

Edition Novembre 2023

Guide pratique de l'éclairage des lieux de travail intérieurs



Document explicatif pour l'application pratique de la norme
NBN EN 12464-1 : 2021 pour la conception de l'éclairage
pour les environnements de travail.

Sous la direction de
l'IBE-BIV - Groupe B

Avec le soutien de



Table des matières

1. Norme et loi	5
2. Principales modifications	8
3. Exigences pour l'éclairage	9
4. Valeurs cibles pour les zones de références	15
5. Étude de cas	17
6. Éclairage d'une pièce	19
7. Éclairement cylindrique et direction de la lumière	22
8. Lumière naturelle et bien-être	23
9. Évaluation du risque d'éblouissement	26
10. Autres paramètres	31
11. Gestion de l'éclairage	35
12. Conception de l'éclairage	37
13. Mesurer la lumière	41
14. Terminologie et définitions	44

Ce document a été rédigé par l'IBE-BIV en collaboration avec Volta, avec le soutien financier du SPF Economie (Contrat PAN21-01).

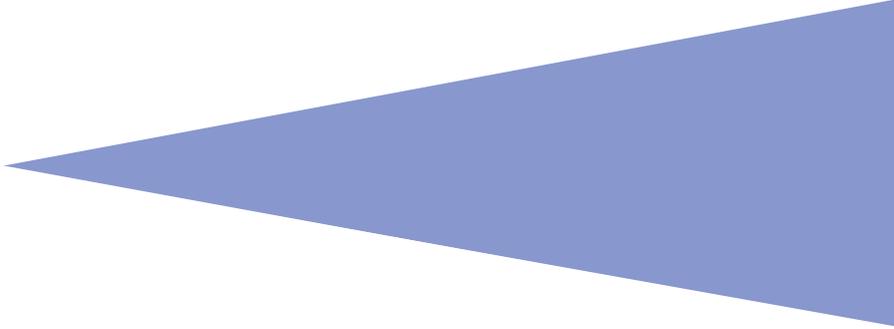
Normes et documents de référence

- NBN EN 12464-1 : 2021 Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1: Lieux de travail intérieurs
- NBN EN 12665 : 2018 Lumière et éclairage - Termes de base et critères pour la spécification des exigences en éclairage
- NBN EN 17037 : 2019 Lumière naturelle dans les bâtiments
- ISO/CIE TS 22012 : 2019 Light and lighting. Maintenance factor determination. Way of working
- CIE 117 : 1995 Discomfort glare in interior lighting
- CIE 190 : 2010 Calculation and presentation of unified glare rating tables
- CIE 227 : 2017 Lighting for Older People and People with Visual Impairment in Buildings
- EN ISO 9241-307 Ergonomie de l'interaction homme-système – Partie 307 : Analyse et méthodes d'essai de conformité pour écrans de visualisation électroniques

Autres documents

- EN 12193 : 2019 Lumières et éclairage – Éclairage des installations sportives
- EN 12464-2 : 2014 Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 2: Lieux de travail extérieurs
- EN 1838 : 2013 Éclairage de secours

1 Une nouvelle version de cette norme pour l'éclairage de secours est actuellement à l'étude. La version révisée devrait paraître au début de 2024.



Introduction

Un éclairage correct des lieux de travail est essentiel pour notre sécurité, notre confort et peut contribuer au bien-être. La norme européenne pour l'éclairage des lieux de travail intérieurs, NBN EN 12464-1, décrit les conditions spécifiques que l'éclairage d'un environnement pour des travailleurs doit remplir afin d'assurer le confort visuel et la performance.

Les niveaux de performance diffèrent en fonction des tâches visuelles et sont conçus pour les personnes ayant une vision normale ou corrigée vers un état qui peut être considéré comme normal. En 2021, une révision de la norme européenne EN 12464-1 a été publiée. Cette nouvelle version contient quelques adaptations importantes par rapport à la norme publiée en 2011.

Compte tenu de ces ajustements et aussi parce que tous les aspects du projet d'éclairage ne peuvent pas être décrits en détail dans un document normatif, des éclaircissements supplémentaires sont nécessaires pour la norme afin d'aboutir à une conception d'éclairage de qualité. Le but de ce document explicatif est de fournir des lignes directrices et des interprétations concrètes qui complètent les exigences générales et les indications de la norme.

1. Norme et loi

Les normes découlent de la consultation entre les parties intéressées, impliquées dans le sujet pour diverses raisons. Soit en tant que fabricant, soit en tant qu'organisme gouvernemental, soit en tant qu'expert ou chercheur indépendant, soit encore en tant qu'utilisateur final. Par exemple, les fabricants s'associent aux universités et aux autorités publiques pour conclure des accords. Cela se fait non seulement par pays, mais de plus en plus aussi au niveau international, ainsi les normes européennes (EN) sont créées par consultation entre les différents états membres. L'UE souligne l'importance des normes pour promouvoir la libre circulation des marchandises dans l'ensemble de l'UE.

Il existe deux catégories de normes :

1. Les normes de produits : Normes qui établissent les définitions de produits et décrivent les caractéristiques essentielles entre les partenaires et les « acteurs du marché ». De cette façon, par exemple, l'interchangeabilité des pièces est garantie, qu'il s'agisse de vis M8 ou de lampes avec un culot de lampe E27.

2. Les normes d'application : Normes portant sur les paramètres et les performances de confort visuel dans un espace dans son ensemble, et qui n'incluent donc pas des caractéristiques spécifiques pour les produits d'éclairage. En général, ces normes donnent des règles de bonne pratique pour des aspects d'éclairage dans une application spécifique. La NBN EN 12464-1 appartient clairement à la deuxième catégorie.

Les normes sont sujettes à l'avancement des connaissances. Les possibilités avec les LED sont par exemple très différentes de celles des technologies de sources de lumière précédentes en termes de propriétés énergétiques. L'influence des effets non visuels de la lumière sur la performance et le bien-être n'a été étudiée que récemment mais est déjà mentionnée dans cette nouvelle version de la norme. Des recherches supplémentaires sont cependant nécessaires. Les lois, d'autre part, découlent naturellement à l'échelle nationale en concertation entre les pouvoirs politiques et les organisations nationales. Une loi est contraignante, obligatoire. Une norme donne des recommandations et est donc volontaire. Néanmoins, dans certains cas, une norme peut avoir force de loi.

En Belgique, les exigences relatives aux lieux de travail sont définies dans le « code du bien-être au travail ». Le code du bien-être au travail sert de base à tous les aspects de la sécurité et de la santé du travailleur. Les exigences relatives à l'éclairage des lieux de travail sont spécifiées dans l'art. III.1-31 à 33 du chapitre 3 du code. Les employeurs doivent s'assurer qu'il y a suffisamment de lumière du jour, complétée le cas échéant par de l'éclairage artificiel. Cette loi stipule que l'employeur remplit ses obligations s'il répond à toutes les exigences de la norme NBN EN 12464-1² pour l'éclairage des lieux de travail intérieurs et de la norme NBN EN 12464-2 pour l'éclairage des lieux de travail extérieurs.

² Le code du bien-être au travail fait référence dans l'article 32 aux normes non datées de la NBN EN 12464-1 et la NBN EN 12464-2. Cela signifie que la dernière version officielle publiée est toujours en vigueur pour se conformer à la réglementation..

1. Code du bien-être au travail

Chapitre III.- Eclairage

Art. III.1-31. - *L'employeur veille à ce que le lieu de travail reçoive de la lumière naturelle en quantité suffisante et que, si cela n'est pas possible, un éclairage artificiel adéquat soit présent. L'éclairage artificiel comprend une installation d'éclairage général qui, le cas échéant, est complétée par une installation d'éclairage locale. L'éclairage artificiel sur les lieux de travail et les voies de circulation est de nature à éviter le risque d'accidents et cet éclairage même ne peut pas présenter de risque d'accidents pour les travailleurs..*

Art. III.1-32. - *L'employeur détermine, sur base des résultats d'une analyse des risques, les conditions auxquelles l'éclairage des lieux de travail, à l'air libre ou non, ainsi que des postes de travail, doit répondre afin d'éviter des accidents par la présence d'objets ou d'obstacles ainsi que la fatigue des yeux. L'employeur qui applique les exigences de la norme NBN EN 12464-1 et de la norme NBN EN 12464-2 lorsqu'il détermine les conditions concernant l'éclairage, est présumé avoir agi conformément à l'alinéa 1er . Lorsque l'employeur ne souhaite pas appliquer les normes visées à l'alinéa 2, l'éclairage doit au moins répondre aux conditions fixées à l'annexe III.1-2.*

Art. III.1-33. - *Les lieux de travail où les travailleurs sont exposés à un risque accru en cas de panne d'éclairage artificiel, sont équipés d'un éclairage contribuant à la sécurité des personnes occupées à une activité potentiellement dangereuse ou se trouvant dans une situation potentiellement dangereuse, et qui leur permet d'exécuter une procédure d'arrêt adéquate pour la sécurité de l'opérateur et des autres personnes présentes dans le bâtiment. La puissance de cet éclairage ne peut pas être inférieure à 10% de la puissance d'éclairage normale pour la tâche concernée.*

Pour plus d'information voir : <https://emploi.belgique.be/sites/default/files/content/documents/Bien-être%20au%20travail/Réglementation/code2017.pdf>

Si toutes les valeurs cible proposées pour toutes les dispositions de la norme sont respectées, on peut supposer que l'éclairage a été conçu conformément aux règles de l'art. Même lorsque des circonstances particulières s'appliquent, l'employeur doit toujours être en mesure de démontrer que le confort visuel et la sécurité de ses travailleurs sont garantis à chaque instant.

Afin de s'assurer qu'une installation d'éclairage dans une situation concrète est conçue de manière à garantir le confort visuel et la performance des travailleurs sur le lieu de travail, il est fortement recommandé de se référer à la norme NBN EN 12464-1 dans les cahiers des charges, en y incluant les spécifications nécessaires pour le projet. Ces dispositions particulières dans le cahier des charges concernent, par exemple, les types de tâches et d'activités, l'organisation spatiale des postes de travail, les périodes d'occupation, les souhaits concernant les fonctionnalités des systèmes de contrôle et, si nécessaire, les caractéristiques ou exigences particulières des travailleurs. La norme fournit des lignes directrices pour divers paramètres importants pour le confort visuel tels que les niveaux d'éclairement, la direction de la lumière, la lumière du jour, les propriétés de la couleur, les risques d'éblouissement, la conception de l'éclairage et les possibilités d'éclairage intégratif. Ces recommandations s'appliquent à tous les postes de travail dans les espaces intérieurs. En tout état de cause, ils ne concernent pas l'éclairage de secours, l'éclairage des terrains de sport ou l'éclairage des œuvres d'art, qui sont décrits dans des documents normatifs spécifiques pour ces applications.

Les critères et les valeurs guides de la norme visent à assurer le confort visuel, mais n'ont pas directement été établis pour induire des effets positifs à long terme sur les personnes. Cependant, l'influence de la lumière sur la santé et le bien-être a été clarifiée davantage dans la nouvelle annexe (Annexe B). Des informations générales sur la façon dont la lumière agit sur le fonctionnement biologique, physique, cognitif et émotionnel peuvent être trouvées dans le rapport technique ISO/CIE TR 21783 et le guide "Human Centric Lighting - mogelijkheden benutten of bang afwachten?"

Auteurs : Sara Kindt, Eowyn Van de Putte, Lore Vandevivere, Wouter Ryckaert
Publication 19/11/2020

Télécharger la publication directement au format pdf via : https://www.groenlichtvlaanderen.be/librairy/download/urn:uuid:69633726-9c23-499f-9097-bdd1a3c9f61e/20.11.19_hcl+gidsv2.pdf?format=-save_to_disk&ext=.pdf

2. Principales modifications

Les principales modifications introduites dans la dernière version de la norme sont énumérées ci-dessous :

- Clarification des exigences concernant les zones de travail et la répartition de la lumière dans les pièces afin de mieux prendre en compte les besoins visuels des utilisateurs.
- Adaptation de la plupart des exigences d'éclairage pour les surfaces représentatives d'une pièce (murs et plafonds) et intégration des valeurs cibles dans les tableaux d'exigences en fonction du type d'activité.
- Ajout ou modification d'exigences d'éclairage pour des types spécifiques d'activités (éducation, logistique, construction automobile, entretien et réparation, maintenance des trains, ventes, ...) et révision de certaines valeurs cibles des tableaux. Pour l'infrastructure ferroviaire, un certain nombre d'informations complémentaires concernant les exigences spécifiques ont été expliquées plus en détail dans une nouvelle annexe (annexe D).
- Nouveau chapitre sur la conception de l'éclairage (inspirée de la CEN/TS 17165)
- Révision complète du paragraphe sur le papillotement et les effets stroboscopiques
- Les exigences relatives au contrôle de l'éblouissement ont été ajustées et mieux expliquées. En outre, un certain nombre de suggestions pour l'application de la méthode générique de tabulation aux circonstances considérées comme non standard ont été données (annexe A).
- Paragraphe informatif complémentaire sur les effets non visuels de la lumière avec des références aux paramètres pertinents à cet égard dans la norme et un certain nombre de méthodes alternatives de détermination (annexe B)
- Insertion d'exemples pratiques détaillés dans une nouvelle annexe (annexe C). Les exemples concernent un environnement de bureau typique et diverses applications industrielles.
- Les aspects relatifs à la lumière du jour ont été approfondis et, pour des recommandations spécifiques, il est fait référence à la norme EN 17037 (section 6.5 et annexe B).
- Achat de la norme via : <https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/all-standards?lang=fr>

3. Exigences pour l'éclairage

Les exigences relatives à l'éclairage des postes de travail sont établies en relation directe avec la pièce dans laquelle les tâches visuelles sont effectuées. Pour répondre aux bonnes pratiques d'éclairage, non seulement l'éclairage requis mais aussi d'autres besoins qualitatifs et quantitatifs doivent être satisfaits. Un bon éclairage contribue à la sécurité, au confort, à la santé et au bien-être des travailleurs tout en favorisant l'utilisation durable des matériaux et de l'énergie. C'est également un facteur déterminant pour l'ambiance et le ressenti de l'espace.

