

Étude de cas

FABRICATION D'ÉCLAIRAGE LED POUR LE DOMAINE MÉDICAL: ÉVALUATION DES PROTECTIONS OPTIQUES

CÉLINE
RUIILLARD
Carsat Centre –
Val-de-Loire,
département
Prévention
des risques
professionnels /
Circop

DAMIEN
BRISSINGER
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

→ **LA PROBLÉMATIQUE:** Dans le domaine médical, la réalisation de tâches précises et délicates (en bloc opératoire par exemple) nécessite un éclairage contrôlé répondant à différents impératifs ergonomiques. Cette contrainte a conduit à la recherche d'éclairages modulables, permettant d'obtenir des niveaux d'éclairements importants dans le domaine de la lumière visible et avec une colorimétrie maîtrisée. Pour répondre à ces impératifs, différentes technologies se sont succédé: lampes à incandescence, lampes fluorescentes et plus récemment, diodes électroluminescentes (technologie « led » de l'anglais *light emitting diode*). Pour des raisons énergétiques et économiques, le secteur généralise aujourd'hui l'usage de ces dernières. L'efficacité de la conversion électricité-lumière des led, la très faible émission de rayonnements parasites potentiellement délétères (ultraviolet, infrarouge) ainsi que leur supposée longue durée de vie, font, que cette technologie s'impose, depuis l'éclairage général jusqu'aux usages spécifiques, dans de nombreux domaines, tels que l'éclairage médical, automobile, scénique et horticole...

Les contrôles visuels nécessaires à l'assemblage des luminaires requièrent parfois l'allumage des led à des niveaux d'intensité importants. La spécificité des led doit évidemment être prise en compte pour l'évaluation des risques liés aux rayonnements optiques au cours de la fabrication des luminaires intégrant cette nouvelle technologie. Il est admis que l'observation directe, même fugace, de ces dispositifs aux postes de contrôle ou dans leur environnement peut être la source d'un éblouissement, parfois persistant jusqu'à plusieurs minutes et qui peut s'avérer gênant, voire dangereux pour la continuité de l'activité. De plus, l'usage de led de très forte intensité est également susceptible de provoquer des lésions invalidantes de la rétine par effet photochimique. Qu'il s'agisse de risques d'atteintes irréversibles ou d'un éblouissement d'inconfort, la mise en place de mesures de protection est nécessaire pour la sécurité des salariés exposés (fabricants, utilisateurs).

→ L'APPORT DE L'INRS, DE LA CARSAT ET DU CIRCOP

L'étude, objet de cet article, a été conduite dans une entreprise d'assemblage de luminaires médicaux constitués de sources led. Au cours de l'évolution de ses lignes de production pour intégrer la technologie led, différentes mesures de protection ont été envisagées, grâce notamment aux compétences internes de l'entreprise. Les bancs de contrôle ont été modifiés en prenant en compte la problématique liée aux rayonnements optiques artificiels et la prévention des risques sur la base de mesures réalisées par le Circop (Centre inter-régional de mesures physiques de la Carsat Centre-Val-de-Loire). Les solutions mises en œuvre ont permis de respecter les impératifs des contrôles indispensables à la production, tout en réduisant au maximum les risques d'exposition à ces postes qui nécessitent l'allumage des luminaires, ainsi qu'aux postes environnants.

Deux types de mesures ont été réalisées pour aider à la prévention des risques associés aux rayonnements optiques : des mesures spectrales de l'émission des led, et des mesures d'UGR (indice d'éblouissement unifié de l'anglais *unified glare rating*) (cf. Encadré 2) aux différents postes de contrôle. Elles ont permis d'objectiver les risques, d'évaluer de manière quantitative la pertinence des actions mises en œuvre et finalement, d'identifier les postes qui nécessitent des efforts supplémentaires.

