HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL HORS-SÉRIE

Rayonnements optiques & électromagnétiques au travail

Institut National de Recherche et de Sécurité

L'INRS

L'institut national de recherche et de sécurité (INRS) pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles est une association loi 1901 créée sous l'égide de la Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés (CNAMTS). L'Institut est géré par un conseil d'administration paritaire composé, à parts égales, d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, présidé alternativement par un représentant d'un de ces collèges.
Financé en quasi totalité par l'Assurance maladie – Risques professionnels, à qui il apporte son concours, l'INRS inscrit son action dans le cadre des orientations de la branche AT-MP.
Ses domaines de compétences couvrent les risques physiques (bruit, vibrations, ondes électromagnétiques…), chimiques liés aux substances comme aux procédés (solvants, poussières…), biologiques (infectieux, immunoallergiques…), électriques, psychosociaux…
Sa mission est de contribuer à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles et plus précisément :
• identifier les risques professionnels ;
• analyser leurs conséquences sur la santé des hommes ;
• concevoir, diffuser et promouvoir des solutions de prévention auprès de tous les acteurs de prévention : chefs d'entreprise, salariés, CHSCT, services de santé au travail…
Les activités de l'INRS s'organisent selon quatre axes : études et recherche, assistance, formation et information.

> **Notre métier, rendre le vôtre plus sûr**

Retrouvez-nous sur le web

Abonnez-vous en ligne sur

hst.fr

Rayonnements optiques & électromagnétiques au travail

De l'exposition à la prévention

Compte-rendu du colloque
20, 21 et 22 octobre 2015 à Paris

HYGIÈNE ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL
E-mail rédaction : revue.hst@inrs.fr
Site web : www.hst.fr

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
Stéphane Pimbert
Directeur général de l'INRS

ÉQUIPE DE RÉDACTION
Jérôme Lemarié
Rédacteur en chef, INRS
Amandine Hobet
Secrétaire de rédaction, INRS
Amélie Lemaire
Maquettiste, infographiste, INRS
Cédric Duval
Rédacteur, INRS
Nadia Bouda
Iconographe, INRS
Sandrine Voulyzé
Chargée de fabrication, INRS
Bahija Augenstein
Assistante, INRS

COMITÉ ÉDITORIAL
Agnès Aublet-Cuvelier
Chef du département Homme au travail, INRS
Didier Baptiste
Directeur scientifique, INRS
Séverine Brunet
Directrice des applications, INRS
Jacques Chatillon
Chef du département Ingénierie des équipements de travail, INRS
Florence Hella
Chargée de coordination d'activités transversales, département Homme au travail, INRS
Gérard Lasfargues
Directeur général adjoint scientifique, Anses
Jérôme Lemarié
Rédacteur en chef de la revue HST, INRS
Fahima Lekhchine
Chef du département Information et communication, INRS
Éric Thybaud
Responsable du pôle Dangers et impact sur le vivant, direction des Risques chroniques, Ineris
Jérôme Triolet
Chef du département Expertise et conseil technique, INRS
Delphine Vaudoux
Responsable du pôle Publications périodiques, INRS

Préface

Par Séverine Brunet
INRS, Directrice des applications

Pour accompagner les entreprises dans l'amélioration de la prévention des risques professionnels, l'INRS a organisé le colloque « Rayonnements optiques & électromagnétiques – De l'exposition à la prévention » en octobre 2015 à Paris. Durant trois jours, ce colloque a rassemblé près de 300 participants de profils variés : médecins du travail, IPRP, préventeurs d'entreprise, préventeurs institutionnels, scientifiques, consultants, bureaux d'études, organismes de contrôle… venus s'informer au travers de 48 présentations orales et échanger entre eux et avec les intervenants.

L'INRS met aujourd'hui à disposition de ce public et, au-delà, de toutes les personnes intéressées qui n'ont pu participer au colloque, ce numéro hors-série de la revue *Hygiène & sécurité du travail*. Ce compte-rendu, rassemblant 34 articles couvrant tous les thèmes abordés, a pour ambition d'être une référence au service de tous ceux qui s'intéressent à la prévention de ces nuisances physiques dans l'entreprise. Bien entendu, les connaissances s'accroissent, les réglementations évoluent, les pratiques industrielles se modernisent, mais nous savons que le contenu de ces articles restera d'actualité pendant encore plusieurs années.

L'INRS tient à remercier ici tous les contributeurs à ce hors-série et à souligner les travaux de ceux dont le métier est au quotidien davantage tourné vers l'action concrète et moins vers l'écriture de telles publications. C'est le cas des collègues du réseau Assurance maladie – Risques professionnels, mais aussi de bien d'autres auteurs, médecins ou ingénieurs.

Je souhaite au lecteur de tirer un grand profit de ce hors-série, tout en lui rappelant que d'autres ressources existent, notamment celles proposées par l'INRS sur www.inrs.fr. Elles lui permettront d'aller plus loin dans la pratique et la résolution des problèmes de prévention rencontrés en entreprise sur le sujet des risques professionnels liés aux rayonnements optiques et champs électromagnétiques. ●

Sommaire

RAYONNEMENTS OPTIQUES

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Effets sur la santé & réglementation

L'exposition aux sources de rayonnements optiques artificiels
P. 08

Les effets des rayonnements UV, visibles et infrarouges sur la peau
P. 13

Ultraviolets, lumière bleue et phototoxicité
P. 16

Réglementation applicable en matière de prévention des risques d'exposition aux rayonnements optiques artificiels
P. 20

Exposition des travailleurs aux sources de lumière artificielle: normes de sécurité applicables
P. 24

Toxicité rétinienne de la lumière bleue: une étude sur le rat
P. 28

Les sources de rayonnements électromagnétiques industrielles
P. 32

Évaluation de l'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques non ionisants
P. 37

Transposition de la directive 2013/35/UE en droit français : un nouveau dispositif réglementaire dès janvier 2017
P. 41

Évaluation & prévention

Rayonnements optiques artificiels : évaluation des risques sans mesure
P. 50

Mesure des rayonnements optiques incohérents au poste de travail
P. 55

Luminaires à LED : évaluation du risque rétinien en laboratoire de fabricant
P. 60

Les moyens de prévention et de protection contre les ROA
P. 64

Équipements de protection contre les risques dus aux LED d'éclairage
P. 69

L'organisation de la prévention du risque laser au CNRS
P. 74

Comment mesurer un champ électromagnétique et évaluer l'incertitude de mesure ?
P. 77

Métrologie des champs impulsionnels basses fréquences
P. 80

Évaluation de l'exposition des travailleurs d'EDF : synthèse des mesures
P. 86

Un protocole d'intervention en entreprise pour l'évaluation simplifiée des risques liés aux rayonnements électromagnétiques
P. 90

Oseray, un outil simple pour une première estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques
P. 94

Wise, un outil d'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques
P. 98

Quelle surveillance médicale des travailleurs exposés aux champs électromagnétiques ?
P. 102

Les moyens de prévention contre les champs électromagnétiques
P. 107

Études de cas

Évaluer les risques liés aux rayonnements optiques émis par les projecteurs de scène
P. 112

Systèmes radiants de séchage par infrarouge
P. 117

Contrôle qualité par rayonnement UVA ou « lumière noire »
P. 120

Évaluation des risques liés aux rayonnements optiques artificiels émis par des fours de fonderie
P. 123

Analyse des pratiques en sécurité laser dans le milieu médical
P. 126

Le contrôle par magnétoscopie
P. 129

Évaluation des différentes procédures de magnétoscopie dans l'hydraulique
P. 133

Exposition aux champs électromagnétiques émis par une presse de soudage à haute fréquence
P. 137

Les systèmes de télécommunication : mesurage des champs électriques et actions de prévention
P. 141

Exposition des porteurs d'implants médicaux actifs aux champs électromagnétiques 50 Hz
P. 146

Exposition du travailleur en environnement IRM
P. 152

Sélection bibliographique P. 156

Postface P. 158

Effets sur la santé & réglementation

L'exposition aux sources
de rayonnements optiques artificiels
P. 08

Les effets des rayonnements UV, visibles
et infrarouges sur la peau
P. 13

Ultraviolets, lumière bleue et phototoxicité
P. 16

Réglementation applicable en matière
de prévention des risques d'exposition
aux rayonnements optiques artificiels
P. 20

Exposition des travailleurs aux sources de lumière
artificielle : normes de sécurité applicables
P. 24

Toxicité rétinienne de la lumière bleue :
une étude sur le rat
P. 28

Les sources de rayonnements
électromagnétiques industrielles
P. 32

Évaluation de l'exposition du corps humain
aux champs électromagnétiques non ionisants
P. 37

Transposition de la directive 2013/35/UE
en droit français : un nouveau dispositif
réglementaire dès janvier 2017
P. 41

RAYONNEMENTS OPTIQUES

L'exposition aux sources de rayonnements optiques artificiels

Samuel Morin Contrôleur de sécurité, Carsat Bretagne

Face aux différentes sources de rayonnements optiques artificiels (ROA) que l'on rencontre dans les secteurs de l'industrie, du commerce et du tertiaire, les employeurs et acteurs de la prévention sont souvent démunis lorsqu'ils doivent évaluer les risques auxquels sont exposés les salariés et établir les moyens de protection à mettre en place. Cet article passe en revue les sources de ROA que l'on trouve dans ces secteurs et présente, à travers une étude menée dans une entreprise, les outils d'évaluation disponibles.

Afin d'aider les employeurs et les acteurs de la prévention dans leur démarche d'évaluation des risques liés aux ROA, notamment concernant la caractérisation des risques sans mesure, l'aide au choix des solutions pouvant être mises en œuvre et l'évaluation de l'efficacité de ces moyens, des outils d'évaluation leur sont proposés.

Les sources de rayonnements optiques artificiels (ROA) que l'on rencontre dans les secteurs de l'industrie, du commerce et du tertiaire ont un spectre d'émission qui s'étend de l'ultraviolet (à partir de 180 nm) à l'infrarouge (jusqu'à 3000 nm) (Cf. Figure 1). Certaines d'entre elles peuvent exposer les salariés à des valeurs supérieures aux valeurs limites d'exposition (VLE) réglementaires.