Les exigences d'éclairage notées dans la norme NBN EN 12464-1 sont déterminées pour répondre à deux besoins fondamentaux³ :

- **Confort visuel**, dans lequel les travailleurs ont un sentiment de bien-être ; indirectement, cela contribue également à une productivité accrue et à une meilleure qualité de travail ;
- **Performance visuelle**, où les travailleurs sont en mesure d'effectuer leurs tâches visuelles même dans des conditions difficiles et pendant des périodes de temps plus longues ;

Pour toute situation de travail, ces besoins de base peuvent être satisfaits avec de la lumière naturelle ou artificielle, ou de préférence une combinaison des deux. Plusieurs critères sont importants pour un confort visuel favorable. Cependant, chaque expérience visuelle est toujours en partie subjective, de sorte que la satisfaction des travailleurs dans des situations spécifiques peut parfois différer. La norme NBN EN 12464-1 propose également un certain nombre de méthodes de mesure et de détermination pour quantifier la qualité d'éclairage sur le lieu de travail et ainsi pouvoir l'évaluer de manière plus objective. En fonction de la nature des activités exercées sur un lieu de travail particulier, des valeurs cibles spécifiques sont données pour les différents critères. Les exigences essentielles relatives à l'éclairage sont données sous forme de tableaux au chapitre 7 de la norme. La Figure 1 montre la structure générale de ces tableaux.

Figure 1 - Critères et format général du tableau des exigences en éclairage (Source EN 12464-1)

Conception de zone d'activité/travail				Exigences relatives à la conception de la pièce ou de l'espace			
Exigences relatives à la tâche ou activité				Concernant la communication visuelle et la reconnaissance des objets (5.6.2)		Concernant la communication visuelle et la reconnaissance des objets (5.6.2)	
E_m lx		U_o	R_a	R_{UGL}	$E_{m,z}$ lx	$E_{m,wall}$ lx	"E _{m,ceiling} lx
exigé ^a	modifié ^b						
				$U_o \geq 0,10$			

a exigé: valeur minimale

b modifié: tenant compte des caractéristiques liées au contexte 5.3.3

3 La norme NBN EN 12464-1 ne vise pas directement à assurer la sécurité et la santé des travailleurs dans toutes les situations spécifiques, mais une bonne conception de l'éclairage selon cette norme contribuera à un environnement de travail sûr pour les personnes ayant une vue normale ou corrigée comme une vue normale. L'éclairage pour des groupes cibles spécifiques ou des tâches visuelles particulières nécessite des études adéquates.

Notons qu'en plus des exigences relatives aux tâches ou activités spécifiques (« *Conception de l'aire de la tâche ou zone d'activité* ») les exigences pour l'espace dans lequel les activités sont effectuées (« *Exigences relatives à la conception de la pièce ou de l'espace* ») sont également répertoriées. Par exemple, la répartition de la lumière dans la pièce aura un impact important sur la perception visuelle effective (acuité visuelle, sensibilité au contraste et fonctions oculaires telles que la capacité d'adaptation), ainsi que sur le confort visuel et la façon dont nous vivons l'espace. Une exigence spécifique est également incluse pour la communication visuelle et la reconnaissance d'objets. Les paramètres les plus importants pour le confort visuel sont les éclairagements (éclairage) sur les plans de tâche et de référence dans la pièce et la distribution des luminances (luminance), qui sont une mesure de la perception de la luminosité et des rapports de contraste associés. L'orientation ou la direction de la lumière, la reproduction et la température des couleurs ainsi que les variations en intensité et en couleur de la lumière jouent également un rôle dans la réalisation du confort visuel.

Dans les tableaux pour les différentes applications d'éclairage, il existe une distinction claire entre les exigences relatives aux tâches visuelles dans les zones de travail ou zones d'activité et les exigences au niveau de l'éclairage de la pièce.

Les critères et exigences pour des tâches et des activités visuelles spécifiques dans les zones de référence sont les suivantes :

- Éclairage à maintenir (\bar{E}_m) sur la surface de référence⁴.
- Uniformité minimale (U_0) de l'éclairage
- Indice minimal de rendu des couleurs pour l'activité en question (R_a)
- Valeur limite de l'éblouissement de l'installation d'éclairage (R_{UGL}), en particulier, la valeur limite pour l'UGR (*Unified Glare Rating*)

Les exigences suivantes complémentaires sont fixées pour l'espace dans lequel les activités sont effectuées :

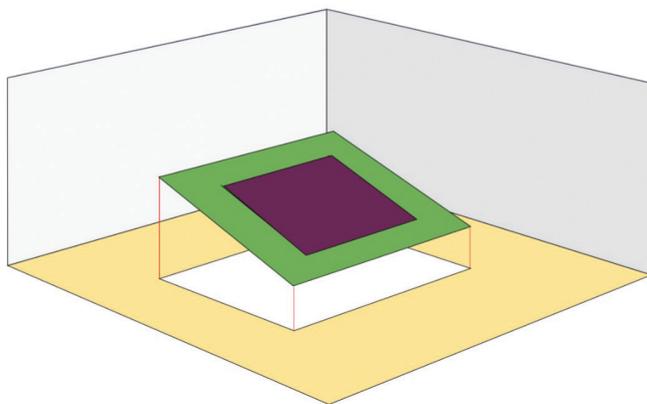
- Éclairage cylindrique moyen à maintenir ($\bar{E}_{m,z}$) (voir paragraphe éclairage d'une pièce)
- Éclairage à maintenir sur les murs ($\bar{E}_{m,mur}$) (voir paragraphe éclairage d'une pièce)
- Éclairage à maintenir sur le plafond ($\bar{E}_{m,plafond}$) (voir paragraphe éclairage d'une pièce)

Dans la norme, toutes les valeurs cibles d'éclairage sont toujours des valeurs à maintenir, ce qui tient donc compte des facteurs de maintenance appropriés. Cela signifie concrètement que l'éclairage demandé doit être atteint même en fin de vie de l'installation. Les éclairages à maintenir sont définis comme des éclairages moyens déterminés sur une grille représentative de points sur le plan de référence.

⁴ Depuis la révision de la norme en 2021, deux valeurs ont été données dans les tableaux pour l'éclairage, une valeur minimale (exigé) et une valeur modifiée (modifié) au cas où les conditions visuelles s'écarteraient des hypothèses habituelles. Il appartient au concepteur d'éclairage de choisir les valeurs de conception appropriées, adaptées au contexte dans lequel les activités sont effectuées (voir « Valeurs cibles pour les surfaces de référence »). La valeur modifiée ne peut donc pas être interprétée comme une valeur limite maximale.

Les exigences d'éclairage de la norme sont toujours liées à des **zones de référence**. D'une manière générale les zones de références sont des surfaces représentatives pour lesquelles des exigences d'éclairage spécifiques peuvent s'appliquer. Pour chaque conception d'éclairage, il est important de déterminer dès le départ et de documenter avec précision les plans de travail effectifs et le type de tâches et d'activités, ceci afin que l'installation puisse être dimensionnée de manière optimale. Les **plans de travail** sont les zones où, dans des circonstances normales, les tâches visuelles sont effectuées par des personnes. Les plans de travail peuvent être physiquement présents dans la pièce, comme un établi dans un atelier ou un mobilier de bureau, mais peuvent également représenter une surface virtuelle où les tâches pourraient être effectuées. Différentes tâches visuelles peuvent s'accomplir sur chaque plan de travail. La partie du plan de travail où une certaine tâche est réellement effectuée est donc appelée une **zone de travail**. Si l'on peut véritablement localiser les tâches généralement effectuées, différentes zones de travail sont en principe possibles sur un même plan de travail. Si, en revanche, différentes tâches visuelles peuvent se produire sur une zone ou une surface limitée du plan de travail, on parle d'une **zone d'activité**. La tâche avec les exigences les plus strictes détermine quelles doivent être les exigences d'éclairage dans une zone d'activité. À côté de ces zones centrales, il est également important d'éclairer suffisamment les zones périphériques dans le champ de vision. Les exigences d'éclairage pour la zone environnante immédiate et la zone de fond découlent alors des valeurs cibles établies pour les zones de travail et les zones d'activités. (Figure 2).

Figure 2 - Zones de référence pour l'éclairage



Zone de travail ou zone d'activité	Partie du plan de travail où une tâche visuelle est effectivement réalisée. En principe, une zone de travail ne contient qu'une seule tâche visuelle bien spécifique, tandis que dans une zone d'activité, plusieurs tâches peuvent être effectuées.	
Zone environnante immédiate	Bande d'au moins 0,50 mètre de largeur dans le plan de travail située autour de la zone de travail ou de la zone d'activité.	
Arrière-fond	Bande d'au moins 3 mètres de large autour de la zone environnante immédiate, située dans un plan horizontal au niveau du sol. Si un mur est présent à moins de 3 mètres de la projection verticale de la zone environnante immédiate, le plan de référence de la zone de fond est délimité par ce mur.	

Dans la plupart des cas, les plans de travail sont faciles à déterminer et à décrire. Dans un espace de bureau, le plan de travail est généralement la surface du bureau ou d'une table, éventuellement complétée par un tableau ou un écran de présentation. Les zones de travail sont alors les surfaces où les travailleurs effectuent des tâches spécifiques. Au plus les zones de travail et les zones d'activité peuvent être bien définies, au mieux l'installation d'éclairage peut être dimensionnée avec précision. Si les zones de travail et les zones d'activité n'ont pas encore été déterminées au moment de la conception ou si une flexibilité maximale est souhaitée, une installation d'éclairage peut être conçue en supposant qu'une partie relativement grande de l'espace peut contenir des zones de travail. Cette approche se fait au détriment d'un dimensionnement optimal de l'installation et peut conduire à une consommation d'énergie plus élevée. Dans une telle approche, des systèmes de contrôle efficaces devraient toujours être proposés. Cependant, dans un certain nombre de cas particuliers, il est parfois plus difficile de définir avec précision les zones de référence, comme dans les opérations impliquant des mouvements. La règle consiste alors à savoir sur quelles surfaces les tâches sont généralement effectuées. Par exemple, lorsque vous travaillez avec des objets géométriques complexes, le plan de travail peut être considéré comme un plan perpendiculaire à la direction de visualisation de l'observateur et tangent à l'objet observé.