Description des situations de travail observées

La fabrication de luminaires à led requiert d'assembler au sein d'un même bloc d'éclairage l'électronique permettant d'activer plusieurs fonctions (modulation d'intensité, de couleur...), les éléments d'optique nécessaires à la répartition spatiale de l'éclairage et les led proprement dites. Plus nombreuses, de petite taille, très lumineuses et moins amovibles que les sources traditionnelles, les led assemblées au sein d'un bloc d'éclairage doivent dans un premier temps être vérifiées, notamment leur émission lumineuse. Cette première opération, qualifiée de

ENCADRÉ 1

LES RISQUES SPÉCIFIQUES ASSOCIÉS A L'ÉCLAIRAGE LED

L'exposition aux rayonnements optiques artificiels peut être à l'origine de différents effets délétères en fonction de leurs longueurs d'onde (ultra-violet, visible ou infra-rouge) et de leur intensité. Dans un rapport de 2010, l'Anses a souligné certains défauts de la technologie led : déséquilibre spectral de la lumière émise, forte luminance et papillotement. Le rapport a mis en exergue les deux principaux risques liés à l'utilisation des led de longueurs d'ondes visibles : atteinte de la rétine par effets photo-induits

et éblouissement [1]. Encourus pour des expositions ponctuelles aiguës, ces risques ne sont pas spécifiquement associés à l'usage de la technologie led. Ils sont tous deux encadrés par le code du travail [2,3]. Les perturbations du rythme circadien causées par des expositions anachroniques à la lumière bleue sont également documentées [4]. En revanche, les effets d'une exposition chronique de faible intensité à la lumière émise par les led, parfois qualifiée d'enrichie en lumière bleue, sont aujourd'hui discutés, mais ne font

pas l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique [5 à 9]. La mise en évidence d'effets à long terme est d'autant plus difficile à réaliser que les dispositifs à led sont récents et en constante évolution.

Les technologies led les plus modernes tentent d'ailleurs de tirer avantage de certains de ces effets. Elles proposent de reproduire l'éclairage naturel en modulant la couleur de l'éclairage, par exemple en adaptant l'intensité de la lumière bleue émise au cours de la journée.

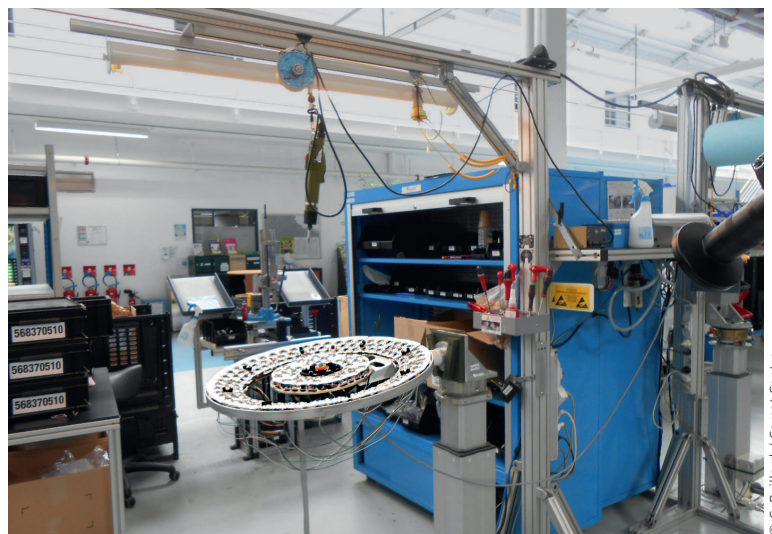
« déverminage », est réalisée en allumant l'intégralité des led afin d'éliminer celles dont les caractéristiques d'émission ne respectent pas les critères du contrôle qualité. Lors de ce contrôle, l'observation des led provoque un éblouissement rémanent, incompatible avec les opérations de déverminage et la poursuite de l'activité, et dont il faut par conséquent protéger les opérateurs. Une fois qu'elles sont assemblées, le travail des opérateurs consiste à aligner les optiques (ou collimateurs...) qui contrôlent la répartition dans l'espace de la lumière émise. Le contrôle de leur alignement requiert une nouvelle observation visuelle, impossible sans l'utilisation d'un filtre optique lorsque les led sont allumées. La dernière opération consiste à enfermer le tout sous un « verre » protecteur, dont la propreté doit être vérifiée et irréprochable.