Ce spectre est divisé comme suit [1]:
- UV C de 180 à 280 nm,
- UV B de 280 à 315 nm,
- UV A de 315 à 400 nm,
- Visible de 400 à 780 nm,
- IR A de 780 à 1400 nm,
- IR B de 1400 à 3000 nm.

LES DIFFÉRENTES SOURCES DE RAYONNEMENTS OPTIQUES ARTIFICIELS

Dans notre quotidien, les sources de ROA nous entourent et sont présentes dans tous les secteurs d'activité.

Les principales sont les systèmes d'éclairage (Cf. Figure 2) qui émettent bien sûr dans le visible mais peuvent également émettre des rayonnements UV et IR. Certains éclairages spécifiques (éclairages scéniques, éclairages à halogénures métalliques…) peuvent avoir un effet délétère sur la santé. En ce qui concerne le rayonnement UV, les manifestations au niveau de la peau vont du simple érythème jusqu'à des lésions plus importantes (lésions cancéreuses) [2, 3]. Pour l'œil, les effets directs immédiats se traduisent par des lésions de la cornée (UV ou IR), de la conjonctive (UV), voire de la rétine (visible et/ou proche IR) [2–5]. À long terme, l'exposition chronique peut entraîner une opacification du cristallin ou cataracte (UV ou IR).

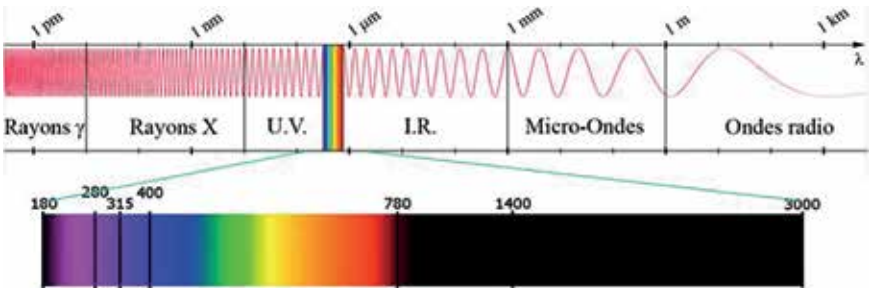
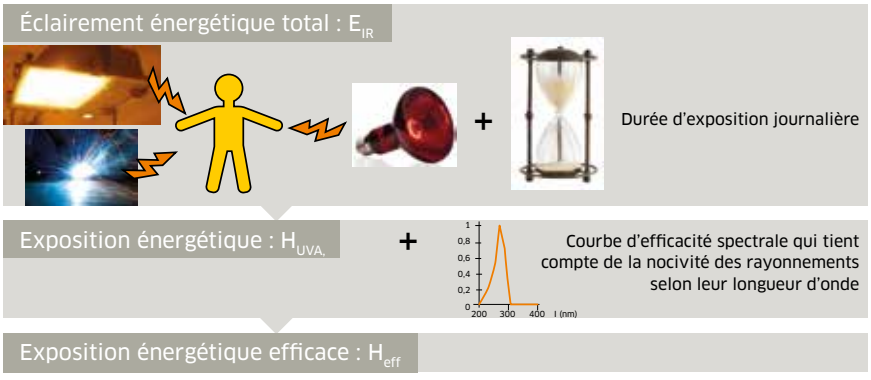


FIGURE 1→
Spectre d'émission des rayonnements optiques [1].

Elles doivent donc être utilisées avec certaines précautions et faire l'objet d'une évaluation des risques encourus par les personnes susceptibles d'y être exposées.
La plupart des appareils qui nous entourent émettent des rayonnements qui ne présentent pas de risque pour la peau ou les yeux (écran d'ordinateur, photocopieur…). Pour certains d'entre eux, une analyse plus complète peut cependant être nécessaire notamment en cas de vision directe prolongée (vidéo projecteur…).
Certaines activités nécessitent l'utilisation de lampes spécifiques comme des lampes UVA employées par exemple pour l'analyse de défauts, des lampes germicides utilisées dans le traitement de l'eau ou de l'air, ou encore des lampes halogènes utilisées pour sécher les peintures, les colles… (Cf. Figure 3). Ces lampes émettent des ultraviolets ou des infrarouges qui peuvent s'avérer préjudiciables pour la santé des salariés en cas d'exposition prolongée.
Certains procédés industriels émettent également des rayonnements nocifs pour les yeux et la peau des salariés (fours de fusion, procédés de soudage ou de découpe…). Les produits fabriqués peuvent également continuer à émettre des rayonnements dangereux pour les salariés exposés.

↑FIGURE 2
Les différents types d'éclairage.

↑FIGURE 3
Les lampes spécifiques.

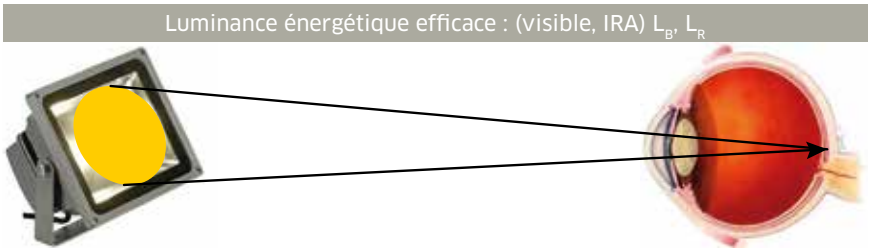


↑FIGURE 4
Les grandeurs physiques prises en compte pour l'évaluation.

VALEURS LIMITES D'EXPOSITION (VLE)

Une directive européenne concernant l'exposition aux ROA a été adoptée le 5 avril 2006 (2006/25/CE) [6]. Cette directive a été transposée en droit français dans les articles R.4452-1 à R.4452-31 du Code du travail [7]. Ces articles imposent notamment aux employeurs de prendre toute disposition pour supprimer ou, à défaut, réduire au minimum les risques résultant de toute exposition aux ROA. Ils fixent également les valeurs limites d'exposition (VLE).
Les grandeurs physiques prises en compte pour l'évaluation des risques, à comparer aux VLE, sont l'éclairement énergétique, l'exposition énergétique, l'exposition énergétique efficace et la luminance énergétique efficace (Cf. Figure 4).
L'éclairement énergétique exprimé en W/m² correspond à l'ensemble des rayonnements reçus sur tout le corps et émis par l'ensemble des sources qui nous entourent. Associée à la durée d'exposition journalière, on obtient alors l'exposition énergétique. En tenant compte de la nocivité des rayonnements pour la peau et les yeux selon leur longueur

d'onde, on parle d'exposition énergétique efficace.
La luminance énergétique efficace (Cf. Figure 5), exprimée en $W.m^{-2}.sr^{-1}$, caractérise la source. Elle correspond au flux émis par unité de surface et d'angle solide et prend en compte l'efficacité du rayonnement dans le visible et/ou le proche infrarouge.



↑FIGURE 5
La luminance énergétique efficace.

ILLUSTRATION D'UNE DÉMARCHE DE PRÉVENTION

À la suite de la parution de la directive 2006/25/CE [6], les services de prévention des risques professionnels des Carsat ont accompagné certaines entreprises dans leur démarche de prévention des risques liés à l'exposition aux sources de ROA.
Les grandeurs physiques et les méthodes de calcul abordées par la directive 2006/25/CE [6] sont difficiles à appréhender et à mettre en œuvre dans le cadre d'une première approche d'évaluation des risques. C'est pourquoi des outils ont été mis à disposition des entreprises dans le but de les aider dans leur démarche de prévention.
Le document ED 6113 [8], édité par l'INRS, présente en premier lieu les nouvelles dispositions réglementaires concernant les sources de ROA et les effets potentiellement nocifs sur la santé. Afin d'aider les entreprises et les préventeurs à identifier les sources présentes sur les lieux de travail et décider s'il est nécessaire ou non d'appliquer une démarche de prévention, le document présente également :

- une liste de sources de ROA non dangereuses ou présentant des risques négligeables pour des conditions d'usage normal ;
- une liste de sources dont les expositions répétées et mal maîtrisées pourraient induire des effets délétères pour la santé des salariés.

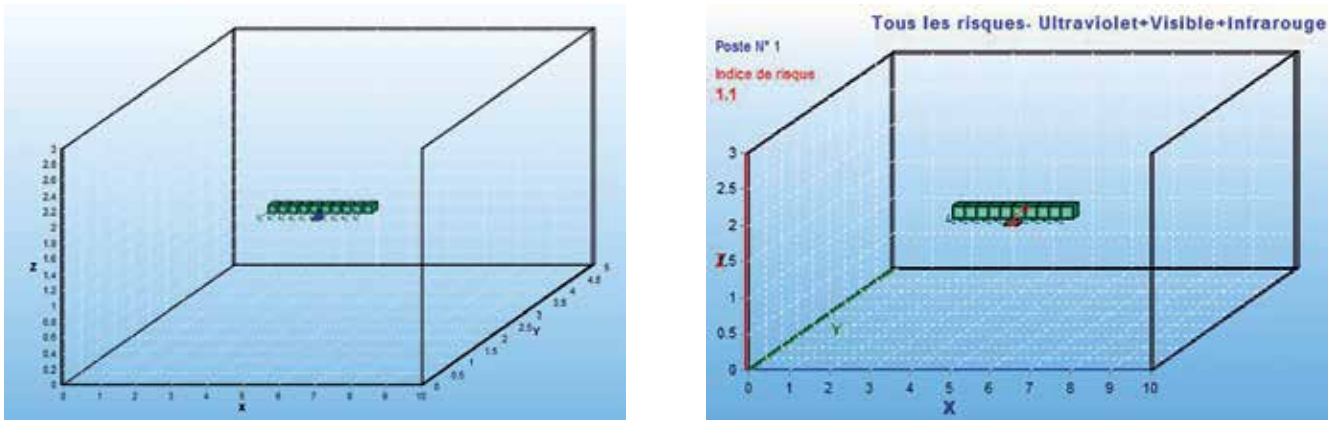
Pour les sources non étudiées jusqu'à présent ou si les risques associés à une situation de travail ne sont pas connus, il conviendra alors de recourir aux informations fournies par le fabricant et/ou à des calculs, voire à des mesures pour réaliser l'analyse des risques.
Le logiciel de simulation CatRayon [9], développé et mis à disposition par l'INRS, contient une base de données conséquente de sources présentes dans les différents secteurs d'activité, lesquelles ont été caractérisées en laboratoire ou *in situ*. Il permet d'évaluer les risques liés à une ou plusieurs sources auxquelles sont exposés les salariés, selon les VLE imposées par la directive 2006/25/CE [6].
Le document ED 6113 [8] a permis, dans un premier temps, de déterminer les sources présentant des risques négligeables ou nuls (écran, lampe halogène, projecteur de profil, lampe fluorescente, lecteur de code barre, spot à 7 mètres de hauteur, pupitre de commande, gyrophare).
En revanche, trois autres sources ont nécessité le recours au logiciel CatRayon afin d'évaluer les risques et de déterminer des solutions de protection collective.
Un exemple d'accompagnement d'une entreprise spécialisée dans la fabrication de tuiles et de carrelages est présenté ci-après. Cette étude avait pour but de lister le plus exhaustivement possible les sources présentes dans l'entreprise et d'évaluer, pour chacune d'entre elles, les risques qui leur étaient associés en cas d'exposition prolongée.

