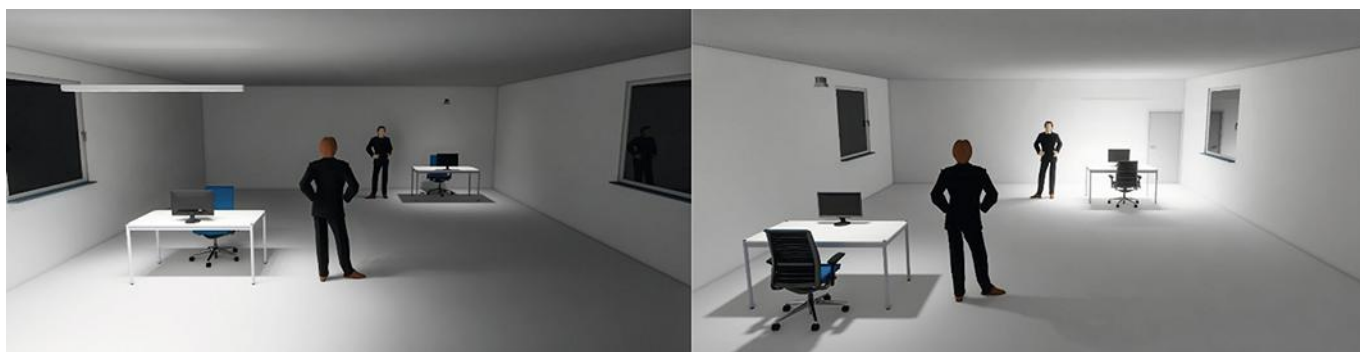


↑ FIGURE 8 Capteur virtuel d'éblouissement R_{UGL} dans le modèle 3D du projet d'éclairage (logiciel utilisé : ReluxDesktop).



↑ 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



© Benyamin Bohioui / Unsplash

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 ± 30° 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_o	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	1000	1500	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).

Utilisation	$E_{m,r}$	$E_{m,u}$	U_o	R_{UGL}	R_a	$E_{m,mur}$	$E_{m,plafond}$	$E_{m,z}$	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'éclairage 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'éclairage et uniformité

Le calcul donne un résultat moyen de 522 lux et une uniformité générale $U_o = 0,84$ 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'éclairage requis sur la zone « patient » n'est pas atteint ;
- le niveau d'éclairage 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-

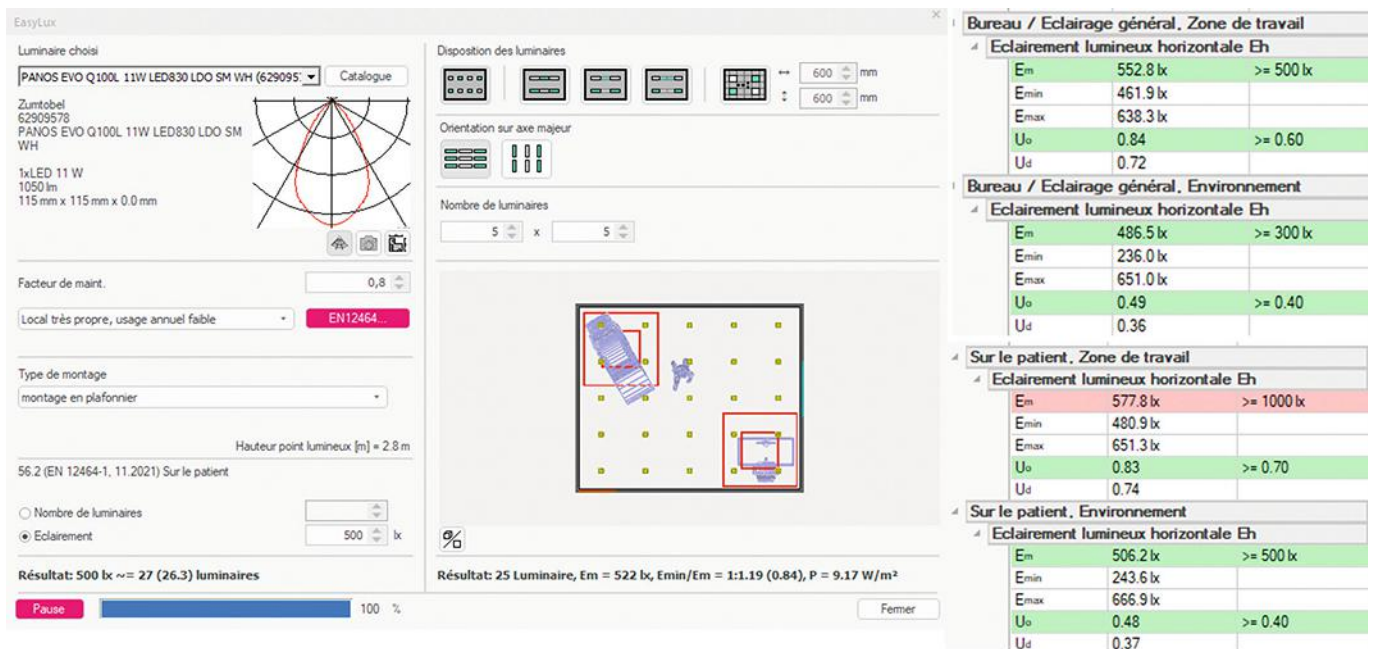
pendu à émission directe/indirecte au-dessus du poste opératoire. Cette solution et les résultats qui en découlent sont illustrés sur la Figure 14.