Au cours de l'assemblage des modules d'éclairage, les contrôles visuels qui nécessitent l'allumage des led ne peuvent pas être réalisés sans protection optique des opérateurs. De plus, l'ouverture des locaux dédiés à la fabrication des luminaires est propice à l'exposition des autres salariés non affectés aux postes de contrôle (cf. Photo ci-contre).

Évaluation des risques associés à l'éclairage à led

Les led destinées aux applications d'éclairage présentent généralement l'avantage de n'émettre aucun rayonnement parasite, c'est-à-dire en dehors de la gamme du visible (ni dans l'ultraviolet UV, ni dans l'infrarouge IR). Dans ce cas, une fois confirmée par la mesure, cette particularité permet de limiter l'évaluation des risques associés aux rayonnements optiques à la seule gamme des longueurs d'onde du visible.

Dans ce domaine particulier de longueurs d'onde, ce sont les risques de lésions rétinienne qui doivent être considérés. L'évaluation des risques concernés,



↑ POSTE D'ASSEMBLAGE

Après l'étape de déverminage, les modules composés des led, de l'électronique et des lentilles sont rassemblés puis connectés au sein du luminaire. Une fois l'assemblage terminé, l'allumage des led et le bon alignement des optiques font l'objet de différents contrôles. Un risque d'éblouissement est présent au poste de contrôle, ainsi que dans son environnement.

imposée par le Code du travail [2,3] en conformité avec la directive européenne n°2006/25/CE (cf. En savoir plus) requiert d'évaluer la luminance énergétique pondérée L_b des led. Leur faible dimension rend cette mesure difficile en dehors du laboratoire. La référence au groupe de risque (cf. Encadré 3) est alors une information précieuse qui permet d'apprécier le temps d'exposition maximal recommandé et de prendre les premières mesures de protection requises. D'après les informations fournies par le fabricant, les led utilisées par l'entreprise d'assemblage sont qualifiées en GR1 (niveau de risque faible, temps d'exposition supérieur à la minute). Les spectres mesurés par les techniciens du Circop ont

permis de confirmer l'absence d'émission de rayonnement UV et IR par les led utilisées et l'étude des activités concernées montre que les durées limites d'exposition ne seront pas atteintes. Cependant, même sans atteindre la limite des conditions d'utilisation maximales recommandées, la faible dimension des led, associée à leur forte émissivité et leur direc-

tivité, génèrent des contrastes lumineux susceptibles de provoquer un éblouissement d'inconfort qu'il est nécessaire de prendre en compte. Les mesures d'UGR réalisées aux postes de contrôle ont permis d'évaluer l'importance des contrastes lumineux subis par les salariés et donc de l'éblouissement. Les valeurs d'UGR sont obtenues à partir d'une série de photographies réalisées avec un appareil étalonné en luminance et un objectif « fisheye ». Cet objectif permet d'obtenir une image à 360° pour restituer l'intégralité du champ de vision de l'opérateur. L'appareil enregistre plusieurs images successives avec différents temps de pose pour pallier la saturation (ou surexposition) possible de l'appareil. Les images sont ensuite analysées à l'aide du logiciel commercial Photolux. Ce logiciel réalise des cartographies de luminance et évalue la valeur d'UGR observé. Pour les activités concernées (y compris la fabrication des luminaires, en particulier l'activité de déverminage), notamment la reconnaissance des couleurs, la norme NF EN 12464-1 recommande de ne pas dépasser une valeur d'UGR de 16. Les mesures d'UGR ont été réalisées avec et sans protection. Les résultats, décrits dans la figure 3, indiquent que la comparaison des valeurs obtenues avec les valeurs recommandées permet de valider les mesures de protection mises en place.

ENCADRÉ 2

DESCRIPTION DE LA MESURE D'UGR

L'UGR est une évaluation psychométrique qui résulte de l'étude des conditions de vision dans lesquelles une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets est ressenties par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif.