© Carsat Bretagne

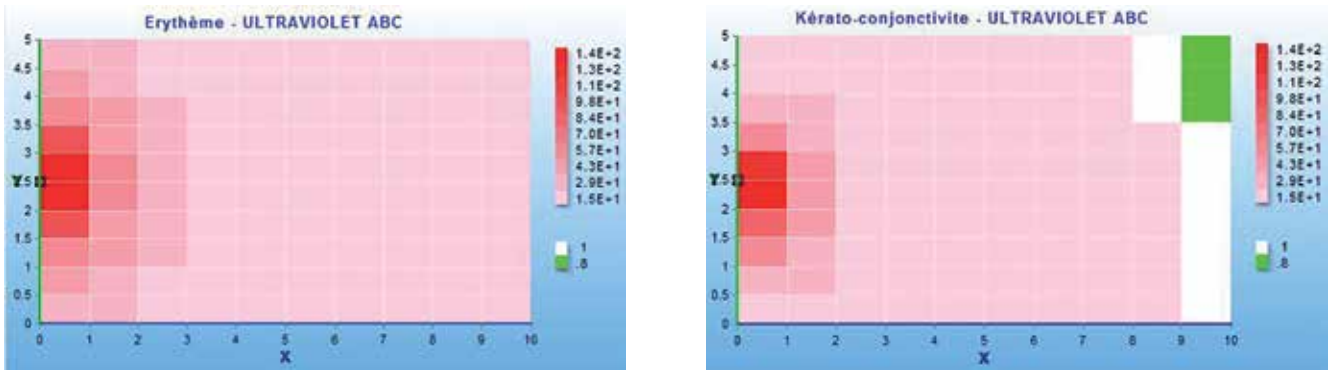
© Carsat Bretagne

↑FIGURE 6
Le séchoir.

Parmi les sources de ROA présentes dans cette entreprise, un séchoir équipé de sept lampes de 1 000 W (Cf. Figure 6) est utilisé pour sécher les tuiles. Ces lampes sont protégées à l'aide d'un capot pouvant être ouvert lors du fonctionnement des tubes. En fonctionnement normal d'utilisation, il n'y a pas de vision directe des sources.
Une étude a été effectuée à partir du logiciel CatRayon en utilisant 10 tubes de 700 W pour s'approcher de la configuration du terrain. Le résultat de cette simulation montre un dépassement des VLE avec risque de cataracte après 30 secondes d'exposition (indice de risque > 1) (Cf. Figure 7).
Il a donc été demandé à l'entreprise de mettre en place une sécurité au niveau des capots de manière à couper l'alimentation des lampes lors de leur ouverture. Il a également été recommandé que l'équipe de



↑FIGURE 7
Indice de risque.



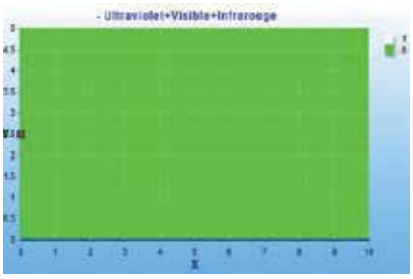
↑FIGURE 8
Mesure avec CatRayon du rayonnement émis dans l'ultraviolet par les postes à souder.

maintenance mette en place un protocole de vérification des lampes qui ne nécessite pas la vision directe de ces tubes ou, dans le cas contraire, de porter des lunettes de protection adaptées.

L'équipe de maintenance de l'entreprise utilise également des postes à souder pour réparer certaines pièces de production. Ils constituent des sources de rayonnements optiques artificiels reconnues comme dangereuses et nécessitent le port, par les soudeurs, d'équipements de protection individuelle (gants, masques, vêtements couvrant l'ensemble du corps…). Les soudeurs, conscients des dangers, ont recours la plupart du temps à ces protections. En revanche, il n'est pas rare, comme dans le cas présent, de constater l'absence de protections collectives telles que des rideaux autour de la zone de soudage. Pour montrer la nécessité d'un tel dispositif, nous avons là encore utilisé le logiciel CatRayon en simulant un poste avec des caractéristiques similaires à celles du poste utilisé. Les résultats obtenus en plaçant cet équipement dans une pièce de 10 mètres par 5 sont donnés dans la figure 8. Les zones où la VLE est dépassée sont représentées en rouge, celles où l'exposition est inférieure à la VLE sont en vert.

Les résultats de la simulation montrent qu'après seulement 5 minutes d'exposition, l'ensemble des salariés évoluant dans le local est soumis à des niveaux d'exposition supérieurs aux VLE. Avec une protection collective adaptée, proposée par le logiciel, le niveau de risque en dehors de la zone de soudage devient satisfaisant (Cf. Figure 9).

Enfin, l'entreprise utilise des lampes à vapeur de mercure qui sont disposées en hauteur pour éclairer les grands bâtiments. Ces lampes sont connues pour émettre aussi des rayonnements ultraviolets. Nous avons donc procédé à l'évaluation du risque à l'aide du logiciel CatRayon,

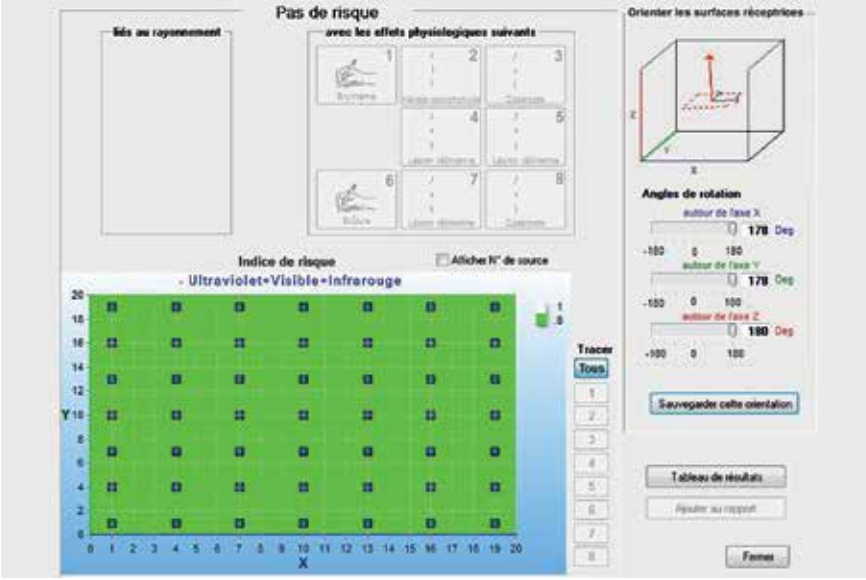


↑FIGURE 9
Mesure avec CatRayon du rayonnement émis dans l'ultraviolet par les postes à souder avec une protection collective.

DONNÉES	
Source	Lampe à vapeur de mercure Mazda MAF 250 W
Hauteur des luminaires	11 m
Position du plan de travail	1,8 m de hauteur
Temps d'exposition	8 h

↑TABLEAU

Données recueillies concernant les lampes à vapeur de mercure.



↑FIGURE 10

Résultats de l'évaluation des émissions d'UV par les lampes à vapeur de mercure, grâce au logiciel CatRayon.

après avoir relevé les différentes données nécessaires (Cf. Tableau) à la simulation. Le résultat de la simulation est présenté dans la figure 10. Après 8 heures d'exposition et dans les conditions rencontrées, le niveau de risque reste inférieur à 1 ce qui signifie que les VLE ne sont pas dépassées.

CONCLUSION

Les sources de ROA sont présentes dans notre environnement quotidien de travail. Elles émettent une lumière visible et/ou invisible qui peut présenter un danger pour l'œil et/ou la peau. Pour évaluer le risque et s'assurer du respect des VLE réglementaires sans devoir procéder à des mesures, des outils simplifiés tels que le document ED 6113 édité par l'INRS et le logiciel d'évaluation CatRayon sont à disposition des entreprises. Ces outils permettent de caractériser le risque lié à la grande majorité des sources rencontrées et d'évaluer l'efficacité d'un grand nombre de dispositifs de protection.

Pour les cas plus complexes (réflexions, spectre des sources non connus…), une évaluation métrologique reste nécessaire. Des travaux sont engagés pour développer des équipements adaptés aux spectres d'émission des sources de ROA et rédiger les documents associés. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] CIE. e-ILV CIE. Disponible sur : http://eilv.cie.co.at

[2] ICNIRP. *Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths 180 nm to 400 nm (incoherent optical radiation). Health Phys.* 2004 ; 87(2) :171-186.