→ 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 _d	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 _d	0.43		

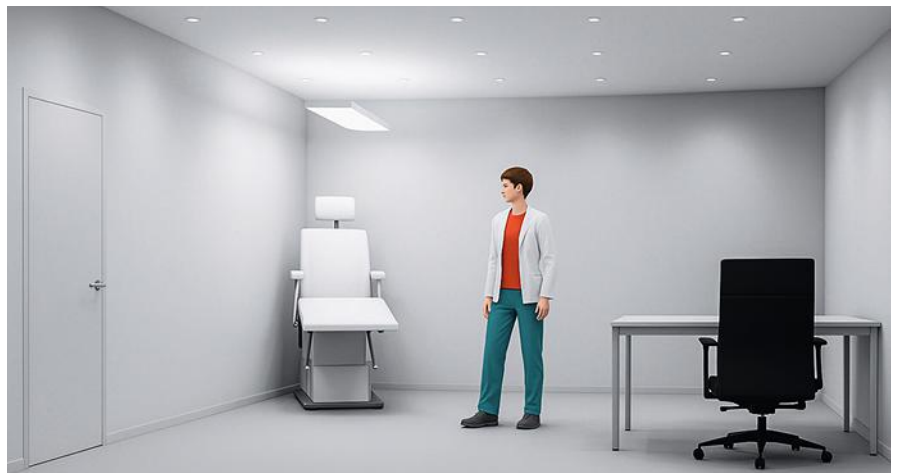


FIGURE 14 ↑→
 Ajout d'un éclairage d'appoint localisé au-dessus du patient (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

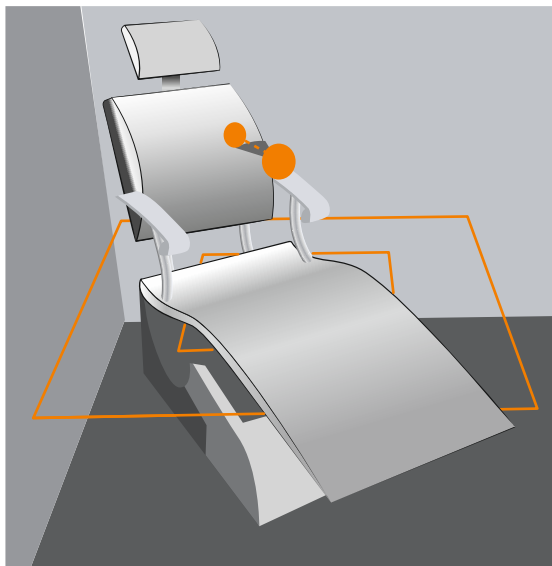


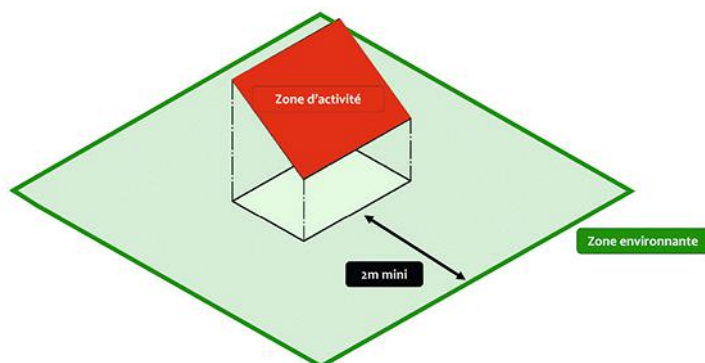
FIGURE 15 →
 Point de vue et direction du regard utilisés pour estimer R_{UGL} (logiciel utilisé : ReluxDesktop).

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).