Le calcul de l'UGR prend en compte la luminance des sources présentes dans le champ visuel en fonction de la luminance d'arrière-plan. Il est utilisé pour quantifier l'éblouissement provoqué par des sources de surfaces émettrices comprises entre 0,005 m² (4 cm de rayon) et 1,5 m². Cette méthode n'est donc pas adaptée à la mesure directe des led seules sans écran diffusant, mais elle peut être utilisée dans le cas de luminaires complets. Cette mesure est définie d'après les recommandations de la CIE [10] à partir de quatre paramètres :

- la luminance de fond du champ visuel (L_b)
- la luminance de la source (L)
- l'angle solide sous lequel est vue la source (ω)
- la position de la source caractérisée par l'indice de position de Guth (p) qui mesure l'écart du luminaire par rapport à la ligne de vision.

L'UGR se calcule selon la formule suivante :

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right)$$

La norme NF EN 12464-1 définit, entre autres, différents niveaux d'exigences d'UGR en fonction de l'activité.

Analyse des solutions mises en œuvre aux différents postes

L'utilisation seule de lunettes de protection aux postes de travail concernés est envisageable dans la mesure où l'évaluation des risques n'a pas démontré de risque pour la peau dû à l'exposition. Cependant, il est important de privilégier les protections collectives qui assureront la sécurité de tous les salariés. Cette recommandation est d'autant plus nécessaire que les fortes luminances dans le visible imposent des équipements de protection individuelle (EPI) qui présentent une forte atténuation ou une modification importante de la perception des couleurs, préjudiciable au contrôle visuel à réaliser. L'organisation des lignes d'assemblage a été repensée de sorte que l'allumage des led ne soit effectif qu'au moment exact des contrôles. Cette mesure de protection permet de réduire le temps d'exposition. Contrairement à d'autres technologies, les led ne sont pas sensibles à des séquences d'allumages répétitifs. Les temps de chauffe à l'allumage (inférieurs à la seconde) sont négligeables sur les modèles observés au cours de l'étude et ne sont donc pas rédhibitoires pour effectuer rapidement les contrôles dans de bonnes conditions. De plus, aux postes qui le permettent, l'électronique des luminaires est utilisée pour réaliser un allumage partiel, d'intensité réduite. Pour cette dernière méthode, il peut parfois être nécessaire de recourir à une électronique spécifique, qui présente l'avant-

POUR EN SAVOIR +

- Directive 2006/25/CE, prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). *JOUE*, 2006, pp. 38-59.
- L'éclairage à diodes électroluminescentes (led) suscite des interrogations pour la santé et sécurité des salariés exposés. Le dossier « Rayonnements optiques – Éclairage à led » sur le site Internet de l'INRS fait le point sur la technologie et les conseils de prévention pour une utilisation judicieuse. À consulter sur le lien : www.inrs.fr/risques/rayonnements-optiques/eclairage-led.html
- L'INRS a également publié un hors-série de la revue *Hygiène et sécurité du travail* consacré aux « Rayonnements optiques et électromagnétiques au travail – de l'exposition à la prévention » en décembre 2016. Ce numéro propose 34 articles qui traitent de ces nuisances et de leur prévention dans l'entreprise. À consulter sur le lien : www.hst.fr
- L'utilisation des led dans l'éclairage horticole a également fait l'objet d'un article sur l'évaluation de l'exposition des salariés aux rayonnements optiques, paru dans le n° 254 de la revue *Hygiène et sécurité du travail*. À consulter sur le lien : www.hst.fr

tage de permettre certains contrôles en réduisant le risque directement à la source.

Certains postes de contrôle, nécessitant un allumage à pleine intensité des luminaires, sont munis de dispositifs d'encoffrement. L'utilisation d'éléments modulaires permet un aménagement évolutif et varié (porte d'accès, zones partiellement transparentes, parois opaques...). Tout en limitant l'éblouissement, à la manière du « mode nuit » de certains rétroviseurs automobiles, l'utilisation d'une plaque « semi-réfléchissante » permet l'observation et la validation visuelle de l'allumage des différents éléments du luminaire, sans que l'opérateur soit ébloui. L'utilisation d'une vision indirecte, *via* caméra et écran de visualisation, présente par ailleurs le double avantage d'éviter l'exposition de l'opérateur à l'émission du luminaire et de permettre la mesure de valeurs objectives de la qualité d'éclairage du luminaire (chromaticité, répartition géométrique et homogénéité du faisceau...).