[3] ICNIRP. ICNIRP Statement - *Protection of Workers against Ultraviolet Radiation. Health Phys.* 2010 ; 99(1) :66-87.

[4] Protection I (International C on N-IR). ICNIRP Statement on Light-Emitting Diodes (LEDS) : *Implications for Hazard Assessment. Health Phys.* juin 2000 ; 78(6) :744-752.

[5] ICNIRP. *ICNIRP guidelines on limits exposure to incoherent visible and infrared radiation. Health Phys.* 2013 ; 105(1) :74-91.

[6] Parlement européen. Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). *Journal Officiel.* 27 avr 2006 ; 38-59.

[7] Code du travail | Legifrance. [cité 14 mars 2016]. Disponible sur https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006072050

[8] SALSI S., BARLIER-SALSI A. Sensibilisation à l'exposition aux rayonnements optiques artificiels (ROA) sur les lieux de travail (hormis les lasers et appareils à laser). INRS, ED 6113, 2011. Disponible sur www.inrs.fr

[9] INRS. CatRayon 4, logiciel d'évaluation de l'exposition aux rayonnements optiques dans les locaux de travail. 2012. Disponible sur www.inrs.fr

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Les effets des rayonnements UV, visibles et infrarouges sur la peau

Jean-Pierre Cesarini Société française de radioprotection – Rayonnements non ionisants

Si l'exposition de courte durée à des rayonnements optiques de faible intensité a des effets bénéfiques pour l'organisme, l'exposition prolongée à des rayonnements de forte intensité peut présenter des dangers, notamment pour la peau. Cet article explique les différents effets biologiques des rayonnements ultraviolets, infrarouges et de la lumière visible.

Le rayonnement solaire est absorbé par l'atmosphère terrestre et ne parvient qu'extrêmement atténué à la surface de la terre. En particulier, les UVC sont absorbés totalement par l'ozone des couches les plus élevées de l'atmosphère. Il faut cependant garder à l'esprit que les UVC peuvent être émis par certaines sources artificielles. Les rayonnements optiques pénètrent plus ou moins profondément le tégument (Cf. Encadré) en fonction des longueurs d'onde et des absorptions spécifiques par ses différents constituants. Les UVC n'atteignent pas la couche basale de l'épiderme car ils sont totalement absorbés par la couche cornée et les cellules les plus superficielles. En revanche, 10% des UVB incidents atteignent la couche basale, 50% des UVA dépassent la couche basale et sont absorbés totalement dans le derme superficiel et 65% du rayonnement visible parviennent aux vaisseaux les plus profonds.

ADN, ARN, protéines, lipides, acides aminés aromatiques constituent des chromophores absorbant les rayonnements. L'énergie des photons, associée à la longueur d'onde du rayonnement, détermine les effets biologiques des rayonnements optiques. La couche basale de l'épiderme et les mélanocytes représentent la zone la plus critique car susceptible d'être très sensible à l'atteinte des rayonnements optiques. Chez l'enfant, les crêtes papillaires sont particulièrement marquées du fait de la tension exercée par les fibres élastiques oxytalanes, ces crêtes disparaissent progressivement avec l'âge et le vieillissement chronologique ou photo-induit. En conséquence, chez l'enfant, la couche basale n'est protégée que par 5 à 6 couches de kératinocytes au sommet des crêtes alors que la base des crêtes est protégée par plus de 15 couches. Ce fait anatomique explique les effets particulièrement délétères du rayonnement UV reçu dans l'enfance.

L'eau contenue dans les tissus formant le tégument absorbe le rayonnement infrarouge dont la pénétration peut atteindre des structures plus profondes (gros vaisseaux, muscles, tendons, etc.).

EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS ULTRAVIOLETS

Les effets biologiques sont induits soit par absorption directe des photons, soit indirectement par la photosensibilisation de substances endogènes ou exogènes, produisant des espèces chimiques de très courte durée de vie mais très réactives telles que les formes excitées de l'oxygène et, plus généralement, les radicaux libres.

L'ADN du noyau des cellules, matériel génétique dont l'intégrité doit être respectée, absorbe directement le rayonnement UVB (et UVC) qui induit des modifications importantes, conduisant à des mutations à l'origine de cancers cutanés. Des dimères de pyrimidine et cyclo-butane sont des photo-produits gênant la réplication de l'ADN. Leur excision préalable est nécessaire à la reconstruction à l'identique de l'ADN endommagé. Au cours de ce processus,

ENCADRÉ

La peau humaine

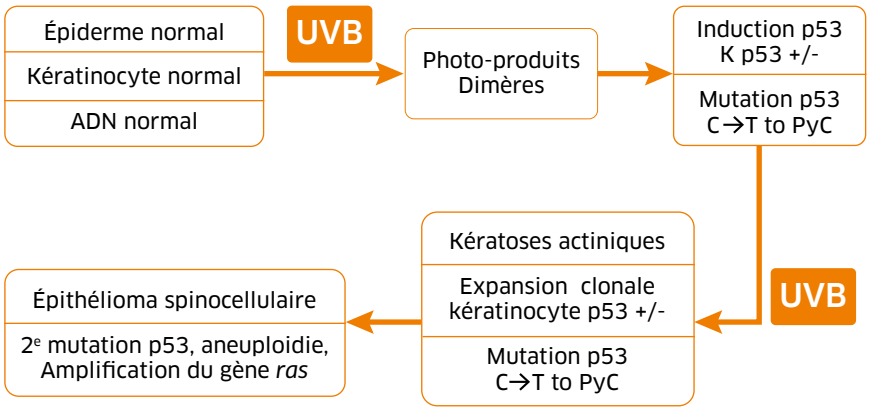
La peau humaine (ou tégument) est un organe complexe associant, d'une part, une couche superficielle, l'épiderme en constant renouvellement et, d'autre part, une couche profonde contenant les vaisseaux et les terminaisons nerveuses entourées du tissu de soutien nourricier. La peau est l'organe le plus important du corps humain (3,5 kilos, surface entre 1,5 et 2 m^2). L'épiderme est constitué, sur une membrane basale, de kératinocytes se divisant toutes les trois semaines et de mélanocytes produisant la mélanine qui est transférée aux kératinocytes des couches supérieures destinées à être éliminées à partir des couches cornées.

des erreurs peuvent survenir, à l'origine des mutations, en particulier des gènes « gardiens du génome », comme p53. Cette séquence est illustrée par la figure 1 conduisant du kératinocyte normal aux cancers cutanés les plus fréquents chez l'homme, les épithéliomas spinocellulaires (80000 nouveaux cas annuels en France).

Les UVA et la portion visible du spectre, absorbés par le matériel cellulaire, induisent par réaction de photosensibilisation la formation de radicaux libres responsables d'anomalies de structure de l'ADN et également de mutations (Cf. Figure 2).

En général, les effets du rayonnement UV sont étalés dans le temps. Après irradiation, on observe dans les 24 heures un érythème ou coup de soleil (cette « brûlure » n'a pas les caractéristiques des brûlures thermiques ou chimiques) et la production de vitamine D. Essentiellement sous l'action des UVB sur le cholestérol (constituant des kératinocytes), la pré-vitamine D est formée puis distribuée par la circulation sanguine aux différents organes pour lesquels la vitamine D est nécessaire (par exemple, fixation du calcium sur la trame osseuse). Le bronzage résulte de l'activation des mélanocytes phaeomélaniques (production de mélanine rouge) et eumélaniques (mélanines brunes). Le type de mélanine est génétiquement déterminé. On a pu distinguer chez les sujets dits « caucasiens » (blancs) différents phototypes présentant différentes sensibilités à l'agression solaire: les sujets mélano-compromis bronzent peu ou pas et rougissent facilement, les sujets mélano-compétents bronzent et prennent peu de coups de soleil. Couplée à l'épaississement de l'épiderme, la mélanine brune procure une bonne protection contre les effets à long terme. 90% des cancers cutanés sont observés chez les sujets mélano-compromis.

Plus tardivement, on observe une réduction des immunités locales et systémiques et d'éventuelles photo-toxicités et photoallergies. Ce n'est qu'au-delà de quelques décennies qu'apparaîtront des cancers cutanés, épithéliomas spino- et basocellulaires, mélanomes ainsi que le vieillissement actinique.



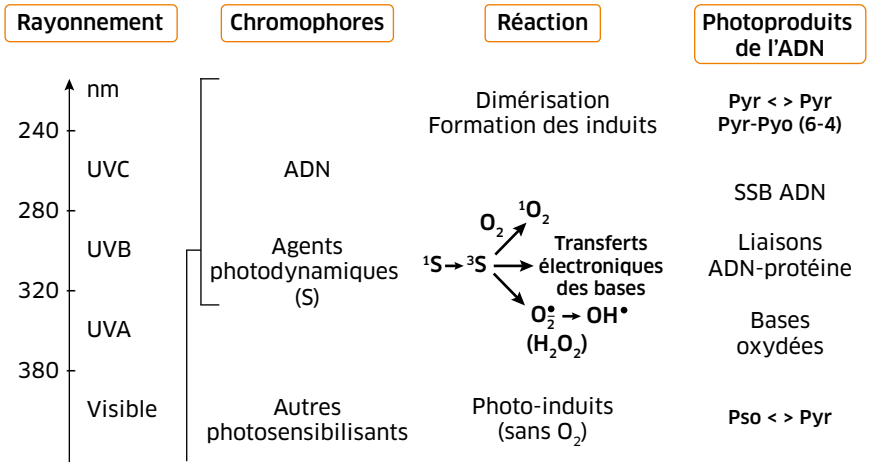
←FIGURE 1
Du kératinocyte normal à l'épithélioma.

EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS VISIBLES

Si de multiples études [1] ont démontré les effets nocifs de la portion UV du spectre solaire sur la peau, les effets du rayonnement visible sur le revêtement cutané ont été peu étudiés. Entre 400 et 500 nm, le rayonnement atteint les capillaires sanguins et des travaux récents [2,3] ont établi l'efficacité de la production radicalaire par le rayonnement visible, soulignant la possibilité pour la partie bleue du spectre lumineux de participer aux conséquences à court terme (pigmentation), à moyen terme (immunosuppression) et à long terme (cancérogenèse et vieillissement) des expositions aux rayonnements naturels et/ou artificiels [4]. La formation des radicaux libres a fait l'objet d'études sur peau humaine en survie [5]. Quantitativement, en référence au spectre solaire tel que défini dans le document CIE 85 et aujourd'hui adopté pour tous les calculs, le rayonnement UV (300-400 nm) induit autant de radicaux que le rayonnement visible (400-800 nm). Plus spécifiquement, le rayonnement visible correspondant à la lumière bleue (380-480 nm) produit un tiers des radicaux induits par la totalité du rayonnement UV. Cette découverte pose bien des questions quant aux nouveaux types d'éclairage et à la portée réelle des produits photoprotecteurs [4].

EFFETS BIOLOGIQUES DU RAYONNEMENT INFRAROUGE

Le rayonnement infrarouge, pénétrant le derme, provoque une sensation douloureuse de brûlure qui dépend de l'augmentation de température. Le seuil de brûlure apparaît à 45°C lorsque l'exposition dure plusieurs secondes et le dommage cellulaire



↑FIGURE 2

Photo-réactions de l'ADN cellulaire lors des expositions aux rayonnements UV lointains, proches et visibles (d'après Cadet *et al.*, 1996).

apparaît à 47°C, ce qui induit généralement une réaction d'évitement. Le rayonnement infrarouge atteignant une surface étendue peut porter atteinte aux systèmes de thermorégulation qui provoque l'échauffement général du corps et un « coup de chaleur » (dépendant de la température ambiante). Par ailleurs, le rayonnement infrarouge, préalable à une agression par le rayonnement UV, protège relativement des dommages induits par les UV, mais s'avère inefficace contre la peroxydation des membranes cellulaires induite par les UV. Le rayonnement infrarouge court augmente l'expression de la métalo-protéinase-1 matricielle (MMP-1) dans le derme et, par conséquent, la fragmentation des fibres élastiques [6]. La réduction du contenu du derme en antioxydants induit un stress oxydatif responsable de l'augmentation d'expression de MMP-1. L'expression de MMP-1 est liée au vieillissement cutané qui pourrait être réduit par l'application d'antioxydants spécifiques.

LES NOUVELLES SOURCES D'ÉCLAIRAGE

Rendues nécessaires par les soucis d'économie d'énergie, de nouvelles technologies d'éclairage ont vu le jour. Les sources lumineuses enrichies en fraction bleue du spectre visible (LED) ont récemment envahi les domaines domestiques et professionnels, conduisant à étudier plus particulièrement les risques biologiques correspondant à ce type de rayonnement. Les travaux de Zastrow *et al.* [3] portant sur le tégument humain (*ex vivo*) ont montré par spectroscopie de résonance électronique (ESRS) que la production de radicaux libres (essentiellement des espèces réactives de l'oxygène) était importante: lors d'une exposition solaire correspondant à un coup de soleil banal, l'UVB était responsable de 4%, les UVA de 46% et le visible de 50% de la production oxydative totale. Cette agression correspond à 10 à 20 000 lux, typique d'un éclairement journalier (2.10^{12} radicaux par milligramme de peau atteints en 30 minutes). À titre indicatif, 100000 lux sont atteints sur un théâtre opératoire de chirurgie.

CONCLUSION

La formation de radicaux libres, en dehors de l'absorption spécifique des UVB par l'ADN, est un processus qui domine sur la totalité du spectre solaire. Lorsque les défenses naturelles antiradicalaires sont débordées, l'excès de radicaux libres générés par exposition au rayonnement UV - visible doit être considéré comme un événement négatif altérant les cellules et les structures tissulaires.
Jusqu'alors, la protection contre la portion visible du spectre solaire n'a pas fait l'objet d'attention et la protection contre la formation de cancers cutanés s'est bornée à une protection anti-UV. Il paraît donc nécessaire, aujourd'hui, de reconsidérer les moyens de lutte contre l'agression UV - visible en particulier pour les travailleurs tant en extérieur (bâtiment, voies de communication, sports…) qu'en intérieur (éclairage ambiant, technologies industrielles…). ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] SFRP. Champs électromagnétiques, environnement et santé 2010, Electromagnetic Fields, Environments and Health (2012); Perrin A. & Souques M. Springer. - Court L. Le rayonnement infrarouge pp.95-102, la lumière et le rayonnement visible pp. 103-114 - Cesarini J-P. Le soleil et le rayonnement ultraviolet pp. 115-132.

[2] Mahmoud B.H. *et al.* *Impact of long-wavelength UVA and visible light on melanocompetent skin.* J.Invest Dermatol 2010; 130: 2092-2097.

[3] Zastrow L. *et al.* *The missing link – light-induced (280-1600 nm) free radical formation in human skin.* Skin.Pharmacol. Physiol.2009; 22: 31-44.

[4] Kleinpenning M.M. *et al.* *Clinical and histological effects of blue light on normal skin. Photoderm,* Photoimmunol. Photomed.2010; 26: 16-21.

[5] Liebmann J., Born M., Kolb-Bachofen V. *Blue-light irradiation regulates proliferation and differentiation in human skin cells.* J.Invest.Dermatol.2010; 130: 259-269.

[6] Schroeder P. *et al.* Infrared *radiation-induced matrix metalloproteinase in human skin: implications for protection.* J.Invest. Dermatol.2008; 128: 2491-2497.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Ultraviolets, lumière bleue et phototoxicité

Claude Speeg-Schatz Ophtalmologue, Hôpitaux universitaires de Strasbourg

Les rayons ultraviolets, appartenant à la lumière non visible, et la lumière bleue, appartenant au spectre visible, présentent des risques pour l'œil humain qu'il convient de bien connaître pour mieux s'en prémunir. Cet article explique les mécanismes de phototoxicité de ces rayonnements et décrit les différents troubles et pathologies oculaires qu'ils peuvent induire.

Dès l'Antiquité, Socrate décrit l'effet délétère de l'observation directe ou réfléchie du soleil. Il existe une frontière étroite avec l'âge entre la photo-transduction à l'origine des phénomènes de la vision et la pathologie liée à l'excès de photons, qui peut exposer l'œil à une toxicité soit de façon aiguë, soit de façon cumulée tout au long de la vie par les facteurs de surexposition, ce d'autant plus que l'espérance de vie augmente.

Sur terre, nous recevons essentiellement des rayonnements solaires (le rayonnement cosmique galactique est atténué par le champ magnétique terrestre), auxquels s'ajoutent les rayonnements artificiels, domestiques et professionnels.

L'exposition aux rayonnements solaires et aux ultraviolets est multifactorielle et la dose exacte que reçoit un individu est difficilement mesurable sans dosimètre. Il existe certainement des doses de rayonnements en petites quantités cumulées au cours des ans dont on ne connaît pas l'effet seuil. L'exposition aux rayonnements solaires varie avec la latitude, l'altitude, le temps, l'heure du jour et la réflexion (+ 10% sur le sable, + 20% sur l'eau, + 80% d'UV sur la neige). L'importance de cette exposition est également variable selon le relief orbitaire.

LES RAYONNEMENTS ULTRAVIOLETS (UV) ET LA LUMIÈRE BLEUE [1]

Les ultraviolets, qui sont les rayonnements les plus dangereux pour les yeux, font partie du domaine non visible.

Leurs longueurs d'onde vont de 180 à 380 nanomètres (UVC 180-280, UVB 280-315 et UVA 315-380 nanomètres, cf. Figure 1). La lumière visible va de 380 nm à 780 nm. Les infrarouges couvrent les longueurs d'onde de 780 nm à 1 µm.

Dans le domaine visible, la lumière bleue va de 380 nm à 500 nm et représente, elle aussi, un danger à long terme pour nos yeux.

La transmission intraoculaire des rayonnements est liée à leur longueur d'onde. Au niveau de la cornée, plus la longueur d'onde augmente, plus la cornée transmet: à 360 nm (ultraviolets) la transmission à l'œil se fait à 70%. En revanche, plus la longueur d'onde augmente, plus le cristallin absorbe: cette absorption augmente avec l'âge et la présence de cataracte.

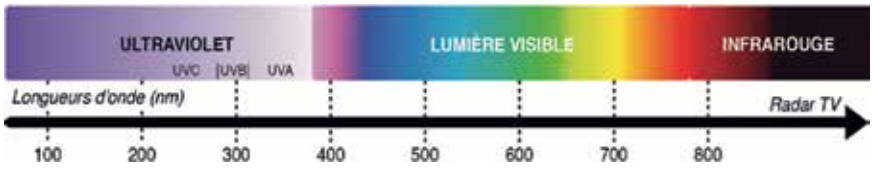


FIGURE 1→
Spectre des rayonnements optiques.

La rétine, qui fait partie de la partie postérieure de l'œil, est exposée aux rayonnements résiduels (peu d'ultraviolets mais essentiellement de la lumière bleue avec un risque sur le vieillissement maculaire, et le développement de maculopathies, dont la dégénérescence maculaire liée à l'âge [DMLA]).
Les enfants ont des yeux plus perméables à la lumière que les adultes. Le nourrisson, jusqu'à l'âge de trois ans, absorbe le rayonnement lumineux de la cornée jusqu'à la rétine de façon totale, à 10 ans seuls 60% des UVA sont absorbés. La transmission des ultraviolets et de la lumière bleue dans les yeux des individus est résumée dans le tableau 1.

TRANSMISSION À LA RÉTINE	UV RÉTINE	LUMIÈRE BLEUE
Adulte	1 à 2%	40% (le cristallin vieillissant absorbe)
Enfant	5%	65%

↑TABLEAU 1
La transmission des UV et de la lumière bleue dans les yeux.