En principe, le plan de travail peut être à n'importe quelle hauteur et disposé de manière horizontale, verticale ou inclinée. Pour les couloirs et les zones de circulation, le plan de travail est généralement défini sur la surface du sol et exceptionnellement à une hauteur au-dessus du sol, donc généralement horizontalement. Un autre exemple typique est une salle logistique ou un entrepôt avec des rayonnages de stockage où le plan de travail coïncide verticalement avec la surface enveloppante devant les rayonnages. Au poste de travail d'un opérateur sur une machine, il arrive parfois que le plan de travail soit incliné. Quelques exemples de zones de référence

Quelques exemples de zones de référence (voir les figures 3, 4 et 5) :

- 1** : La zone de tâche, qui comprend essentiellement une tâche visuelle unique bien décrite
- 2** : Zone d'activité : plusieurs tâches peuvent y être exécutées

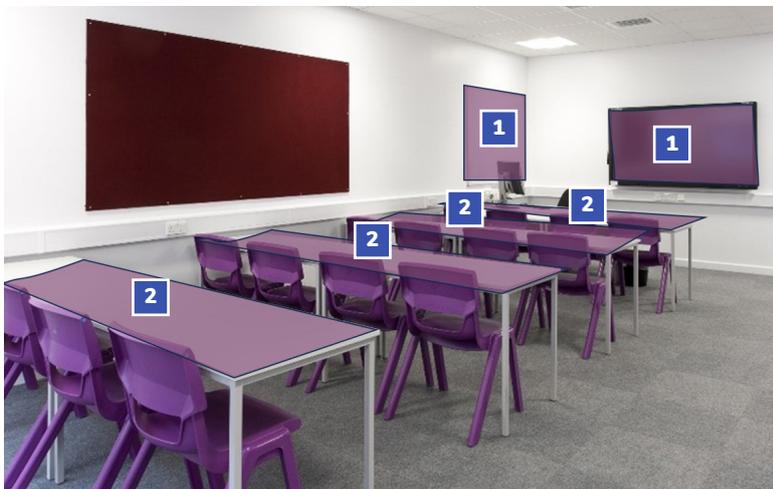
Figure 3 - Activités industrielles



Figur 4 - Environnements de bureau



Figur 5 - Pièces avec d'autres fonctions



Les tableaux donnent les exigences d'éclairage qui s'appliquent à chaque type d'activité. Au total, 52 tableaux sont inclus dans la norme EN 12464-1, mais il est possible que des situations particulières ne soient pas mentionnées. Dans ce cas, il faut inclure la valeur de la tâche visuelle la plus similaire ou faire effectuer une étude spécifique pour déterminer les critères d'éclairage adéquats. Les valeurs cibles spécifiées pour l'éclairage à maintenir (\bar{E}_m) sont valables pour les zones de travail/activité où la tâche visuelle spécifiée est effectuée. Les valeurs cibles pour les éclairages dans la zone environnante immédiate et de l'arrière-fond peuvent être déterminées en proportion à l'éclairage de la zone d'activité conformément aux points 5.3.4 et 5.3.5 de la norme.

Même si les principales valeurs cibles des critères d'éclairage pour différentes tâches/activités sont indiquées dans les tableaux, il est important que toutes les dispositions incluses dans la norme soient suivies. Les dispositions qui ne sont pas incluses explicitement dans les tableaux ne sont donc pas moins importantes et doivent également être prises en compte. Afin de se conformer à la norme, en plus d'atteindre les valeurs guides pour les critères dans les tableaux, les paramètres suivants devraient également être évalués :

- Limiter la luminance maximale des sources lumineuses dans les luminaires pour la vue directe, par exemple via des éléments de protection visuelle. (voir sous-section 5.5.2 de la norme)
- Placement approprié des luminaires par rapport aux personnes effectuant des travaux sur écran pour éviter les réflexions gênantes. Une valeur de seuil de la luminance moyenne des luminaires à des angles de faisceau supérieurs à 65° est ainsi prescrite (voir section 5.9 de la norme).

Afin d'obtenir une conception d'éclairage optimale, les aspects complémentaires suivants sont également à vérifier :

- Empêcher les réflexions du voile et l'éblouissement indirect (réflexion dans les écrans, par exemple)
- Limiter l'éblouissement par les ouvertures de lumière du jour
- Bon équilibre entre éclairage direct et indirect (« modélisation »)
- Veiller à une température de couleur appropriée des sources lumineuses (voir sous-section 5.7.2)
- Eviter le papillotement et effets stroboscopiques (voir section 5.8 de la norme)

4. Valeurs cibles pour les zones de références

L'éclairage à maintenir est indiqué par type de tâche ou d'activité dans les tableaux du chapitre 7 de la norme. Ces valeurs cibles ont été établies pour les conditions visuelles normales. Cela signifie que les paramètres d'observation tels que la distance, les dimensions typiques des objets et la précision de la tâche visuelle ainsi que les aspects plus psychologiques liés au confort visuel et à l'ergonomie sont pris en compte. Toutefois, si les conditions supposées s'écartent des exigences visuelles normales, il convient d'ajuster l'éclairage à retenir en fonction d'une échelle de valeurs cibles prédéfinies. Cette échelle d'éclairage correspond aux différences qu'une personne moyenne peut observer. L'échelle utilisée dans la norme est la suivante :

20 - 30 - 50 - 75 - 150 - 200 - 300 - 500 - 750 - 1000 - 1500 - 2000 - 3000 - 5000 Lux

La norme EN 12464-1 mentionne dans la sous-section 5.3.3 des conditions particulières, appelées « caractéristiques liées au contexte », pour lesquelles les valeurs cibles devraient être ajustées . Les valeurs cibles requises pour chaque type d'activité ont déjà été établies en supposant que la tâche est effectuée dans les circonstances les plus courantes.

Par exemple, pour le travail de bureau, un éclairage de 500 lx est demandé dans la zone de travail pour des tâches de lecture et d'écriture typiques, mais de 750 lx pour le dessin technique et seulement 200 lx pour des tâches telles que l'archivage. Toutefois, si ces tâches sont effectuées dans des circonstances plus difficiles, une augmentation des valeurs cibles devrait être envisagée. Sept conditions relatives à un éventuel écart par rapport à des circonstances normales sont données.

C'est le cas, par exemple, lorsque les tâches visuelles effectuées sont particulièrement critiques pour des raisons de sécurité et/ou de valeur économique, lorsqu'une concentration accrue est importante, lorsque la précision demandée est exceptionnelle ou lorsque les observateurs devant effectuer les tâches ont une vision moins bonne (comme chez les personnes âgées⁵). De même si le temps d'observation pour les tâches visuelles est inhabituellement long, il est conseillé d'augmenter la valeur indicative pour l'éclairage.

5 La lumière atteignant effectivement la rétine diminue avec l'âge à cause d'une ouverture de la pupille plus petite et en raison de l'absorption spectrale du cristallin de l'œil (jaunissement). Selon le document CIE 227, ces pertes oculaires doivent être prises en compte à partir de l'âge d'environ 50 ans.

Si une ou deux de ces conditions de la norme sont d'application, il est conseillé de monter d'un cran; en cas de plus de deux conditions, deux crans au-dessus peuvent être retenus. À titre d'exemple, dans un environnement de bureau, il est conseillé d'adopter des éclairagements plus élevés si une proportion importante de personnes âgées sont présentes parmi celles qui effectuent des tâches visuellement plus fatigantes. Dans la pratique, il est nécessaire de s'accorder clairement à l'avance avec le client et/ou les services de prévention, non seulement où se trouvent les zones de travail, mais aussi où et quelles sont les circonstances particulières pouvant survenir.

Non seulement l'éclairage sur les zones de travail/activité est augmenté, mais aussi celui de la zone environnante immédiate et de l'arrière-fond. Les valeurs guides doivent être ajustées proportionnellement. Ceci est nécessaire pour éviter les contrastes élevés indésirables. La zone environnante immédiate est une bande autour de l'aire de tâche, où l'éclairage minimal est un rapport de celui présent sur la zone de travail, avec 500 lux comme limite supérieure et 150 lux comme limite inférieure (voir le tableau 3 de la norme EN 12464-1).

L'uniformité doit être supérieure ou égale à 0,4 dans cette zone. De plus, l'éclairage de l'arrière-fond doit être d'au moins 1/3 de l'éclairage à retenir sur la zone environnante immédiate. L'uniformité doit ici être supérieure ou égale à 0,10.

5. Étude de cas

Avant d'approfondir certains aspects du confort visuel, on donne un exemple pratique, également inclus dans la norme. Ainsi, le lecteur peut se donner une idée générale de la marche à suivre étape par étape. Trois autres exemples sont également montrés dans la norme.

Exemple : Application de bureaux

Description des activités

Dans un bureau paysager, des activités classiques ont lieu, y compris l'écriture, la dactylographie, la lecture, le traitement de données, l'archivage et la copie. Les tâches effectuées sur l'ordinateur sont flexibles et peuvent être effectuées à différents endroits de la pièce. L'archivage et la copie ont lieu à des endroits fixes dans le bureau. L'âge du personnel dans l'espace varie de la mi-vingtaine au début des soixante ans, avec un groupe intermédiaire d'environ la cinquantaine d'années. Aucun des membres actuels du personnel n'est malvoyant (à l'exception de la détérioration normale des yeux en fonction de l'âge). Le bureau doit être éclairé de manière à ce que la flexibilité de l'espace soit maintenue et que toutes les tâches puissent être effectuées de manière optimale.

Paramètres de conception

La première étape consiste à établir des valeurs cibles pour la conception, notamment pour l'éclairage et les autres paramètres. La norme contient un aperçu des différentes activités, avec un tableau recommandations pour chaque activité. Pour les tâches de bureau mentionnées dans notre exemple, les exigences en matière d'éclairage se trouvent dans le tableau 34 « Bureaux ». La figure 6 ci-dessous montre les critères et les valeurs cibles de la norme pour les tâches de bureau typiques.

Figure 6 : Exigences d'éclairage spécifiques pour les tâches de bureau typiques (Source EN 12464-1)

No réf.	Type de zone de travail/ activité	\bar{E}_m lx		U_o	R_a	R_{UGL}	$\bar{E}_{m,z}$ lx	$\bar{E}_{m,wall}$ lx	$\bar{E}_{m,ceiling}$ lx	Exigences spécifiques
		exigé ^a	modifié ^b							
34.1	Classement, reprographie, etc.	300	500	0,4	80	19	100	100	75	
34.2	Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	1000	0,6	80	19	150	150	100	Pour le travail sur écran, voir 5.9 Pour la luminosité de la pièce, voir 6.7 et annexe B Il convient d'utiliser un système de gestion de l'éclairage, voir 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.

En raison de la flexibilité souhaitée pour qu'il soit possible d'ajuster l'espace de bureau à tout moment, les conditions les plus strictes doivent être remplies dans tout l'espace. Concrètement, cela signifie dans notre exemple que, étant donné qu'il y a un pourcentage relativement élevé de travailleurs âgés dans la pièce, l'éclairage requis de 500 lux pourrait ne pas être suffisant. La norme comprend des conditions dépendant du contexte où il est recommandé d'augmenter l'éclairage d'un ou deux crans dans l'échelle de valeurs des éclairages. En raison du pourcentage relativement élevé de travailleurs plus âgés qui effectuent des tâches plus fatigantes visuellement, l'équipe de conception décide que l'éclairage moyen minimum requis doit être augmenté d'au moins un cran, à savoir de 500lx à 750lx dans une zone spécifique du bureau.

La valeur nominale de l'éclairage à maintenir \bar{E}_m est maintenant déterminée et fixée à 750lx. Étant donné que l'éclairage moyen sur la surface de travail a été augmenté d'un cran, l'éclairage cylindrique à maintenir et l'éclairage à maintenir sur les murs et le plafond doivent également être augmentés d'un cran, ce qui entraîne les exigences finales d'éclairage comme le montre la Figure 7.

Figure 7 : Valeurs de conception ajustées pour l'éclairage (Source: EN 12464-1)

\bar{E}_m lx	U_o	R_a	R_{UGL}	$\bar{E}_{m,z}$ lx	$\bar{E}_{m,wall}$ lx	$\bar{E}_{m,ceiling}$ lx
				$U_o \geq 0,10$		
750	0,60	80	19	200	200	150

Les éclairages moyens pour l'environnement immédiat et la zone de fond sont respectivement donc d'au moins 500 lx et $500 \text{ lx}/3 = 167 \text{ lx}$.

Afin de garantir une flexibilité maximale, les concepteurs pourraient aussi choisir 1000 lx comme valeur de conception, mais alors complété par les possibilités d'un système de gestion de l'éclairage approprié pour répondre aux exigences de base, mais en même temps aussi pour permettre la variation de l'environnement visuel pendant la journée.

Remarque : Les valeurs cibles minimales sont difficiles à atteindre pour certaines finitions et couleurs. En particulier pour les surfaces de sol, il peut parfois être utile de tester différentes alternatives et de demander des données optiques détaillées. Si des couleurs sombres sont utilisées, elles devraient être utilisées sur une zone limitée.

La réflexion de la lumière sur toutes les surfaces est un élément important pour la répartition de la lumière et la perception de la clarté de la pièce. En raison des réflexions de lumière, les interactions sur le sol et les meubles ont un impact sur l'éclairage au plafond. En principe, il suffit d'éclairer les zones qui se trouvent dans le champ de vision. Par exemple, dans un bureau individuel, vous n'avez pas à prendre en compte le mur dans le dos du travailleur. Les surfaces qui déterminent la perception visuelle dans une pièce dépendent cependant fortement de la situation. Dans les petits espaces, les murs jouent un rôle important, tandis que dans les grands volumes, c'est le plafond et les meubles qui auront un impact plus fondamental.