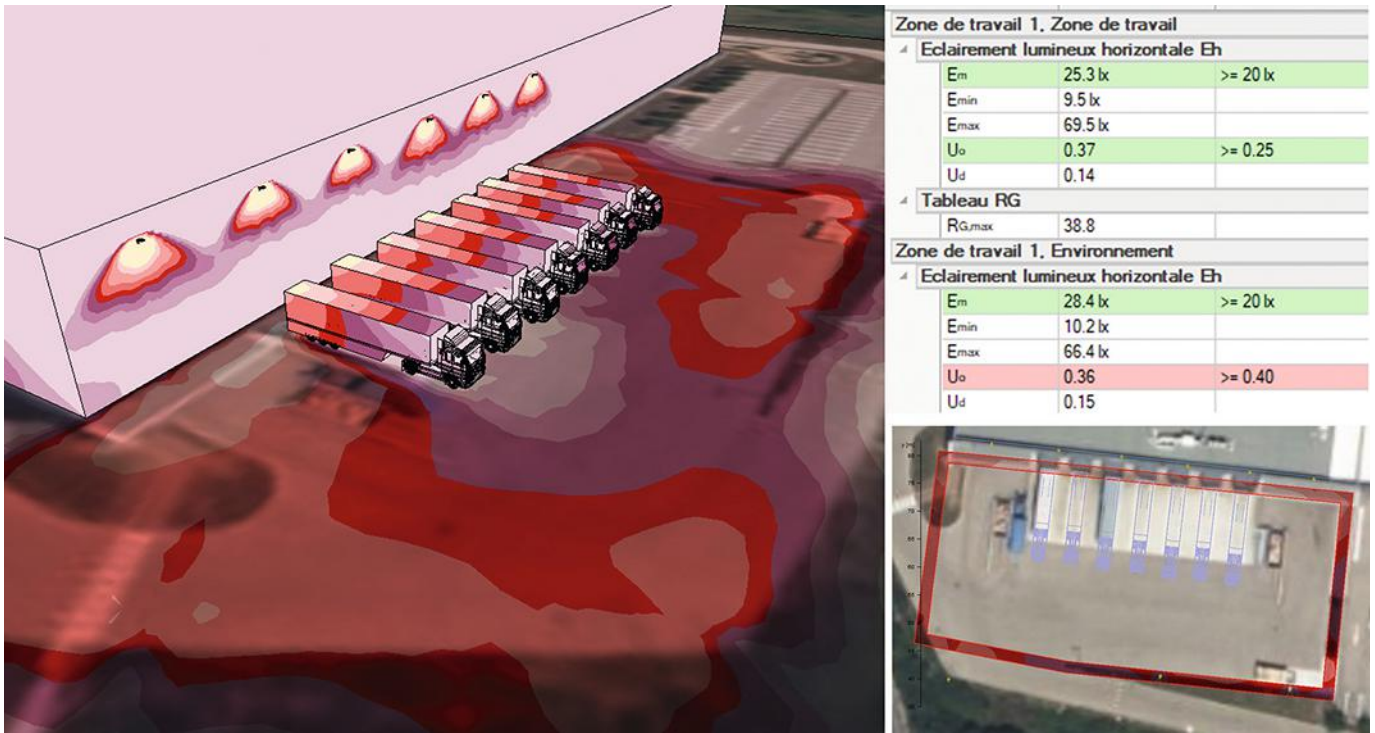
Une nouvelle simulation (Cf. Figure 19) montre que l'uniformité préconisée par la norme NF EN 12464-2 est atteinte, tout en conservant un éclairage suffisant. La puissance des luminaires utilisés

↑ 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

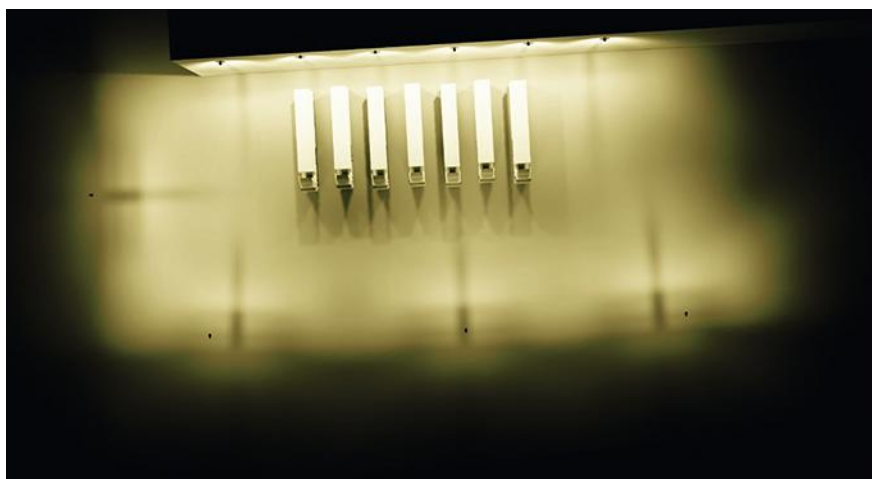
Pour s'assurer qu'une installation neuve ou existante apporte une lumière adaptée à l'activité, il

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		
E _{min}	24.1 lx	>= 20 lx
E _{min}	11.1 lx	
E _{max}	64.2 lx	
U _o	0.46	>= 0.25
U _d	0.17	
Tableau RG		
R _{G,max}	40.5	
Zone de travail 1, Environnement		
Eclairage lumineux horizontale Eh		
E _{min}	25.9 lx	>= 20 lx
E _{min}	10.9 lx	
E _{max}	61.3 lx	
U _o	0.42	>= 0.40
U _d	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'AMÉNAGEMENT (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