LES RISQUES DES RAYONNEMENTS UV POUR L'ŒIL HUMAIN

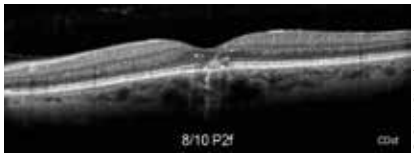
La photo kératoconjonctivite aiguë [2]

C'est le classique tableau du « coup d'arc » ou de l'ophtalmie des neiges à l'origine d'un larmoiement, d'une rougeur, d'une douleur intense au niveau des yeux, d'une photophobie, c'est-à-dire d'une sensibilité à la lumière et d'une sensation de grains de sable. Le sujet sera invalide visuellement pendant 6 à 24 heures et la guérison peut être obtenue en 48 heures.
À long terme, l'appareil visuel ne développe pas de tolérance à l'exposition répétée aux UV, contrairement à la peau.

La rétinopathie solaire aigüe

L'altération provoquée par les UVA porte sur les photorécepteurs. Ces accidents peuvent survenir lorsqu'une personne observe une éclipse ou lorsqu'elle soude sans lunettes de protection. À plus petite échelle, il est possible que les chirurgiens qui travaillent au microscope opératoire soient également exposés. Actuellement, les lésions maculaires peuvent être observées et visualisées notamment par un examen du fond d'œil et un OCT (tomographie en cohérence optique) maculaire.

Ainsi, une étude a montré que chez 40 soudeurs professionnels chinois, 23% présentaient des lésions jaunâtres maculaires et 38% des anomalies en OCT (Cf. Figure 2) [3].



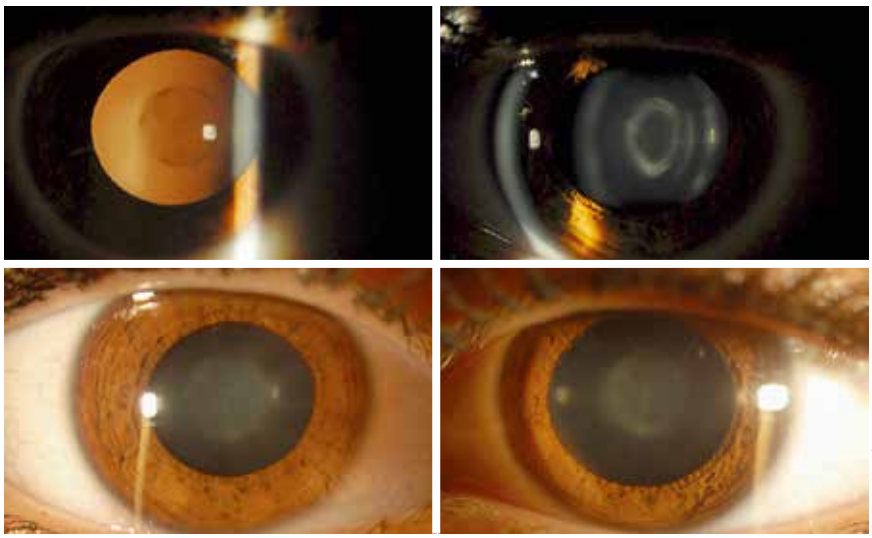
© CHU Strasbourg

↑FIGURE 2
Anomalie relevée en OCT.

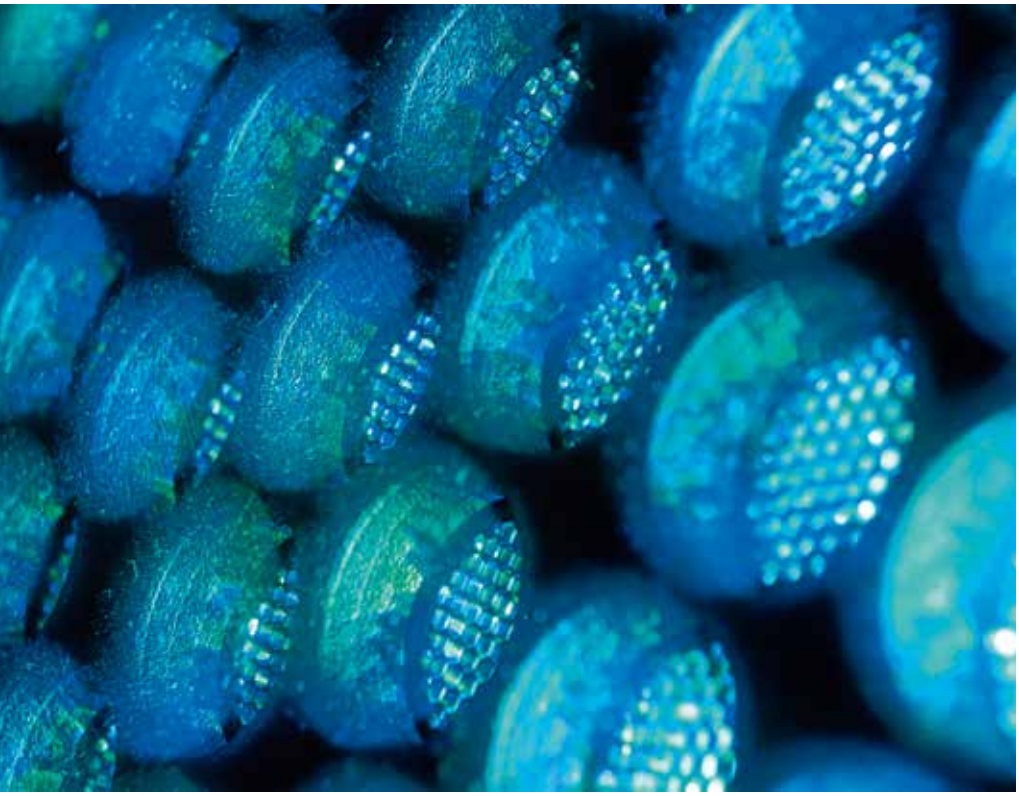
Les risques à long terme

Les études faites sur les animaux *in vivo* confirment la relation indiscutable entre l'exposition aux ultraviolets et l'apparition des cataractes (Cf. Figure 3) [4].

L'exposition aux UV dans l'enfance entraîne l'apparition d'une cataracte plus précoce de 5 à 10 ans.
Par ailleurs, chez le patient opéré de cataracte, la transmission de la lumière bleue non absorbée par la cornée est totale et celle des UVA d'environ 70%. Lorsqu'il porte un cristallin artificiel, il n'a plus la protection naturelle du cristallin jaunissant ce qui augmente l'arrivée des rayonnements intra-oculaires au niveau de la rétine - d'où l'intérêt de mettre des filtres ultraviolets ou un filtre jaune au niveau du cristallin artificiel.
Toutefois, aucune étude n'a démontré la protection d'un implant intra-oculaire jaune sur la progression de la maculopathie liée à l'âge. Il semble cependant que l'incidence de la DMLA exsudative et atrophique soit multipliée par 5,7 chez les patients opérés de cataracte à cinq ans [5].


© CHU Strasbourg

↑FIGURE 3
Différentes formes de cataractes.



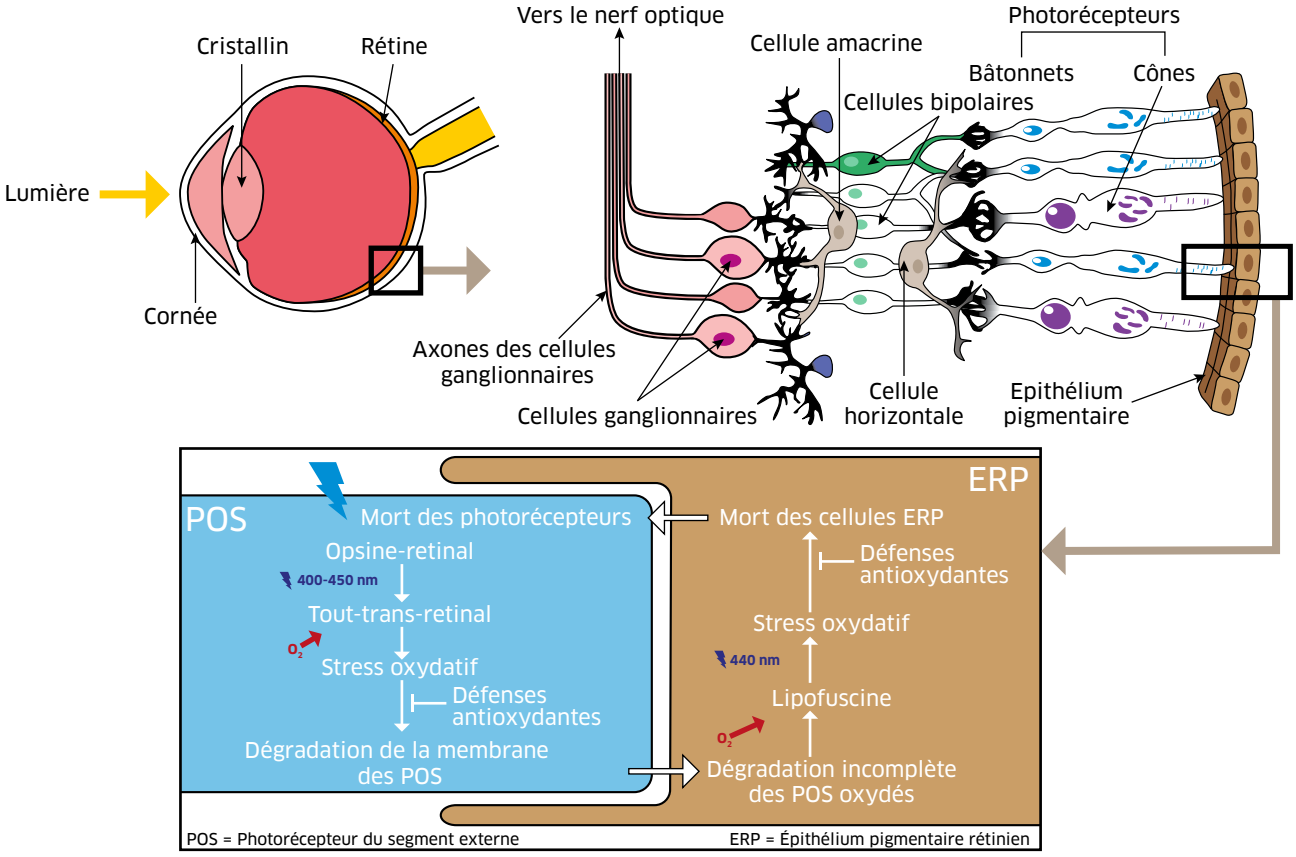
© Gaël Kerbaol/INRS

D'ici 2020, plus de 20% de toutes les sources lumineuses mondiales seront des LED.