Les coefficients de réflexion des surfaces visibles doivent être sélectionnés de manière à ce que la luminance soit en harmonie avec la luminance sur les plans de travail et les autres zones de référence. Pour assurer la conformité de la conception de l'éclairage, même lors de la refonte ou du remplacement du mobilier, il est conseillé de faire des calculs d'éclairage incluant tous les objets et les surfaces les plus pertinents de la pièce (fenêtres, éléments structurels, poutres, colonnes, meubles, cloisons, machines, etc.).

La couleur d'une surface influence fortement ses propriétés en réflexion, mais la texture de la surface est tout aussi déterminante. Les finitions rugueuses réfléchissent généralement plus de manière diffuse, c'est-à-dire qu'elles renvoient la lumière dans toutes les directions, produisant ainsi des distributions de lumière plus uniformes. La figure 8 montre les valeurs types pour le coefficient de réflexion d'une surface diffuse, homogène et plane en fonction de sa couleur.

Figure 8 : Coefficient de réflexion typique des surfaces en fonction de la couleur (codes RAL)

Light reflexion coefficient %	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
White / Grey / Black	9016	9010	9001	1013	1015	9018	7035	9006	7044	7038	7040	7004	7030	7023	7005	7011	7016
Yellow / Orange				1026	1016	1018	1021	1023	1028	1033	2000						
Brown										1007	1006	1005	1011	1027	8001	8024	8014
Green										6027	6034	6021	5018	6011	6025	6010	6009
Blue												7001	5024	5014	5015	5007	5011
Violet												3012	4009	4003	4010	4006	4007
Red												2003	2008	2004	2002	3000	3004

Si l'éclairement et la luminance d'une surface sont enregistrés lors des mesures de contrôle, le coefficient de réflexion approximatif peut être déterminé. Le facteur de réflexion ρ_v d'une surface parfaitement diffuse est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_v = \frac{L}{E} \times \pi$$

Où :

L est la luminance de la surface dans toutes les directions,

E est l'éclairement de la surface.

7. Éclairage cylindrique et direction de la lumière

Dans de nombreux espaces, il est également nécessaire d'avoir une bonne communication visuelle et de reconnaître les personnes et/ou les objets. Afin d'éclairer suffisamment et qualitativement, il faut aussi prêter attention à l'orientation ou à la direction de la lumière. Une lumière trop directionnelle provoque de nombreuses ombres et de grands contrastes dans la pièce. Une lumière diffuse rend une pièce monotone et complique la vision en profondeur (Figure 9). L'expérience visuelle dans un espace est vécue comme agréable lorsque les personnes et les objets sont éclairés de manière que leur forme et leur texture soient clairement perceptibles.

Figure 9 : Éclairage direct, mixte et diffus



La norme utilise l'éclairage cylindrique moyen, \bar{E}_z , comme indicateur pour ce critère. L'éclairage cylindrique est la quantité de lumière incidente sur une petite surface cylindrique en un point par unité de surface. Sa valeur peut être estimée en prenant la moyenne des éclairages verticaux mesuré ou calculé dans les quatre principales directions orthogonales en un point donné.

Comme pour toute tâche visuelle spécifique, un éclairage cylindrique minimal $\bar{E}_{m,z}$ est également requis dans les tableaux des exigences d'éclairage de la norme. Cet éclairage cylindrique moyen à maintenir est déterminé dans un plan horizontal à une hauteur de 1,20 m lorsque les personnes restent principalement assises, mais à une hauteur de 1,60 m si les personnes sont principalement en position debout. La détermination de l'éclairage cylindrique doit être effectuée dans un volume contenant les zones de travail/activité, ainsi que la zone environnante immédiate.

À côté de cela, la notion de « modélisation » est également introduite (voir la section 5.6.3). La modélisation est une mesure pour la directionnalité de la lumière et elle est définie comme le rapport de l'éclairage cylindrique sur l'éclairage horizontal en un point. Cela a donc également à voir avec la répartition de la lumière et l'équilibre entre la lumière diffuse et la lumière directe dans une pièce. La norme donne une recommandation d'une valeur indicative comprise entre 0,3 et 0,6, uniquement lorsque les conditions d'éclairage sont relativement uniformes. Si nécessaire, une tâche visuelle peut toujours être soutenue par une lumière directionnelle, notamment dans le cas d'un travail précis ou d'une tâche d'évaluation de la couleur et de qualité.

8. Lumière naturelle et bien-être

L'utilisation de la lumière naturelle dans les bâtiments est encouragée presque partout, mais elle est particulièrement importante pour les lieux de travail lorsque les personnes y restent pendant de longues périodes⁶. Laisser entrer suffisamment la lumière naturelle est par conséquent le tout premier principe des réglementations nationales (art. III.1-31 du code du bien-être au travail). Il convient toutefois de noter que dans la plupart des environnements intérieurs, les niveaux de lumière sont environ 100 fois inférieurs à la quantité de lumière à laquelle nous sommes exposés à l'extérieur. Beaucoup de personnes ont donc un manque chronique de lumière.

La lumière est nécessaire à la réalisation de tâches visuelles, mais elle est également essentielle pour la santé et le bien-être des personnes. L'impact potentiellement positif ou négatif de la lumière sur l'organisme humain est appelé effets « non visuels ». Dans la norme NBN EN 12464-1, une toute nouvelle annexe est consacrée à ces aspects. Une lumière suffisante aux bons moments et une vue adéquate sur l'extérieur ont un impact majeur sur notre cycle de sommeil et d'éveil⁷. Ils favorisent notre capacité à nous concentrer et à apprendre, aident à réduire le stress, affectent notre état d'humeur et auraient également un impact clair sur la productivité des travailleurs. Afin de déployer ces effets positifs, des niveaux de lumière élevés sont nécessaires pendant la journée (idéalement avec une lumière qui a un spectre relativement continu), mais aussi de maintenir des niveaux de lumière aussi bas que possible la nuit et en plus d'éviter la lumière avec trop de composants de rayonnement bleu (par exemple en utilisant une lumière avec des températures de couleur chaudes).

Compte tenu des niveaux de lumière élevés, de la qualité spectrale et des variations intrinsèques, la lumière du jour est la source de lumière préférée, qui peut ensuite être complétée par de la lumière artificielle à certains moments. Un éclairage naturel suffisant sur les lieux de travail contribue, dans une large mesure, à la satisfaction des travailleurs. La variation quotidienne de la quantité, de la direction et de la couleur de la lumière du jour offre une variété qui est bénéfique. En outre, les fenêtres et les autres ouvertures pour la lumière naturelle fournissent également un contact visuel avec le monde extérieur. Les avantages spécifiques de la lumière naturelle dans les lieux de travail ont été décrits dans une section distincte de la norme NBN EN 12464-1 (voir la section 6.5). Des explications complémentaires concernant les effets non visuels de la lumière naturelle sont données à l'annexe B.

6 La lumière naturelle devrait être prioritaire pour tous les espaces où les travailleurs séjournent régulièrement. D'une manière générale, une pièce ou un lieu de travail est considéré comme étant occupé régulièrement s'il est utilisé quotidiennement pendant des périodes de plus d'une demi-heure.

7 Le cycle de sommeil et d'éveil d'une personne est régulé par une horloge biologique interne qui a une période d'environ 24 heures pour tout le monde, d'où le nom de rythme circadien (en latin « circa dies » signifie « environ un jour »). Toutefois tout au long de notre vie, notre biorhythme change. Par exemple, les bébés et les tout-petits, mais aussi les personnes âgées ont généralement un rythme plus court ou ultradien. La lumière captée par les cellules spécifiquement sensibles à la lumière sur la rétine peut contrôler (accélérer ou ralentir) cette horloge biologique. Les variations dynamiques d'intensité et de spectre de la lumière naturelle et de son cours durant la journée sont des éléments importants pour ajuster à chaque moment du jour le rythme circadien.

Pour l'évaluation de la performance de la lumière du jour dans un bâtiment, et entre autres pour les critères et les méthodes de détermination utilisée, la norme NBN EN 17037 est mise en référence. Cette norme contient quatre critères pour évaluer la qualité de la lumière naturelle dans une pièce : l'apport d'éclairage naturel, la vision vers l'extérieur, l'ensoleillement direct et les risques d'éblouissement. Pour chacun de ces critères, trois niveaux de performance sont définis (minimum, moyen, élevé). Le manque d'apport de lumière du jour est mentionné comme l'une des conditions permettant d'augmentation des valeurs cibles pour l'éclairage (voir la section « valeurs cibles pour les zones de référence »). À titre indicatif, pour l'éclairage naturel sur les lieux de travail, des performances conformes au niveau « minimum » peuvent être recommandées, c'est-à-dire au moins 300 lx sur 50 % de la surface de la pièce pendant au moins 50 % du temps avec la lumière du jour. Si la pièce reçoit moins de lumière du jour, il est donc conseillé d'augmenter les éclairagements sur les zones de travail et les autres zones de référence.

Étant donné que les risques d'éblouissement peuvent également avoir une influence importante sur les travailleurs, il s'agit d'un point d'attention supplémentaire. Tout d'abord, il est utile de limiter la lumière directe du soleil aux endroits précis où les personnes ont un poste de travail fixe. Mais la lumière peut également causer des problèmes de confort visuel en raison de la luminosité excessive des ouvertures de lumière du jour par rapport à l'écran et à l'environnement visible, même sans lumière directe du soleil. Des systèmes de modulation des apports solaires et leur contrôle adapté permettent dans de nombreux cas d'offrir une bonne solution. Des méthodes spécifiques de détermination de l'éblouissement et des lignes directrices pour le choix des matériaux de protection solaire sont données dans l'annexe E de la norme EN 17037.

Si l'éclairage artificiel peut être programmé pour s'atténuer suffisamment ou s'éteindre en présence de lumière du jour, l'apport d'éclairage naturel peut également permettre de réaliser des économies importantes sur la consommation d'électricité des luminaires. Vu que l'éclairage représente un poste de dépense relativement grand dans le tertiaire, cela peut avoir un impact important sur l'efficacité énergétique et la durabilité du bâtiment.

Quelques lignes directrices pratiques pour la lumière du jour sur les lieux de travail :

- Placez les postes de travail de préférence près et perpendiculairement à la fenêtre, à moins que les tâches visuelles à effectuer ne soient entravées par trop de lumière naturelle. Pour les personnes qui doivent effectuer un travail sans beaucoup de lumière du jour, des pauses suffisantes et régulières sont souhaitables dans une pièce avec beaucoup de lumière du jour ou dans des espaces extérieures.
- Les postes avec écrans doivent être installés de manière à ce que la direction de la vue soit approximativement parallèle à la fenêtre (c.-à-d. écran perpendiculaire à la fenêtre). Ainsi, moins de lumière naturelle tombe directement sur l'écran et l'utilisateur ne regarde pas face à la lumière du jour.
- Fournir un contrôle solaire approprié pouvant réduire l'éblouissement dû à la lumière directe du soleil et qui est réglable librement par les utilisateurs. Ceci est particulièrement important pour les postes de travail avec écrans et/ou lorsque des tâches visuelles précises sont effectuées.
- Une bonne vue sur l'extérieur depuis chaque poste de travail est nécessaire, avec idéalement la possibilité de regarder au loin. En regardant régulièrement à l'extérieur, l'œil peut se détendre, ce qui réduit le risque de fatigue oculaire.
- Les locaux et les espaces pour la détente ou pour des contacts sociaux informels (salle à manger, espace café, coin salon, etc.) reçoivent de préférence beaucoup de lumière naturelle et offrent un accès possible vers l'extérieur.

9. Évaluation du risque d'éblouissement

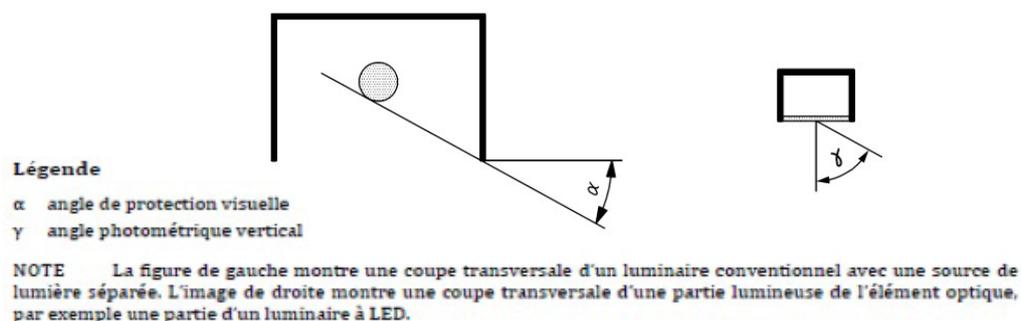
L'éblouissement est une nuisance visuelle pouvant compliquer les perceptions. Cela se produit lorsque certaines zones du champ de vision ont une luminosité trop élevée ou lorsque les contrastes entre les zones sont trop importants. En premier lieu, nous pensons aux luminaires, mais aussi les fenêtres et autres surfaces très lumineuses dans une pièce peuvent perturber le travail. L'éblouissement peut également se produire à la suite de réflexions de lumière, par exemple lors de l'utilisation d'écrans ou de surfaces réfléchissantes (papier glacé, métal, verre, etc.). Ce dernier phénomène est parfois appelé réflexion de voile. L'éblouissement favorise les risques d'erreurs ou d'accidents mais aussi une fatigue plus rapide des travailleurs. Il diminue leur concentration pendant le travail. Les risques d'éblouissement doivent donc être limités.