Enfin, l'entreprise a mis en place l'utilisation d'écrans souples diffusants. Le matériau, peu coûteux, était historiquement utilisé sur les réflecteurs des luminaires, afin d'obtenir une émission diffuse respectant la coloration de la source. Le choix d'un matériau diffusant, d'un blanc très pur, peu épais et résistant, présente différents avantages. Il se découpe facilement et différents modèles ont été définis en fonction des luminaires à tester. Son faible poids et sa rigidité permettent une mise en place rapide au moment des contrôles. Malgré la forte diffusion qui permet de réduire de manière importante la luminosité apparente des différentes led, les motifs géométriques sont visibles, ce qui permet de vérifier l'allumage des led sélectionnées ainsi que leur alignement avec les optiques aux différentes phases de contrôle. Cette méthode de protection est utilisée au cours des étapes de déverminage ainsi que pour le contrôle de l'électronique pour valider l'ensemble des fonctionnalités des luminaires. La pureté du blanc respecte la coloration de la source qui peut alors être contrôlée sans éblouissement. Le principal défaut de

ENCADRÉ 3

DESCRIPTION DES GROUPES DE RISQUES DES DISPOSITIFS D'ÉCLAIRAGE

La norme NF EN 62471 en vigueur pour assurer la sécurité des personnes exposées aux rayonnements optiques artificiels émis par des lampes, définit 4 groupes de risques (GR) qui s'appliquent également aux led. Dans le cas des led émettant dans le visible, le risque photochimique associé à la lumière bleue est le plus présent. Les groupes de risque sont associés à la durée maximale admissible d'exposition de l'œil à la distance à laquelle la source produit 500 lux (mais jamais inférieure à 20 cm). Le groupe de risque GRO indique qu'il n'existe aucun risque lié au rayonnement optique émis quelle que soit la durée d'exposition. Le groupe GR1 indique un niveau de risque faible, et un temps limite d'exposition compris entre 100 et 10 000 s. Le groupe GR2 indique un risque modéré (un temps limite d'exposition compris entre 0,25 et 100 s) et le GR3 un risque important (temps limite d'exposition inférieur au réflexe palpébral soit 0,25 s). En cas de difficultés pour évaluer la dangerosité d'une source, la vérification du groupe de risque, qui doit être fournie par le fabricant lorsque le GR atteint la valeur 2, constitue pour l'utilisateur, un bon indicateur du risque et des conditions d'utilisation

cette protection reste qu'elle est « escamotable ». L'allumage des luminaires n'est pas conditionné à sa bonne mise en place et un risque d'oubli ou de contournement persiste. Cependant, cette méthode de protection est très appréciée des opérateurs pour son efficacité et sa simplicité d'usage.

Conclusions

Les mesures réalisées par le Circop et l'analyse des groupes de risques ont permis dans un premier temps de s'assurer que l'ensemble des led utilisées présentaient des niveaux de risque photobiologique faibles ou étaient sans risque au sens de la norme NF EN 62471. La forte implication des acteurs de l'entreprise a abouti à des mesures de protection variées, mises en place en intelligence avec les impératifs des différentes étapes de fabrication des luminaires. L'ensemble des mesures d'UGR réalisées par le Circop a montré les gains nécessaires obtenus quant à la réduction de l'éblouissement d'inconfort, provoqué par l'allumage des luminaires au cours des différents contrôles. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] **RAPPORT ANSES – Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (led)**. Paris, Anses, 2010.

[2] **DÉCRET N° 2010-750 DU 2 JUILLET 2010** relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. *Journal officiel*, 4 juillet 2010.

[3] **Code du travail – Articles portant sur l'éclairage** : R.4223-1

à R.4223-12. Accessibles sur : www.legifrance.gouv.fr/

[4] **GAUTIER M.A., MORELOT Q., DENIEL J.M.** – Exposition à la lumière bleue. Quels sont les risques ? Quel serait l'intérêt de lunettes à filtres anti-lumière bleue ? *Références en santé au travail* n° 147, septembre 2016. Accessible sur : www.rst-sante-travail.fr

[5] **POINT S.** – Faut-il craindre la lumière bleue des LED ?