L'exposition répétée aux ultraviolets pourrait également conduire à la dégénérescence maculaire liée à l'âge [6, 7], cause fréquente de malvoyance avec impact social. La lipofuscine, pigment du vieillissement de l'épithélium pigmentaire rétinien, est libérée au cours des réactions inflammatoires induites par l'exposition de la rétine à la lumière vive artificielle.
Du fait du lien entre la dégénérescence maculaire liée à l'âge et l'exposition prolongée au soleil, notamment au cours de l'adolescence, on peut garantir une réduction de ce risque de plus de 50% si les individus se protègent du soleil (lunettes protectrices, port de chapeau, casquettes, visière).
Une étude menée en Australie a montré que l'exposition solaire pouvait induire un mélanome de la choroïde avec une forte corrélation après vingt années d'exposition [8].
Enfin, les rayons UV peuvent être à l'origine de lésions cutanées et de lésions au niveau de la surface oculaire: carcinome basocellulaire, carcinome *in situ* conjonctival, ptérygion, kératite chronique…

LES RISQUES DE LA LUMIÈRE BLEUE POUR L'ŒIL [7]

Certains types de rétinopathies pigmentaires sont aggravés par la lumière bleue, nécessitant une protection contre l'éblouissement, par des verres orange. De par sa haute énergie, la lumière bleue peut provoquer et accélérer les réactions photochimiques et conduire à des lésions cellulaires rétiniennes.
La lumière bleue est naturellement produite par le soleil. Elle représente 24 à 30% de la lumière du jour, contre 6 à 10% pour les UVA et UVB.
Elle peut également être produite par des sources de lumière artificielles: les tubes fluocompacts et les LED. D'ici 2020, plus de 90% de toutes les sources lumineuses mondiales reposeront sur les produits d'éclairage à LED.
Dans le spectre du visible, la proportion de la lumière bleue est de 26% pour les lampes fluorescentes et 35% pour les LED blanches froides.
Les LED blanches émettent sur l'ensemble du spectre lumineux avec un pic plus ou moins prononcé autour de 440-460 nm. Elles peuvent avoir une luminance 1000 fois supérieure à une source d'émission traditionnelle. Il existe de ce fait une augmentation significative de l'exposition à ces nouvelles sources de lumière et une augmentation très nette de la quantité de lumière bleue totale reçue par l'œil.
Or la rétine détecte la lumière et régule la photoréception visuelle et non visuelle selon le cycle visuel classique opsine-rhodopsine. La phototoxicité se situerait au niveau de l'épithélium pigmentaire où on assiste à la mort des photorécepteurs à la suite du stress oxydatif, avec dégradation de la membrane des photorécepteurs du segment externe, puis dégradation incomplète des photorécepteurs du segment externe oxydé et transformation en lipofuscine qui, sous l'effet du stress oxydatif, conduit à la mort des cellules de l'épithélium pigmentaire rétinien.
Ainsi, les photorécepteurs du segment externe sont oxydés, la digestion intracellulaire est incomplète et des granules de lipofuscine s'accumulent dans l'épithélium rétinien, sous la forme de *drüsen*.
La lipofuscine possède un composant photosensible, le 2 E, qui augmente avec l'âge et peut être émis par les radiations de lumière bleue à 440 nm, produisant la dégénérescence des cellules de l'épithélium pigmentaire rétinien et des photorécepteurs.
Il existe néanmoins des mécanismes antagonistes du vieillissement au niveau de la rétine: après 45 ans, la proportion de lumière bleue transmise à l'œil diminue, mais la concentration en lipofuscine augmente fortement dans la rétine et les défenses naturelles anti-oxydantes diminuent.
La lumière bleue est un des facteurs pouvant contribuer à l'apparition de la DMLA (Cf. Figure 4).



↑FIGURE 4
Mécanismes de phototoxicité dans la rétine externe.

CONCLUSION

Les résultats des études confirment l'état délétère des ultraviolets et de la lumière bleue sur l'œil à trois niveaux :
• la surface de l'œil et le cristallin ;
• la rétine (lumière bleue ++) ;
• l'exposition aux UV et à la lumière bleue est insidieuse, chronique et cumulée sur plusieurs années.
La protection contre les rayonnements UV et la lumière bleue dans la vie courante doit être précoce et continue en condition d'exposition, avec des équipements adaptés aux activités (haute montagne supérieure à 3000 m, neige, mer…).
La santé visuelle de l'enfant ou de l'adolescent passe par une meilleure éducation des personnels en charge de leur éducation et par une meilleure éducation des jeunes eux-mêmes.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Taylor H.R., *Ultraviolet radiation and the eye: an epidemiologic study. Trans. Am. Ophthalmol. Soc.* 1989 ; 87 : 802–853.

[2] Urrets-Zavalía J. A., Knoll E.G., Maccio J.P., Urrets Zavalia E.A., Saad J.A., Serra H.M., *Climatic Droplet Keratopathy in the Argentine Patagonia. Am. J. Ophthalmology* vol 141,issue 4, 2006, 744-746.

[3] Yang *et al.*, *Chronic phototoxic maculopathy caused by welding arc in occupational welders, Can. J. Ophthalmol,* 2012, 45-50.

[4] Delcourt C., Carrière I., Ponton-Sanchez A., Lacroux A., Covacho M.J., Papoz L., *Light exposure and the risk of cortical, nuclear, and posterior subcapsular cataracts: the Pathologies Oculaires Liées à l'Âge* (POLA) *study.*

[5] Guo-Yuan Sui *et al.*, *Is sunlight exposure a risk factor for age-related macular degeneration? A systematic review and meta-analysis. The British journal of ophthalmology.* 2012 ; 97(4):389-394.

[6] Algvere Peep V., Marshall J. and Seregard S., *Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard - Acta Ophthalmologica Scandinavica.* 2000 Mar ; 118(3) : 385-92.

[7] Hamel C., *Retinitis pigmentosa. Orphanet journat of rare diseases,* 2006, Oct 11 ; 1:40.

[8] Bulletin de l'OMS, vol 87 : 2009 : 565-644.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Réglementation applicable en matière de prévention des risques d'exposition aux rayonnements optiques artificiels

Émilie Dufaÿ Direction générale du travail

Au regard des risques que peuvent présenter les rayonnements optiques artificiels pour la santé humaine, le Code du travail impose à l'employeur différentes obligations de nature à protéger la santé et la sécurité des travailleurs, notamment en termes d'évaluation des risques, de mesures de prévention à mettre en œuvre, de suivi et de surveillance médicale. Cet article fait le point sur ce qu'il faut savoir.

Les rayonnements optiques artificiels (ROA), sont utilisés, à des fins d'éclairage, dans un nombre important d'applications industrielles (séchage des encres, polymérisation, désinfection UV, contrôles non destructifs, etc.) et pour des usages cosmétiques et médicaux (photothérapie par UV, désinfection, etc.). Des rayonnements sont également générés de façon non intentionnelle dans le soudage à l'arc, par les fours de fusion et le travail à chaud des matériaux (verreries, forges, aciéries, etc.). Les travailleurs peuvent donc être exposés à des ROA issus de nombreuses et diverses sources, ces rayonnements pouvant avoir des incidences sur les yeux et la peau.

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Dispositif communautaire

L'Union européenne a introduit, au travers de la directive 2006/25/CE du 5 avril 2006[1] des mesures visant à protéger les travailleurs contre les risques pour la santé et la sécurité liés aux rayonnements optiques artificiels, créant pour l'ensemble des travailleurs de la Communauté un socle minimal de protection.
Selon les principes définis par la directive-cadre 89/391/CEE du Conseil européen du 12 juin 1989 concernant la prévention des risques professionnels et la protection de la sécurité et de la santé, ces directives définissent des valeurs limites d'exposition, des obligations en direction des employeurs et des exigences en matière de surveillance de la santé des travailleurs.

Dispositif français

La directive « Rayonnements optiques artificiels » a été transposée en droit français par le décret n°2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. Cette réglementation spécifique a été codifiée aux articles R. 4452-1 à R. 4452-31 du Code du travail et complétée par deux arrêtés du 1er mars 2016 relatifs aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail et aux conditions d'accréditation des organismes pouvant procéder aux mesurages des niveaux d'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail.

OBLIGATIONS DES EMPLOYEURS

Obligations générales de l'employeur

L'employeur, responsable de la santé et de la sécurité des travailleurs, doit

évaluer l'ensemble des risques qu'ils encourent et mettre en œuvre les moyens de protection adaptés, sur le fondement des principes généraux de prévention. À cet effet, il consulte notamment les représentants du personnel ou le comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT) et le médecin du travail [1].

Prévenir les risques

En matière de ROA, l'employeur doit prendre des mesures de prévention visant à supprimer ou à réduire au minimum les risques, en tenant compte du progrès technique et de la disponibilité de mesures de maîtrise du risque à la source [2].

Évaluer les risques

L'évaluation des risques est réalisée :

- après consultation du CHSCT ou à défaut des délégués du personnel, avec le concours, le cas échéant, du service de santé au travail ;
- à des intervalles appropriés, notamment en cas de modification des installations ou des modes de travail susceptibles de faire varier les niveaux d'exposition.

Détermination des niveaux d'exposition

Aux fins de l'évaluation des risques, l'employeur doit notamment déterminer les niveaux d'exposition des travailleurs aux ROA.