L'évaluation des risques d'éblouissement conformément à la norme NBN EN 12464-1 est effectuée en deux étapes différentes successives et complémentaires. Tout d'abord, il faut veiller à masquer la source lumineuse et/ou en limiter les luminances de surfaces émettrices pouvant provoquer un éblouissement d'incapacité ('*disability glare*'). Ensuite, on va vérifier si les luminaires tels qu'ils sont installés dans la pièce ne provoquent pas d'éblouissement d'inconfort ('*discomfort glare*').

1. Limitation de la luminance des luminaires

La luminosité perçue des luminaires peut être très élevée et, par conséquent, la luminance maximale doit être limitée. Le but des angles de protection visuelle est de protéger les surfaces trop lumineuses de la vue directe depuis un poste de travail dans la pièce. Les angles de protection visuelle requis dépendent des valeurs de luminance. En particulier, une distinction est faite entre les luminaires où la source lumineuse est directement visible et les luminaires où la source lumineuse n'est pas directement visible en raison de l'utilisation d'optiques (comme avec la plupart des luminaires LED avec diffuseurs). Pour la première catégorie, les angles de protection sont indiqués par rapport à la luminance de la source lumineuse même. Dans le second cas, la luminance maximale des surfaces lumineuses est donnée en fonction de l'angle du faisceau (Figure 10).

Figure 10 : angle de protection visuelle contre l'éblouissement (Source EN 12464-1)



2. Limiter l'éblouissement dans les espaces (éblouissement d'inconfort)

L'éblouissement peut se produire en raison de la lumière artificielle, de la lumière naturelle ou d'une combinaison des deux. Afin d'évaluer l'éblouissement causé par les ouvertures de la lumière naturelle, il est fait référence à la norme NBN EN 17037 et aux méthodes spécifiques qui y sont décrites.

L'éblouissement causé par les luminaires est estimé sur base d'un indice d'éblouissement qui dépend notamment de la position et de la direction de la vision de l'observateur. Pour évaluer l'éblouissement par l'éclairage artificiel dans une pièce, la norme NBN EN 12464- 1 continue à utiliser la métrique R_{UG} ⁸, mais avec quelques clarifications importantes. La méthode R_{UG} a été développée par le CIE pour l'évaluation de l'éblouissement direct et dépend de la configuration des luminaires, des caractéristiques de la pièce (dimensions, coefficients de réflexion) et de la position d'observation des utilisateurs.

De faibles valeurs R_{UG} donnent un risque réduit d'éblouissement direct. L'échelle de valeurs varie de 10 à 28. Plus la valeur R_{UG} est basse moins il y a de risque d'éblouissement. Une valeur élevée signifie donc qu'il y a un risque d'éblouissement élevé. Pour les valeurs R_{UG} inférieures à 10, aucun éblouissement notable ne se produit. Ce n'est qu'à partir d'une valeur de 22 que l'éblouissement est ressenti de manière gênante par la plupart des personnes. Avec des valeurs R_{UG} supérieures à 28, l'éblouissement devient même insupportable. Toutefois, il convient de noter que les luminaires avec un R_{UG} relativement faible peuvent toujours donner des luminances gênantes. La valeur limite que l'indice d'éblouissement R_{UG} ne doit pas dépasser pour une situation donnée est appelée R_{UGL} (L pour limite) et est spécifiée dans les tableaux. Dans les tableaux, les exigences varient d'ailleurs selon le type d'activités. Pour les exigences R_{UGL} , la norme utilise des valeurs standard, réparties en catégories: 16, 19, 22, 25 et 28. Quelques valeurs cibles typiques sont données à la Table 2:

8 La méthode R_{UG} pour la nuisance par l'éblouissement utilise la métrique UGR (Unified Glare Rating) calculée dans des conditions standard spécifiées. Dans la version 2011 de la norme EN12464-1, les valeurs limites pour l'« UGR » étaient notées alors que la notation « R_{UG} » est maintenant utilisée. Par rapport à la version 2011, il n'y a donc qu'un changement de nom, mais aucun ajustement n'a été apporté à la formule. Le document CIE 117:1995 « Discomfort glare in interior lighting » décrit cette méthode.

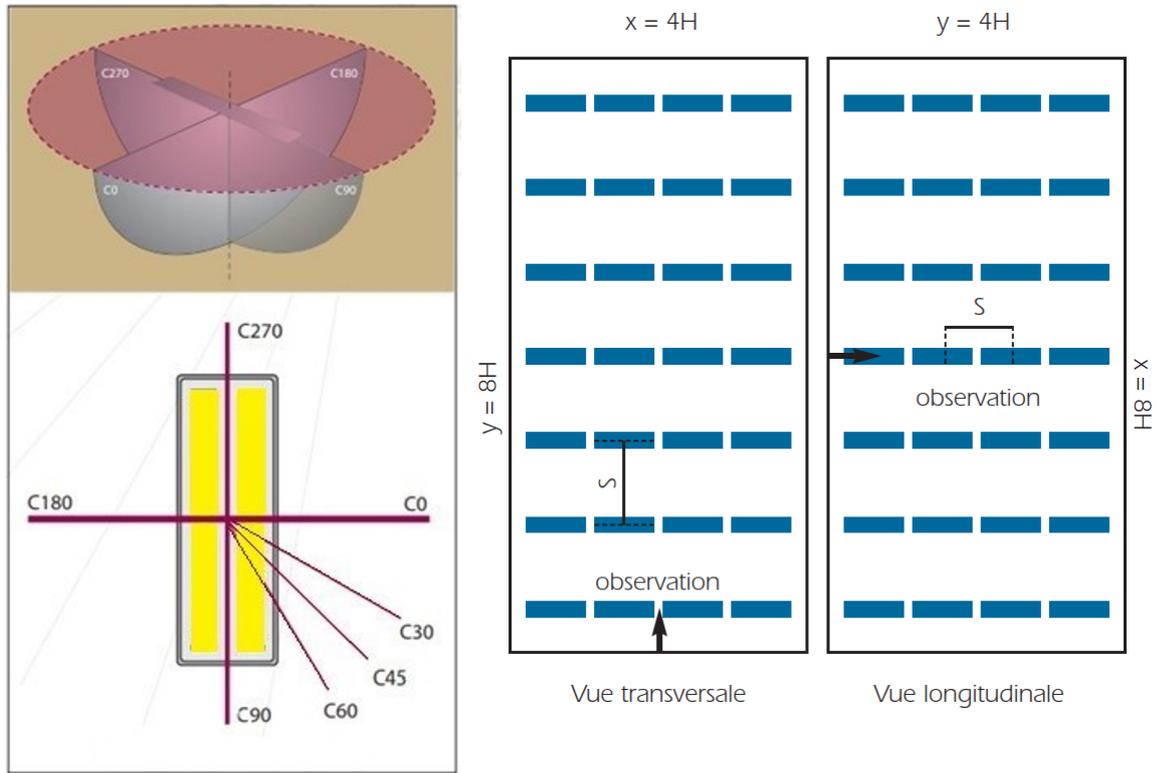
Tableau 2 : Valeurs cibles pour l'indice d'éblouissement

R_{UGL}	Activités typiques
16	Bureaux où des travaux précis ou des tâches critiques sur écran sont effectués
19	Bureaux, salles de réunion, salles de classe, ...
22	Réception, travaux d'assemblage
25	Escaliers,... diverses activités industrielles
28	Circulation et couloirs

Un point d'attention important est que cette valeur R_{UG} doit être calculée à l'aide de la méthode tabulaire. En outre, les variations \pm (en fonction de la position de l'observateur) ne sont pas prises en compte lors de la comparaison de la valeur R_{UG} avec la valeur limite. Des tableaux de valeurs sont généralement mis à disposition par les fabricants d'éclairage et sont également inclus dans les programmes de calcul d'éclairage les plus couramment utilisés. Cette méthode nécessite diverses données relatives à la forme de la pièce, à l'emplacement des luminaires, aux coefficients de réflexion des murs, du plafond et du sol.

Cette évaluation avec la méthode tabulaire est basée sur la détermination de l'éblouissement dans un espace rectangulaire pour deux positions d'observation qui sont en théorie les plus défavorables (Figure 11). Ces deux positions sont placées au milieu des murs de la pièce et sont chacune orientées selon des directions perpendiculaires, appelées respectivement longitudinale (endwise) et transversale (crosswise). La direction de vue standard est horizontale, perpendiculaire au mur à une hauteur de 1,2 m (niveau moyen des yeux pour une personne assise). La direction de vue longitudinale (direction longueur) est parallèle aux plans C90/C270 et la direction de vue transversale (direction largeur) est parallèle aux plans C0/C180. Ces surfaces sont définies conformément à la norme NBN EN 13032-1.

Figure 11 : Disposition conventionnelle des luminaires dans une salle en utilisant la méthode tabulaire



Les valeurs R_{UG} pour les deux directions de vue (longitudinale et transversale) sont déterminées par les dimensions de l'espace par rapport à H , la distance entre la hauteur des yeux de l'observateur et la surface de montage des luminaires.

Par exemple, pour une pièce de 12 m de long, 6 m de large et 2,7 m de haut, H est déterminé comme suit :

- Hauteur de montage des luminaires : 2,7 m (hauteur sous plafond);
- Niveau des yeux de l'observateur : 1,2 m (niveau des yeux de la personne assise).

Hauteur au-dessus des yeux : $H = 1,5$ m

Afin d'exprimer les dimensions de la pièce en fonction de H , il convient que la dimension x est prise perpendiculairement à la direction d'observation et y est prise parallèle avec la direction d'observation (voir Figure 11).

Les dimensions de la pièce peuvent donc être exprimées comme suit :

- Transversal : $x = 6 \text{ m} > x = 4 H$
 $y = 12 \text{ m} > y = 8 H$
 Longitudinal : $x = 12 \text{ m} > x = 8 H$
 $y = 6 \text{ m} > y = 4 H$

Une fois que les valeurs x et y sont déterminées en fonction de H , les valeurs R_{UG} sont extraites du tableau en fonction des coefficients de réflexion de la pièce. Si les coefficients de réflexion du plafond sont de 70 %, celle des murs 50 % et celle du sol 20 %, les valeurs R_{UG} des tableaux de l'exemple ci-dessus sont respectivement égales à 14,0 pour la vision transversale (parallèle aux plans C0/C180) et à 13,1 pour la vision longitudinale (parallèle aux plans C90/C270).

Les tableaux d'indice d'éblouissement mis à disposition par les fabricants de luminaires ou pouvant être générés dans des programmes de calcul de la lumière sont établis avec un rapport S/H de 0,25 ou 1. Il est important que ce rapport S/H soit indiqué et que lors de la comparaison de différentes conceptions d'éclairage le même rapport soit choisi. Un $S/H = 0,25$ est prescrit pour l'évaluation et doit bien sûr être déclaré. Il est donc également recommandé d'inclure clairement la consigne de $S/H=0,25$ dans les spécifications. Afin de pouvoir comparer différentes études entre elles, il est nécessaire que toutes les études soient réalisées avec le même choix de rapport S/H .

Toutefois, la méthode tabulaire R_{UG} ne peut pas être utilisée pour les luminaires à faisceau lumineux asymétrique (par exemple, pour éclairer les murs), les luminaires à composante purement indirecte, les appareils à double asymétrie, les projecteurs directionnels et les appareils à très petite (LED individuelle) ou à très grande surface émettrice (par exemple, plafonds lumineux). Une explication plus détaillée pour l'utilisation de la méthode tabulaire R_{UG} est donnée à l'annexe A.

Si la méthode tabulaire ne peut pas être appliquée et/ou si la position du travailleur est connue, le R_{UG} peut également être calculé ou simulé avec un programme de calcul d'éclairage via la formule générale (voir rubrique 5.5.3.2). Ces simulations peuvent être utilisées, par exemple, pour confirmer l'emplacement des postes de travail dans une pièce et pour comparer les situations de conception. Il est important de mentionner que les valeurs limites mentionnées dans les tableaux d'exigences doivent dans ce cas seulement être considérées comme des valeurs guides et non comme des valeurs limites contraignantes.