Science et Pseudo-Sciences, n° 326, octobre-décembre 2018. Accessible sur : <https://www.pseudo-sciences.org/spip.php?article3118>

[6] **RENARD G, LEID J.** – Les dangers de la lumière bleue : la vérité ! *Journal Français d'Ophtalmologie* 2016;39:483-8.

[7] **Fiches Techniques de la SFRP – Lampes à LED et risque rétinien**. Janvier 2017. Accessibles sur : www.sfrp.asso.fr

[8] **RAPPORT ANSES – Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)**. Paris, Anses, 2019.

[9] **SCHAEER.** – *Opinion on Potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs)*, 6 juin 2018. Accessible sur : <https://ec.europa.eu>

[10] **CIE – Discomfort Glare in Interior Lighting**. In: CIE (Ed.), 1995.



© C. Ruillard / Carsat Centre



Vision indirecte et enregistrement des valeurs de contrôle

Caméra

Luminaire

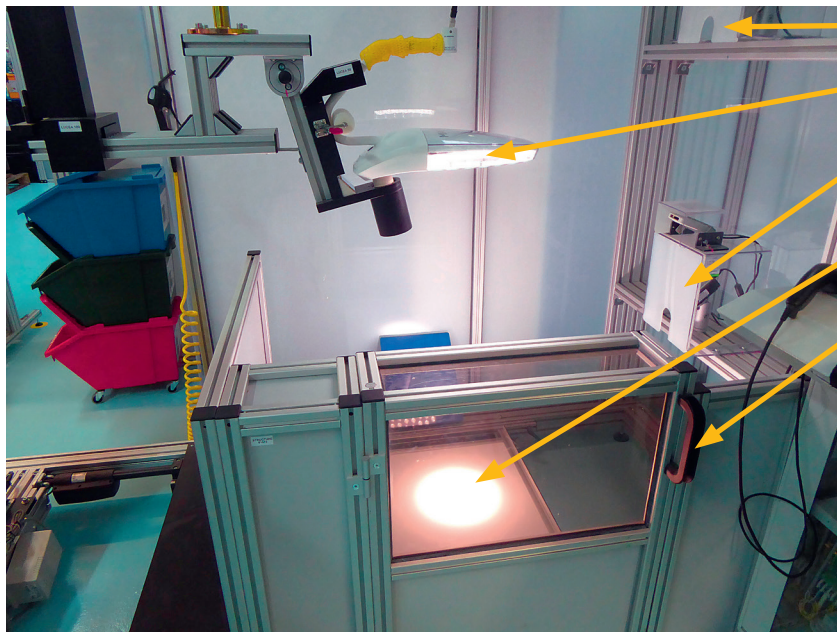
Caméra

Plaque semi-réfléchissante

Zone de test

↑ FIGURE 1A Observation d'un poste sans protection collective.

© C. Ruillard / Carsat Centre



Caméra

Luminaire

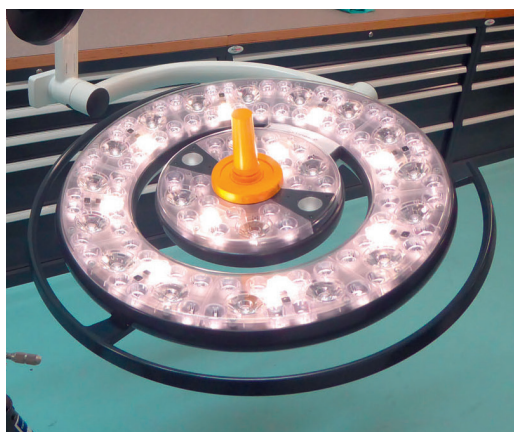
Caméra

Zone de test

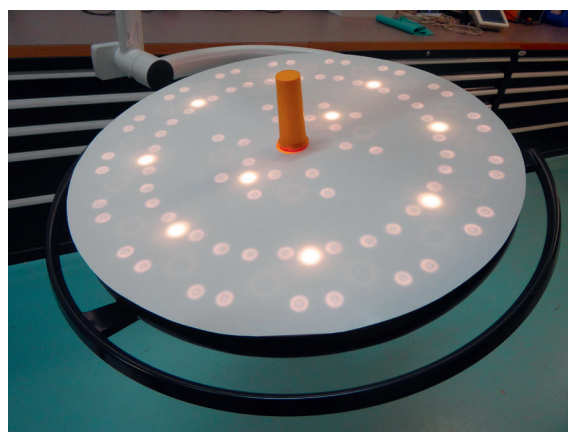
Encoffrement avec partie amovible et semi-transparente