La lecture sur papier ou à partir d'un écran peut être très compliquée lorsque des réflexions (de voile) se produisent. C'est à l'équipe de conception d'éviter ou de minimiser autant que possible cet effet. Cela peut être fait par les mesures suivantes :

- Une disposition réfléchie des lieux de travail par rapport aux ouvertures de lumière naturelle et aux luminaires ;
- Choix de matériau et de texture des surfaces non brillantes (surfaces mates) ;
- Limitation des luminances maximales des luminaires et des ouvertures de lumière naturelles potentiellement les plus gênantes ;
- Prévoir des couleurs claires pour les murs, le plafond et les autres surfaces les plus déterminantes pour le confort visuel.

10. Autres paramètres

1. Papillotement et effets stroboscopiques :

La qualité de l'éclairage LED a évolué rapidement, les processus de production se sont améliorés et des exigences de plus en plus élevées sont imposées à l'éclairage. D'autant plus que la différence de qualité entre les différents systèmes d'éclairage devient de plus en plus notable. Néanmoins, dans la pratique, le papillotement et l'effet stroboscopique continuent à se produire. Tous deux sont très désagréables et peuvent causer des maux de tête, de la fatigue et des irritations. La recherche indique qu'il existe des différences majeures dans la façon dont les personnes éprouvent ou ressentent ces effets. Néanmoins, le papillotement et l'effet stroboscopique diffèrent l'un de l'autre.

Les variations temporelles du flux lumineux peuvent provoquer des papillotements visibles ou un effet stroboscopique. Les effets stroboscopiques sont une modification perceptible du mouvement et/ou de l'apparence d'un objet en mouvement lorsqu'il est éclairé par une source lumineuse d'intensité variable. Les fabricants de lampes, les importateurs et les autres parties impliquées doivent s'assurer que leurs produits sont conformes à la nouvelle réglementation. La directive européenne sur l'écoconception (UE) 2019/2020 définit le cadre et les critères de performance auxquels les produits et les équipements électriques, y compris les sources lumineuses LED, doivent satisfaire pour pouvoir légalement être mis sur le marché. Cela inclut également des exigences fonctionnelles pour les sources lumineuses concernant le papillotement et l'effet stroboscopique. C'est en partie grâce à ceci que les produits d'éclairage sont en principe couverts par le marquage CE pour ces sujets.

La nouvelle version de la norme NBN EN 12464-1 introduit deux nouveaux paramètres pour ces effets : l'indicateur de modulation/papillotement de la lumière de courte durée (PstLM) et la mesure de visibilité stroboscopique (SVM). Ces deux nouveaux paramètres remplacent l'ancien degré de modulation (MD) et le papillotement (FI). Ces deux méthodes de mesure n'ont pas donné une valeur objective pour le niveau de papillotement et d'effet stroboscopique tel qu'il a été réellement observé par les personnes. Une description détaillée des nouvelles mesures et méthodes est respectivement donnée dans les rapports techniques internationaux IEC TR 61547- 1 :2020 et IEC TR 63158 :2018.

Avant d'entrer dans les détails, nous devons d'abord clarifier la distinction entre le papillotement et l'effet stroboscopique, deux phénomènes différents qui seront évalués d'une manière spécifique.

	Papillotement	Effet stroboscopique
Gamme de fréquences	0,3 - 80Hz	80 - 2000Hz
Visibilité	Directement visible à l'œil nu	Pas directement ou difficilement visible à l'œil nu.
Observations	Lorsque la source lumineuse, l'œil et l'objet sont statiques	Lorsque l'objet se déplace et que la source lumineuse et l'œil sont statiques
Effet	Succession rapide de la lumière et de l'obscurité	Vu comme un mouvement haché.
Dangers	Peut provoquer des convulsions chez les personnes très sensibles	Objets en rotation*
Plaintes	Gêne, fatigue, maux de tête	
Métrique	P_{stLM} : indicateur de modulation/papillotement de la lumière de courte durée Défini par : IEC/TR 61547-1 IEC 61000-4-15	SVM : mesure de visibilité stroboscopique Défini par : IEC/TR 61547-1 IEC 61000-3-3 IEC 61000-4-15
Valeur limite	$P_{stLM} = 1$ est la modulation que 50% des personnes peuvent percevoir	La valeur SVM = 1 représente le seuil de visibilité pour un observateur moyen

* Remarque : on sait que les effets stroboscopiques peuvent également constituer un danger lorsque l'on travaille avec des machines contenant des objets rotatifs (moteurs, tours et fraiseuses, ...). Dans certaines circonstances, ils semblent alors être à l'arrêt. Ce phénomène sort du cadre de cet explicatif car nous ne traitons que des effets qui affectent le confort et le bien-être des personnes.

Figure 12 : Exemples d'effet stroboscopique d'un objet en mouvement (source Malgorzata Perz-TU Eindhoven)

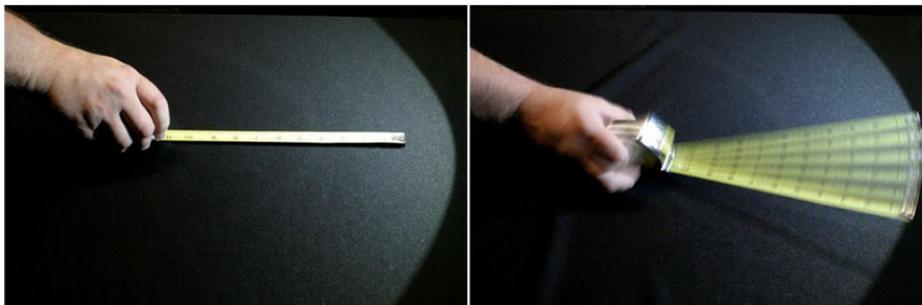
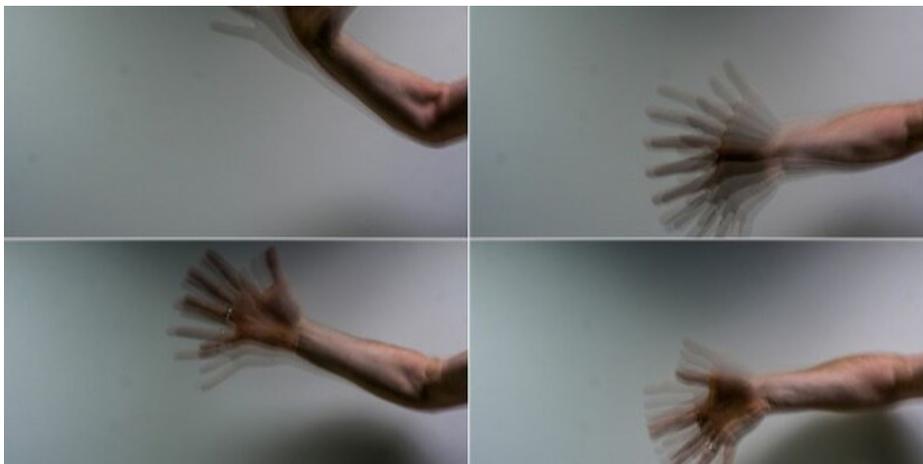


Figure 13 : Effet stroboscopique d'une source lumineuse, capturé avec une caméra mobile



Causes possibles du papillotement et de l'effet stroboscopique :

- Technologie utilisée pour régler la source lumineuse et le driver
- Technologie de gradation pour les gradateurs extérieurs ou les régulateurs de niveau internes
- Le degré d'atténuation du signal et donc le niveau de lumière émis par le luminaire
- Fluctuations de la tension du secteur (ce qui peut souvent être observé avec les lampes de rétrofit)
- Fréquence et taille de l'ondulation, entraînant directement des variations de lumière
- Vitesse de déplacement de l'objet observé
- Sensibilité de l'observateur et angle de vue
- Éclairage ambiant

En pratique, les fréquences supérieures à 2000 Hz posent rarement des problèmes, quelle que soit la hauteur de la modulation. Si une LED fonctionne sous une tension continue où la source lumineuse est allumée en continu, nous ne sommes pas dérangés par les effets ci-dessus. Les effets temporels commencent à jouer lors de l'utilisation de drivers AC/DC ou de lampes rétrofit où l'ondulation de tension secteur de 100 Hz devient visible via la source lumineuse. Les deux effets sont décrits d'une manière différente et des méthodes de calcul spécifiques sont utilisées pour déterminer leur influence.

Le papillotement et les effets stroboscopiques peuvent être mesurés dans des conditions de laboratoire. Pour mesurer les paramètres de papillotement de la source lumineuse, un équipement spécifique composé d'un système de photodétection de haute performance, complété par un filtre optique V-lambda, qui permet d'ajuster la courbe de sensibilité du système aux caractéristiques de l'œil humain. En pratique, il existe également sur le marché des appareils de mesure du papillotement qui peuvent mesurer le PstLM et le SVM et donner une indication du papillotement et/ou de l'effet stroboscopique avec une source lumineuse. Il faut savoir que ces mesures ne peuvent pas donner les mêmes résultats que celles provenant d'un laboratoire et ne sont donc qu'indicatives.

2. Rendu des couleurs et température de couleur

Le rendu des couleurs dans l'éclairage est représenté par l'indice de rendu des couleurs (R_a) (*Colour Rendering Index*). L'indice de rendu des couleurs R_a d'une source lumineuse indique la fidélité de l'impression visuelle des couleurs lorsqu'un objet est exposé par la source lumineuse en question par rapport à une source de référence. Pour l'expérience visuelle, en particulier dans certains environnements tels que les musées ou les écoles d'art, il est important que les couleurs des objets et la peau des personnes soient rendus de manière naturelle dans son environnement. L'indice de rendu des couleurs (R_a) minimal dans la plupart des espaces de travail ne doit pas être inférieur à 80 et dans les espaces de travail avec des exigences spéciales pas inférieur à 90.

La température de couleur T_{cp} (*Colour temperature*) est exprimée en Kelvin. Plus la température de

couleur est élevée, plus la lumière est froide. Plus la température de couleur est basse, plus la lumière est chaude. Sous la lumière naturelle, la température de couleur varie tout au long de la journée. La norme ne spécifie aucune valeur limite pour cela car ce paramètre dépend principalement de considérations psychologiques et esthétiques. Cependant, une classification de la température de couleur des sources lumineuses est proposée. Les températures de couleur inférieures à 3300 K sont appelées chaudes, tandis que les températures de couleur supérieures à 5300 K sont considérées comme froides. Toutes les sources lumineuses avec des valeurs intermédiaires sont neutres.

3. Écran de visualisation (DSE - Display Screen Equipment)

Il existe des exigences spécifiques lorsque vous travaillez devant des écrans (voir section 5.9 de la norme). Pour ce type de travail, il est important que les contrastes de l'écran ne soit pas perdus, par exemple par des réflexions de lumière. À cette fin, la norme impose des exigences sur la luminance émise par les luminaires utilisés au-dessus de 65°. En fonction de la luminance de l'écran et du type d'utilisation, la limite pour le luminaire est déterminée (Figure 14). En pratique, les écrans récents pour bureau ont une luminance réglable entre 200 cd/m² et 1000 cd/m² dans la partie blanche et de nombreux logiciels sont configurés par défaut pour fonctionner avec un fond blanc, ce qui limite la luminance du luminaire à ≤3000cd/m². En cas de polarité négative (= fond noir ou sombre) ou de luminance inférieure de l'écran, le luminaire doit avoir un contrôle de luminance plus strict.

Ce qui précède n'est valable que pour les écrans fixes. Pour les écrans mobiles, la norme n'impose pas encore d'exigences, mais un placement judicieux des luminaires dans la pièce peut réduire le problème des reflets gênants.

Figure 14 : Valeurs limites de la luminance des luminaires lorsqu'on travail devant un écran (source : ETAP)

Luminosité de l'écran*		Écran à haute luminosité L > 200 cd/m ²	Écran avec luminosité moyenne L ≤ 200 cd/m ²
Cas A	polarité positive et exigences normales en matière de couleur et de détail des informations affichées, par exemple dans les bureaux, les établissements d'enseignement, etc.	≤ 3000 cd/m ²	≤ 1500 cd/m ²
Cas B	polarité négative et/ou des exigences plus strictes en ce qui concerne le détail des couleurs de l'information affichée, par exemple pour l'inspection des couleurs de la CAO, etc.	≤ 1500 cd/m ²	≤ 1000 cd/m ²

* La luminance de l'écran (voir EN ISO 924 1-302) décrit la luminance maximale de la partie blanche de l'écran. Cette valeur peut être demandée au fabricant de l'écran.