Mise en place de l'encoffrement d'un poste d'évaluation des luminaires. La partie amovible permet la mise en place du luminaire par l'opérateur. La fenêtre teintée permet une vision directe sans éblouissement de la zone de test. Différents moyens de vision indirecte (caméra + écran, plaque semi-réfléchissante) sont mis en place pour les contrôles à réaliser.

↑ FIGURE 1B Observation du poste après la mise en place de la protection collective.



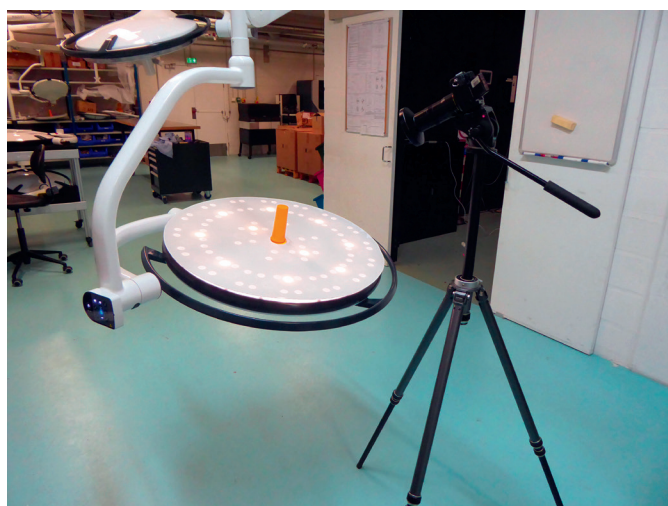
© C. Ruillard / Carsat Centre



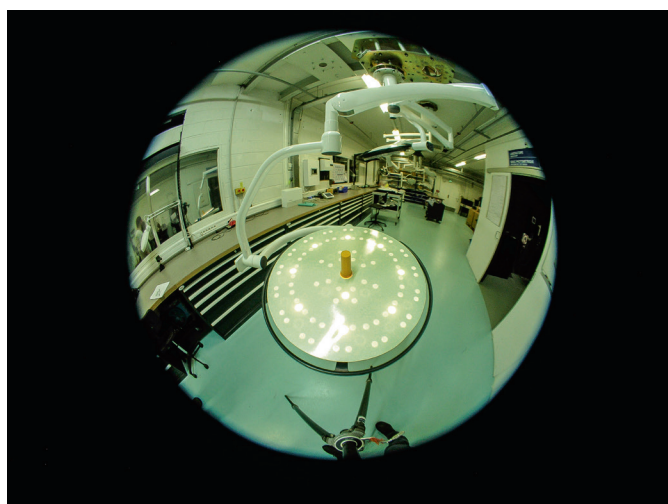
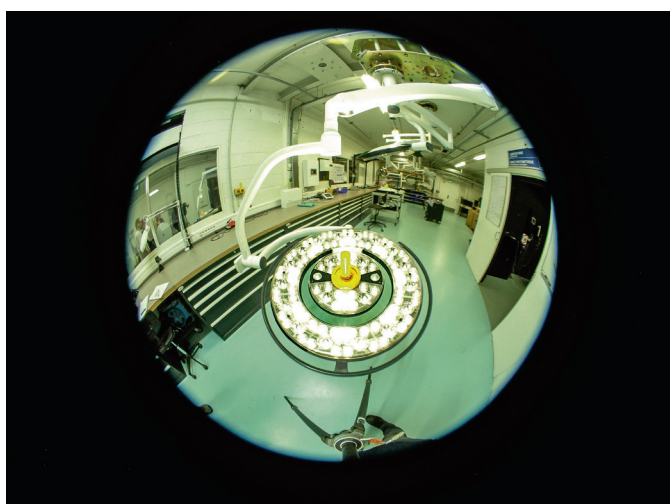
© C. Ruillard / Carsat Centre

L'utilisation de film diffusant facilite le contrôle visuel de l'allumage de l'intégralité des LED, ainsi que le bon alignement des optiques. La réduction du risque à la source permet de protéger l'ensemble des salariés.