11. Gestion de l'éclairage

La gestion ou le réglage de l'éclairage est important pour le confort visuel, la facilité d'utilisation et peut contribuer aux économies d'énergie. Divers systèmes de commande ou de commutation peuvent réduire considérablement la consommation d'énergie lorsqu'il y a un éclairage naturel suffisant dans les pièces, par exemple lors de l'utilisation d'une gestion en fonction de l'apport de lumière du jour combinés à de la détection des absences. La consommation d'énergie de l'installation d'éclairage est déterminée non seulement par l'efficacité des luminaires eux-mêmes et la consommation d'énergie des équipements auxiliaires nécessaires, mais également par le temps de fonctionnement. Pour des raisons de confort et d'ambiance, un système de gestion de la lumière peut également être intéressant pour garantir la flexibilité. La gradation, l'allumage (marche/arrêt) ou le changement de la teinte de couleur de la lumière sont ainsi possibles en fonction de l'application, de l'heure et/ou de la présence/absence de quelqu'un. Dans tous les cas, le système doit concilier les critères de confort, de bien-être et de performance énergétique à tout moment.

Les systèmes de gestion de l'éclairage sont des systèmes qui permettent de contrôler et d'ajuster l'installation d'éclairage par groupe de luminaires, par zone ou même pour un bâtiment entier. La norme distingue deux possibilités de gestion de l'éclairage. Si le système de gestion de l'éclairage permet de gérer le flux lumineux de l'éclairage et d'autres fonctionnalités, telles que la variation de la température de couleur, on parle d'un système contrôlable ('controllable'). Un système qui ne peut régler que le flux lumineux des luminaires en fonction d'une commande du système de gestion ou d'une action manuelle est appelé dimmable ('dimmable').

Les systèmes de gestion pour l'éclairage artificiel peuvent généralement être divisés en deux catégories, à savoir les systèmes manuels et automatiques. Des systèmes de gestion avancés pour l'éclairage peuvent être programmés pour créer la bonne ambiance au bon moment. Il est toujours conseillé de laisser aux utilisateurs la possibilité d'ajuster l'éclairage à leurs besoins. Le concept de base est toujours d'utiliser l'éclairage artificiel uniquement dans la zone où la lumière est nécessaire. Ceci est particulièrement utile dans les grands espaces qui sont souvent partiellement occupés ou divisés en différents lieux fonctionnels. La division favorable de l'installation d'éclairage en zones est donc un élément important. Enfin, une installation, un réglage et un suivi corrects (commissioning) sont essentiels.

L'application de systèmes de gestion de l'éclairage est également utile du fait de la flexibilité offerte. Des systèmes de gestion efficaces avec un contrôle individuel des luminaires peuvent facilement être reprogrammés si, par exemple, les tâches visuelles changent ou si les travailleurs ont des besoins visuels spécifiques.

Les systèmes de gestion de l'éclairage peuvent également être liés à un contrôle horaire ou à un système de rapportage sur l'état des luminaires, ce qui permet un meilleur entretien. Au fur et à mesure que l'installation vieillit, l'éclairage fournit diminue tandis que la consommation d'énergie reste à peu près la même, de sorte que l'efficacité de l'installation se réduit progressivement.

On estime que la consommation d'électricité pour l'éclairage des bâtiments tertiaires varie en moyenne entre 25 et 40 % de la consommation totale d'électricité. Pour les maisons, cette part est plus limitée et est généralement inférieure à 10%. L'énergie pour l'utilisation de l'éclairage peut être encore limitée par les développements technologiques, mais aussi par de meilleures conceptions d'éclairage et un entretien approprié. Des luminaires LED à haute efficacité énergétique sont désormais disponibles pour les applications les plus diverses. En outre, l'efficacité des luminaires est améliorée grâce à une optique plus efficace. Une réduction complémentaire de la consommation d'énergie est également possible en prévoyant des systèmes de gestion de l'éclairage appropriés, en particulier en combinaison avec des mesures structurelles pour apporter plus de lumière naturelle dans la pièce.

Les méthodes de calcul pour estimer la consommation d'énergie pour l'éclairage ne sont pas données dans la norme NBN EN 12464-1, mais sont proposées dans la norme spécifique NBN EN 15193-1. Cette norme décrit une méthode conventionnelle pour calculer la consommation d'éclairage, en tenant compte, entre autres, de la gestion de l'éclairage. Le résultat est exprimé en une valeur unique du LENI (Lighting Energy Numeric Indicator), qui est une mesure de la consommation annuelle d'énergie par mètre carré de surface de plancher.

12. Conception de l'éclairage

Faire un plan d'éclairage sérieux est essentiel pour établir un état des lieux de la situation et pour ajuster parfaitement l'installation d'éclairage aux besoins. Tout d'abord, il faut avoir une vue d'ensemble précise du bâtiment et de ses différents espaces. Les dimensions, telles que la hauteur du plafond, les facteurs de réflexion des surfaces et l'apport de lumière naturelle sont importants. Ensuite, il est nécessaire de connaître les souhaits des utilisateurs et du client. A ce stade il est important de définir les fonctions de l'éclairage et la disposition souhaitée des pièces. En général, vous devriez toujours vous demander qui sont les groupes d'utilisateurs, quels sont leurs besoins, quelles sont les dynamiques et les expériences dans un espace, quelles expériences vous souhaitez créer et comment les mettre en place concrètement dans un concept. Ensuite, on peut commencer à établir un plan d'éclairage basé sur les exigences de conception et un choix approprié pour les composants d'éclairage.

Le processus de détermination des exigences applicables à chaque pièce est décrit au paragraphe 6 de la norme NBN EN 12464-1. Les étapes essentielles de cette partie du processus de conception sont d'abord et avant tout liées aux tâches et activités visuelles, puis à l'éclairage général de la pièce. Les étapes suivantes sont explicitement indiquées :

1. Définir avec précision les zones de travail et les zones d'activités dans la pièce. Cela signifie que l'emplacement et la position de toutes les zones de référence doivent être déterminés.
2. Sélectionnez le type de tâches visuelles qui convient le mieux à la situation, en fonction de la liste des activités incluses dans les tableaux.
3. Déterminez les valeurs cibles pour les exigences de chaque zone de travail/activité ($\bar{E}_{m'}$, $U_{a'}$, $R_{a'}$, R_{UGL}) en fonction des premières colonnes des tableaux. ('exigences relatives à la tâche ou à l'activité')
4. Vérifier s'il existe ou non des circonstances spécifiques qui entraîneraient l'ajustement des exigences relatives aux éclairages à maintenir. ('caractéristiques liées au contexte' voir 5.3.3 de la norme EN 12464-1)
5. Déduire les exigences d'éclairement sur la zone environnante immédiate et l'arrière-fond en fonction des exigences des zones de travail/activité.
6. Définir les surfaces représentatives de la pièce qui déterminent la perception des travailleurs, en particulier les murs et les plafonds les plus marquants présents dans le champ de vision.
7. Déterminer les valeurs guides pour les paramètres liés à l'espace dans les tableaux ($\bar{E}_{m,z'}$, $\bar{E}_{m,mur'}$, $\bar{E}_{m,plafond}$). ('objets et personnes' / 'luminosité de la pièce')
8. Si des circonstances particulières s'appliquent aux exigences relatives aux zones de travail/activité (voir étape 4), les valeurs cibles pour l'éclairement cylindrique et les éclairages sur les surfaces délimitant l'espace doivent être augmentées d'un nombre égal de crans.

Pour un dimensionnement optimal de l'installation d'éclairage, il est important de déterminer correctement toutes les zones de références. Afin d'éviter les surdimensionnements, toutes les zones de travail/activités doivent pouvoir être localisées précisément. Cependant, parfois dans la phase de conception, les zones de travail sont inconnues ou pas encore définies, il est alors conseillé de concevoir l'installation d'éclairage de manière que les ajustements nécessaires soient possibles par la suite. Cela peut être fait soit en calculant avec un éclairement et une uniformité inférieure à déterminer ($U_0 > 0,40$), après quoi l'installation d'éclairage est réétudiée ; soit en considérant l'ensemble des plans de travail comme des zones de travail/activité et de les dimensionner pour l'éclairement correspondant aux tâches prévues. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de rendre l'éclairage contrôlable ou dimmable. De cette manière, dans des zones définies, l'éclairement peut ensuite être réglé sur les valeurs cibles demandées. À partir du moment où les tâches et les activités sont mieux définies, la conception de l'éclairage doit donc être revue et ajustée si nécessaire. Même lorsque la disposition des postes de travail change, une révision est toujours nécessaire.

En absence de données spécifiques, une surface horizontale à une hauteur de 0,85 m du sol est alors prise comme plan de travail. Si le plan de référence atteint les murs ou le mobilier qui délimite l'espace, une zone de bord de 0,50 m peut être exclue de celle-ci, sauf si des zones de travail/activité sont possibles dans cette partie. Toutefois, cette zone de bord ne doit jamais dépasser 15 % de la plus petite taille du plan de référence. Concrètement, cela signifie que dans les pièces dont la taille est inférieure à 3,33 m, une zone de bord plus petite doit être utilisée.

Toutes les zones de référence contiennent un maillage de points. Ce maillage de points bidimensionnelle détermine les endroits où un éclairement est calculé ou mesuré. Le pas du maillage est limité selon une formule dépendant de la plus grande taille de l'espace. Au plus de points de maillage au plus les résultats seront précis. Il est donc conseillé d'utiliser de petits pas pour le maillage et d'utiliser des espacements équivalents dans les deux sens. À moins que l'espace n'ait une taille inférieure à 4 mètres, il est préférable de garder une distance entre les points du maillage de 0,5 m. Pour comparer différentes études de lumière, un maillage identique est toujours recommandé.

Le rendement lumineux des luminaires diminue au fil du temps, notamment par l'encrassement de l'optique et par la réduction du flux lumineux émis. Afin d'assurer l'éclairage à maintenir sur les différentes zones de références, cette réduction doit être prise en compte. La baisse du rendement lumineux est causée par divers paramètres dépendant du vieillissement de l'installation, mais aussi des espaces. Le facteur de maintenance (Maintenance Factor) est destiné à prédire la diminution de l'éclairage à la fin de la période d'utilisation. Ce facteur doit être déterminé conformément aux spécifications de la norme ISO/CIE TS 22012. Ce nouveau document reprend la même méthode que la CIE 97 de 2005 mais ajoute des caractéristiques spécifiques pour l'éclairage LED, et en particulier les normes et directives qui décrivent la durée de vie des luminaires LED.

L'éclairage initial \bar{E}_i est lié à l'éclairage à maintenir \bar{E}_m via la formule suivante :

$$\bar{E}_i = \bar{E}_m / f_m$$

Le facteur de maintenance comprend quatre facteurs et est décrit par :

$$f_m = f_{LF} \cdot f_S \cdot f_{LM} \cdot f_{SM}$$

Où :

- f_m Facteur de maintenance (MF).
- f_{LF} (Lumen Factor) Facteur de maintenance des sources lumineuses et/ou des luminaires dans le temps (valeur L).
- f_S (Lamp Survival) Taux de survie des sources lumineuses et/ou des luminaires dans le temps.
- f_{LM} (Luminaire Maintenance) Facteur de maintenance pour les luminaires dans le temps, en tenant compte d'encrassement variable en fonction des activités et utilisation de l'espace.
- f_{SM} (Surface Maintenance) Facteur de maintenance de la pièce, tenant compte du vieillissement des surfaces de sols, de plafonds et de murs au fil du temps (ce facteur ne s'applique qu'à l'éclairage intérieur).

Le concepteur doit prendre en compte ces différents paramètres lors de la détermination du facteur de maintenance. Les deux premiers facteurs dépendent du produit d'éclairage et peuvent donc être demandés au fournisseur ou au fabricant des luminaires. Les performances en matière de dépréciation des luminaires sont toutefois sensibles à la température de fonctionnement dans la pièce. C'est pourquoi il est important de mentionner ce paramètre dans les spécifications pour la conception. Les deux derniers facteurs dépendent plutôt de l'application. La baisse de l'éclairage due à la pollution dans la pièce dépend principalement de la mesure dans laquelle le travail effectué est salissant. Les hypothèses liées à l'encrassement doivent être déterminées par projet en consultation avec le client, non seulement pour déterminer les types d'activités et le type de luminaires utilisés, mais aussi en fonction du programme de maintenance.

Un élément important dans la conception et pour la détermination d'un facteur de maintenance est d'évaluer la durée de vie utile de l'installation. La figure 15 donne une valeur guide pour les temps d'utilisation qui se produisent généralement dans différentes applications.