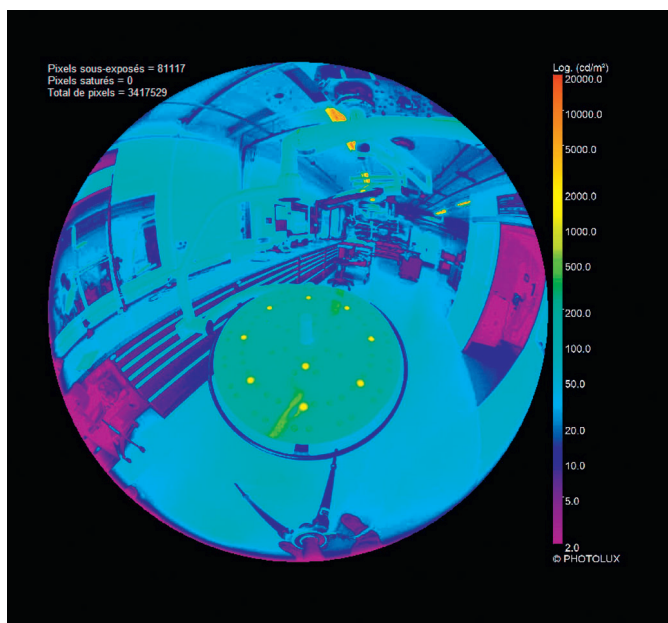
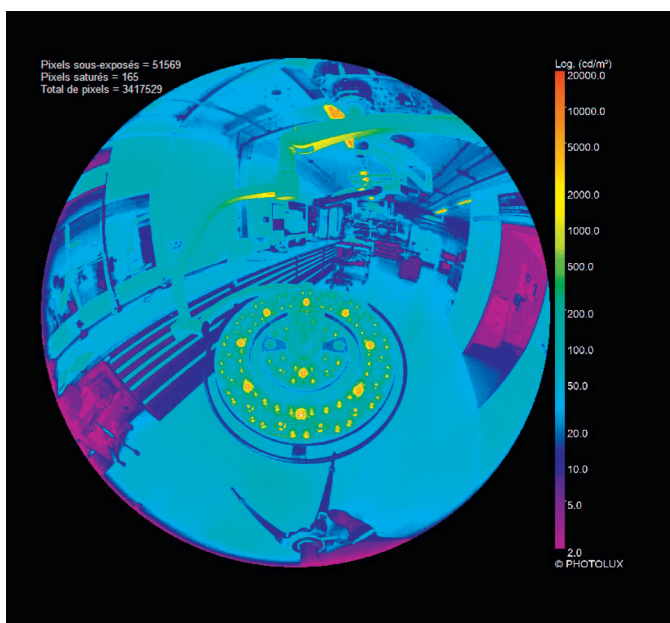
↑ FIGURE 2 Vision directe d'un luminaire et vision avec un le film protecteur.



© C. Ruilllard / Carsat Centre



© C. Ruilllard / Carsat Centre



© C. Ruilllard / Carsat Centre

Valeur d'UGR mesurée sans filtre: 22,8

Valeur d'UGR mesurée avec film de protection: 16,6

↑ FIGURE 3 Mesures d'UGR.

Les mesures d'UGR sont réalisées avec et sans la mise en place du film protecteur. La vue « fisheye » est utilisée pour prendre en compte l'ensemble de l'environnement. Les images obtenues sont analysées pour évaluer les contrastes responsables des risques d'éblouissement et d'inconfort visuel. La comparaison des valeurs d'UGR permet de valider l'efficacité des moyens de protection mis en œuvre.