Durée d'utilisation moyenne annuelle en fonction du type de bâtiment

Figure 15 : Durée moyenne d'utilisation annuelle de l'éclairage

Type de bâtiment	Durée d'utilisation annuelle moyenne
Bâtiments résidentiels/hôtels (locaux résidentiels)	1000 h
Écoles/bibliothèques/musées	2000 h
Bureaux	2500 h
Restaurants	2500 h
Immeuble collectif d'habitation (parties communes)	3000 h
Commerces	3500 h
Installations sportives	4000 h
Industrie	4000 h
Hôpitaux	5000 h
Hôtels (parties communes)	5000 h
Commerces (éclairage de veille)	6000 h
Industrie (éclairage continu jour/nuit)	8000 h

13. Mesurer la lumière

La mesure des installations d'éclairage dans les environnements de travail est pertinente pour, d'une part, pouvoir évaluer les situations existantes et pour, d'autre part, comparer les résultats des études de lumière avec la réalité après l'installation (à la réception ou après la période de garantie). Le but des mesures est donc généralement de vérifier l'éclairage et certains paramètres de confort visuel tels qu'ils surviennent réellement dans la pièce afin d'obtenir une bonne installation d'éclairage comme résultat final. Étant donné que la situation réelle est déterminante pour les utilisateurs, les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs de conception et les valeurs cibles.

Compte tenu de l'évolution continue de la technologie des sources lumineuses (LED, OLEDs, etc.), des possibilités des systèmes de gestion numérique, des réglementations et directives de plus en plus complètes liées au confort et au bien-être, la mesure de l'éclairage des lieux de travail n'est pas devenue plus facile. Une tendance émergente est l'évolution vers l'utilisation plus flexible des lieux de travail, ce qui rend la mise en service ('commissioning') plus complexes. Les mesures devraient être effectuées avant la réception et aussi à chaque inspection d'une installation d'éclairage. Si le bâtiment est déjà utilisé, il peut être utile d'ajuster l'éclairage sur base des mesures d'éclairage, par exemple si les tâches sont organisées différemment. Les systèmes de gestion peuvent contribuer à assurer cette flexibilité et, notamment à garantir la continuité des niveaux d'éclairage.

Mesurer est donc d'une importance absolue et la norme NBN EN 12464-1 peut servir de guide. Avec un bon appareil et une bonne approche méthodologique, on peut déjà apprendre beaucoup sur le confort visuel, mais tout ne peut pas être mesuré sur place. Des aspects tels que l'éblouissement (voir 8.3 de la norme), le rendu des couleurs (voir 8.4 de la norme) et la luminosité des luminaires (voir 8.5 de la norme) seront généralement fournis par le fabricant. Les éclairages peuvent être mesurés relativement facilement, mais les valeurs de luminance sont déjà plus difficiles à déterminer, en partie parce que cela dépend de la direction de vue et des caractéristiques du matériau/surface. Les appareils de mesure portables mesurant le spectre lumineux ne donnent qu'une indication mais ne peuvent pas être représentatifs en raison des écarts parfois importants. Le papillotement et les effets stroboscopiques doivent être mesurés en laboratoire via un équipement spécifique.

Les mesures devraient être effectuées dans un état correspondant à l'utilisation quotidienne, c'est-à-dire avec du mobilier et toute autre infrastructure nécessaire à l'exécution des tâches. Les mesures de l'éclairage sont effectuées sans lumière du jour et, en principe, des stores mobiles et des écrans occultants doivent être relevés de manière à ne pas impacter les mesures. La première étape d'un examen consiste à vérifier les données réelles sur la pièce, telles que les dimensions, la position des plans de travail et de l'équipement, la couleur et la texture des surfaces etc., par rapport aux hypothèses utilisées dans les calculs.

Par la suite, les positions de mesure seront tracées avec précision dans l'espace. Les points de mesure doivent coïncider avec des positions des points de maillage de calcul utilisées dans l'étude d'éclairage. Les dispositions pour le maillage, y compris le pas du maillage des points de mesure, seront conformes aux directives normatives (section 5.4). Selon la norme, toutes les surfaces visibles doivent être prises en compte afin d'obtenir une distribution lumineuse équilibrée, de sorte que des mesures seraient à effectuer sur toutes les surfaces représentatives de la pièce. Avant d'entamer les mesures, les luminaires des zones concernées doivent fournir un flux lumineux stable et ce pendant toute la durée des mesures (situation Steady-state).

Les méthodes de contrôle sont effectuées conformément aux exigences générales du paragraphe 8 de la norme avec les dispositions supplémentaires suivantes :

- Les positions et le nombre de points de mesure doivent être déterminés de manière à obtenir une valeur caractéristique de l'éclairement moyen sur la zone de référence. Les points de mesure sont placés en fonction des points du maillage de calculs d'éclairage. Au moins 3 points de mesure sont requis pour chaque zone de travail/activité. Pour les murs et les plafonds et pour la zone d'arrière-fond, il est important de choisir les points de mesure les plus représentatifs.
- Les éclairagements sont mesurés perpendiculairement aux surfaces de référence, ce qui est parfois plus difficile pour les zones de travail/activités inclinées.
- Si des systèmes de gestion de l'éclairage ont été appliqués, les mesures de la lumière seront effectuées avec l'installation d'éclairage dans un état telle que décrite dans les études d'éclairage et avec le réglage tel qu'utilisé dans la phase d'utilisation courante. En complément, des tests peuvent être effectués au niveau maximum de lumière.
- Utilisation des photomètres de haute qualité⁹. L'appareil de mesure sera de classe B déterminé selon les normes DIN 5032 ou ISO/CIE 19476 : 2014 ou mieux. Pour les mesures de luminaires à LED en particulier, les spécifications supplémentaires suivantes pour les appareils de mesure sont valables : le 'spectral mismatch' f1' du dispositif de mesure doit être inférieur à 3,0%.
- Les appareils de mesure doivent être étalonnés régulièrement. Idéalement, les instruments de mesure sont étalonnés chaque année par un organisme reconnu. Des certificats d'étalonnage doivent être disponibles pour démontrer la validité de l'appareil.
- ...

Un rapport est établi par le contractant pour chaque mesure d'évaluation. Le rapport devrait contenir au moins les éléments suivants :

- Description générale de la mission de mesure (lieu, client, ...)
- La taille et la position de toutes les zones de référence
- Plan de mesure et résultats de mesure
- Date et heure de la mesure
- Instruments de mesure utilisés, leur date étalonnage et éventuellement les facteurs de correction appliqués
- Conclusions et recommandations

⁹ Afin de limiter l'incertitude de mesure, il est important de faire calibrer le photomètre par rapport à une source de référence spécifique. Pour chaque type de source lumineuse, avec son spectre spécifique, l'écart variera. D'autres causes d'incertitudes de mesure peuvent être la lumière à incidente majoritairement oblique, ce qui rend la mesure moins précise ('cosine correction'), les influences de la température ou le vieillissement/encrassement de la cellule de mesure. De ce fait il est nécessaire de recalibrage régulièrement les appareils.

14. Terminologie et définitions

Pour les définitions, la norme NBN EN 12464-1 fait référence aux dernières versions des normes NBN EN 12665 et NBN EN 17037. Cette section énumère les principaux concepts pertinents pour ce document.

Nederlands	English (Standard/reference)	Français
Werkplek	Work place (EN 12665 / 3.5.95)	Lieu de travail
Werkpost	Work station (EN 12665 / 3.5.97)	Poste de travail
Werkvlak	Work plane = working plane (EN 12665 / 3.5.96)	Plan de travail = plan utile
Activiteitsgebied	Activity area (EN 12464-1 / 3.1)	Zone d'activité
Taakgebied	Task area (EN 12665 / 3.5.77)	Zone de travail *
Referentievlak	Reference area (EN 12665 / 3.2.20)	Surface de référence
Direct aangrenzende zone	immediate surrounding area (EN 12665 / 3.5.76)	Zone environnante immédiate
Achtergrond	Background area (EN 12665 / 3.5.27)	Zone de fond
Rasterpunten	Grid points (EN 12665 / 3.5.49)	Points de maillage
Celmaat rekenraster	Grid spacing	Pas du maillage
Modellering	Modelling (EN 12464-1 / 3.2)	Modélisation
Onderhoudsfactor	Maintenance factor (EN 12665 / 4.7.2)	Facteur de maintenance
Te behouden verlichtingssterkte	Maintained illuminance (EN 12665 / 3.2.14)	Eclairage à maintenir
Initiële verlichtingssterkte	Initial illuminance (EN 12665 / 3.2.15)	Eclairage initial
Cilindrische verlichtingssterkte	Cylindrical illuminance (EN 12665 / 3.2.18)	Eclairage cylindrique
Gelijkmatigheid verlichtingssterkte	Illuminance uniformity (EN 12665 / 3.2.53)	Uniformité d'éclairage
Verblinding	Glare (EN 12665 / 3.1.8)	Eblouissement
Onbehaaglijke verblinding	Discomfort glare (EN 12665 / 3.2.22)	Eblouissement inconfortable
Belemmerende verblinding	Disability glare (EN 12665 / 3.2.21)	Eblouissement perturbateur

* La version française de la norme propose le terme 'aire d'une tâche', mais dans ce document nous utiliseront le concept de 'zone d'activité' en remplacement.

Voici quelques définitions essentielles :

Lieu de travail (EN 12665 / 3.9.95)

Espace où des postes de travail sont aménagés pour les travailleurs dans l'exercice de leurs fonctions. Le lieu de travail est donc un concept général qui fait référence au lieu de travail des personnes.

Poste de travail (EN 12665 / 3.5.97)

Combinaison de la disposition spatiale et des exigences qui sont importantes pour la bonne exécution d'une tâche dans un certain environnement.

Plan de travail (EN 12265 / 3.5.96)

Zone où les tâches visuelles prévues ont normalement lieu. Habituellement, pour les environnements de bureau, il s'agit d'un plan horizontal où un meuble est prévu. Mais le plan de travail peut aussi être une autre surface comme une étagère dans une bibliothèque ou un tableau ou encore un écran sur le mur dans un environnement scolaire.

Zone d'activité (activity area) (EN 12464-1 / 3.1)

Surface où plusieurs tâches visuelles différentes peuvent avoir lieu. Ces tâches visuelles peuvent être de nature différente et peuvent également être effectuées dans des zones spécifiques de la zone d'activité. Une zone relativement vaste où diverses tâches sont effectuées ne devrait pas être considérée comme une zone d'activité.

Zone de travail (task area) (EN 12665 / 3.5.77)

Partie du plan de travail où des tâches visuelles spécifiques sont effectuées. En principe, la zone de travail ne contient qu'une seule tâche visuelle bien définie. La taille la zone de travail dépend du type de tâche et, en particulier, de la distance d'observation et de la précision souhaitées.

Zone de référence (EN 12665 / 3.2.20)

Surface quelconque où les propriétés d'éclairage peuvent être prescrites et qui peuvent ensuite être mesurées. Le terme zone de référence est donc un terme commun pour toutes les surfaces où des exigences d'éclairage sont spécifiées, telles que les plans de travail ou zone d'activité, les zones de travail ou même des surfaces telles que les murs et les plafonds.

Zone environnante immédiate (EN 12665 / 3.5.76)

La zone environnante immédiate est une surface autour de la zone de travail à l'intérieur du champ de vision. La zone environnante immédiate se situe dans le même plan que la zone de travail/activité à laquelle elle appartient.

Uniformité (EN 12665 / 3.2.53)

L'uniformité d'éclairage est le rapport entre l'éclairage minimal d'une surface (plan de travail ou autre zone de référence) et l'éclairage moyen d'une même surface.

$$U_0 = E_{\min} / E_{\text{gem}}$$

Éclairage à maintenir \bar{E}_m (EN 12665 / 3.2.14)

Valeur guide de l'éclairage moyen sur une zone de référence spécifique en dessous duquel l'éclairage moyen effectif ne peut pas retomber. Le vieillissement et les défauts des sources lumineuses ainsi que l'encrassement (luminaires, murs, plafonds, etc.) peuvent résulter en moins de lumière. L'entretien régulier est très important puisque l'éclairage fourni par l'installation diminue avec le temps.

Facteur de maintenance (f_m) (EN 12665 / 3.5.18)

Rapport entre l'éclairage moyen sur un plan de référence après une durée de vie d'une installation donnée et l'éclairage moyen dans les mêmes conditions d'une installation considérée comme étant neuve. Le facteur de maintenance dépend de divers paramètres liés au vieillissement de l'installation et de l'espace.

Auteurs par ordre alphabétique) :

Luc Coppens (Techno Specials), Ward De Ketelaere (ETAP Lighting), Kris Delahaye (ETAP Lighting), Arnaud Deneyer (Buildwise), Bertrand Deroisy (VUB, ex-Buildwise), Eric Lambert (Regie der Gebouwen), Catherine Lootens (Groen Licht Vlaanderen), Ignacio Molina (Volta), Wouter Ryckaert (KU Leuven), Marc Vanden Bosch (IBE-BIV), Jan Van Riel (Trilux), Stefan Van Thillo (Zumtobel), Wouter Wissink (Volta)

IBE-BIV

BELGISCH INSTITUUT voor VERLICHTINGSKUNDE
INSTITUT BELGE de l'ECLAIRAGE
CIE NATIONAL COMMITTEE – NBN SECTOR OPERATOR