La réglementation prévoit tout d'abord une évaluation des risques à partir des données documentaires techniques disponibles. Si cette évaluation ne permet pas de conclure à l'absence de risque, l'employeur procède à une évaluation des niveaux d'exposition par calcul et, si nécessaire, par mesurage.

L'arrêté du 1er mars 2016, relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail, vient préciser ces étapes de l'évaluation de risques pour la mise en place d'une approche progressive et adaptée aux enjeux.

Cet arrêté [3] précise :

- les sources d'information disponibles pour l'évaluation ;
- la norme satisfaisant aux exigences du 9° de l'article R. 4452-8 du Code du travail ;
- les données nécessaires à l'évaluation des niveaux d'exposition par calcul ou simulation numérique ;
- les modalités de réalisation des mesurages.

Les niveaux d'exposition sont déterminés à partir de la combinaison d'éclairement énergétique, d'exposition énergétique et de luminance énergétique à laquelle est exposé un travailleur.

Les critères de base caractérisant les expositions [4] sont :

- éclairement énergétique (E) ou densité de puissance : puissance rayonnée incidente par superficie unitaire sur une surface, exprimée en $W.m^{-2}$;
- exposition énergétique (H) : intégrale de l'éclairement énergétique par rapport au temps, exprimé en $J.m^{-2}$;
- luminance énergétique (L) : flux énergétique ou puissance par unité d'angle solide et par unité de surface, exprimé en $W.m^{-2}.sr^{-1}$.

Les niveaux d'exposition des travailleurs doivent être comparés à des valeurs limites d'exposition (VLE) fixées réglementairement [5] qui conditionnent les mesures de prévention à mettre en œuvre.

Ces valeurs ont été fixées afin de protéger les travailleurs contre les effets sur la santé et la sécurité des ROA, notamment les lésions photochimiques et thermiques sur les yeux et la peau.

Les VLE sont les niveaux d'exposition maximum admis. Le respect de ces valeurs garantit que le travailleur exposé à des sources artificielles de ROA est protégé de tout effet nocif sur la santé.

Ces valeurs, différenciées pour les rayonnements laser et les rayonnements incohérents, tiennent compte des effets sur la santé des rayonnements optiques selon les longueurs d'onde, la durée d'exposition et les tissus touchés.

L'arrêté du 1er mars 2016, relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail, vise des normes françaises de mesurage des niveaux de rayonnement optique cohérents auquel il confère une présomption de conformité afin de les reconnaître comme mode de preuve privilégiée pour satisfaire aux exigences de la réglementation.

La référence aux normes françaises vise à assurer la diffusion d'un cadre technique solide et faisant consensus, la fiabilité des mesurages et un degré important d'homogénéité des pratiques sur un sujet hautement technique aujourd'hui peu développé. L'employeur, ou l'organisme de mesurage qu'il fait intervenir, peut toutefois utiliser d'autres méthodes de mesurage que celles citées dans l'arrêté s'il justifie en pratique que les résultats qu'il obtient sont semblables à ceux qu'il aurait obtenus en mettant en œuvre celles prévues par les normes visées par l'arrêté [6].

En cas de mesurages, ceux-ci doivent être renouvelés au moins tous les cinq ans [7].

Autres éléments à prendre en considération par l'employeur pour l'évaluation des risques

Ces éléments [8] sont :

- l'exposition à plusieurs sources de ROA ;
- les interactions, sur le lieu de travail, entre des ROA et des substances chimiques photosensibilisantes ;
- tout effet indirect tel qu'un aveuglement temporaire, une explosion ou un incendie ;
- l'existence d'équipements de remplacement conçus pour réduire les niveaux d'exposition à des ROA ;
- les informations appropriées issues des recommandations des instances sanitaires ;
- les informations fournies par les fabricants de sources de ROA et d'équipements de travail associés conformément à la réglementation applicable ;
- le classement d'un laser dans la ou les classes de lasers intrinsèquement dangereux en cas d'exposition directe au faisceau ou d'exposition à ses réflexions.

Traçabilité et information sur les résultats de l'évaluation des risques
Les résultats de l'évaluation des risques doivent être consignés dans le document unique d'évaluation des risques (DUER). Ils sont communiqués au médecin du travail, aux membres du CHSCT ou, à défaut, aux délégués du personnel, et sont tenus à disposition de l'inspection du travail et des agents des services de prévention [9].

Mettre en œuvre les mesures adaptées au regard des résultats de l'évaluation des risques

Lorsque les résultats de l'évaluation des risques mettent en évidence la moindre possibilité de dépassements des VLE des travailleurs, l'employeur détermine des mesures de prévention, de formation et de suivi médical [10].

Réduction des expositions
La réglementation prévoit la mise en œuvre par l'employeur de mesures de réduction des risques d'exposition [11] :
- choix d'autres procédés n'exposant pas aux ROA ou entraînant une exposition moindre aux ROA ;
- choix d'équipements de travail appropriés émettant le moins de ROA possible ;
- limitation de la durée et de l'intensité des expositions ;
- conception, agencement des lieux et des postes de travail et leur modification ;
- moyens techniques réduisant l'exposition aux ROA en agissant sur leur émission, leur propagation, leur réflexion, tels qu'écrans ou capotages ;
- programmes appropriés de maintenance des équipements de travail et du lieu de travail ;
- information et formation adéquates des travailleurs ;
- signalisation appropriée des lieux de travail où les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des ROA dépassant les VLE. Ces lieux sont circonscrits lorsque cela est techniquement possible et leur accès est limité ;
- adaptation des mesures de prévention aux besoins des travailleurs appartenant à des groupes à risques particulièrement sensibles.

Équipements de protection individuelle
La mise à disposition d'équipements de protection individuelle (EPI) appropriés et adaptés est prévue lorsqu'il n'est pas possible d'éviter les risques d'exposition aux ROA par d'autres moyens. L'employeur veille à leur port effectif lorsque les VLE sont dépassées.
Les EPI sont choisis en concertation avec les travailleurs et sont tels qu'ils réduisent les expositions à un niveau ne dépassant pas les VLE. Ils sont adoptés après consultation du CHSCT ou, à défaut, des délégués du personnel, du médecin du travail et, éventuellement, avec le concours des agents des services de prévention des organismes de sécurité sociale [12].

Mesures en cas de dépassement « accidentel » des VLE
En cas de constatation de dépassement des VLE en dépit des mesures de prévention mises en œuvre, l'employeur :
- prend immédiatement des mesures pour réduire l'exposition à un niveau inférieur à ces valeurs limites ;
- détermine les causes du dépassement des VLE et adapte en conséquence les mesures de protection et de prévention en vue d'éviter tout nouveau dépassement [13].

Notice de poste
Pour chaque poste ou situation de travail où les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des ROA dépassant les VLE, l'employeur établit une notice de poste informant les travailleurs des risques auxquels leur travail peut les exposer et les dispositions prises pour les éviter, rappelant les règles de sécurité applicables et les consignes relatives à l'emploi des équipements de protection collective ou individuelle [14].

Usage des lasers
Lorsqu'il est fait usage d'appareils à laser de classe de lasers intrinsèquement dangereux en cas d'exposition directe au faisceau ou d'exposition à ses réflexions, l'employeur doit disposer de la compétence appropriée, par lui-même ou chez ses salariés, pour participer :
- aux évaluations des risques et à la mise en œuvre de toute mesure propre à assurer la santé et la sécurité des travailleurs intervenant à proximité de machines ou d'appareils à laser ;
- à l'amélioration continue de la prévention des risques à partir de l'analyse des situations de travail [15].

SUIVI DES TRAVAILLEURS ET SURVEILLANCE MÉDICALE

Suivi des travailleurs susceptibles d'être exposés aux ROA au-delà des valeurs limites d'exposition

L'employeur tient à jour une liste des travailleurs susceptibles d'être exposés à des ROA dépassant les VLE qui précise la nature de l'exposition, sa durée ainsi que son niveau connu, le cas échéant grâce aux résultats du calcul ou du mesurage.
Pour ces travailleurs, il établit également une fiche d'exposition, dont une copie est remise au médecin du travail, et comprenant :
- la nature du travail accompli ;
- les caractéristiques des sources émettrices auxquelles le travailleur est exposé ;
- la nature des rayonnements ;
- le cas échéant, les résultats des mesurages des niveaux de ROA ;
- les périodes d'exposition ;
- la durée et la nature des expositions anormales.

Les travailleurs concernés sont informés de l'existence de cette fiche et ont accès aux informations les concernant y figurant. Elle est tenue à disposition de l'inspection du travail sur sa demande [16].
Le médecin du travail constitue et tient un dossier individuel contenant

cette fiche d'exposition et les dates et les résultats des examens médicaux pratiqués [17].

Travailleurs exposés au-delà des valeurs limites ou atteints d'une affection susceptible de résulter des ROA

Le médecin informe le travailleur des résultats le concernant et lui indique les suites médicales nécessaires. Il détermine la pertinence et la nature des examens éventuellement nécessaires pour les autres travailleurs ayant subi une exposition comparable.
L'employeur, à qui le médecin a signalé l'affection, révise l'évaluation des risques [18].

CONTRÔLE DES NIVEAUX D'EXPOSITION PAR UN ORGANISME ACCRÉDITÉ

Demandes de contrôle des niveaux d'exposition

L'inspection du travail a la possibilité de demander à l'employeur de faire procéder à un contrôle technique des valeurs limites d'exposition aux ROA par un organisme accrédité.
Lorsque l'inspection du travail procède à une demande de contrôle, l'employeur justifie qu'il a saisi l'organisme accrédité dans le délai fixé par l'inspecteur et transmet à l'inspection du travail les résultats dès leur réception [19].

Accréditation des organismes de mesurage

Conformément aux dispositions de l'article R. 4724-18, les conditions des accréditations, délivrées en France par le comité français d'accréditation (Cofrac), sont fixées par l'arrêté du 1er mars 2016 relatif aux conditions d'accréditation des organismes pouvant procéder au mesurage de l'exposition aux ROA en milieu de travail, dont la date d'entrée en vigueur est fixée au 1er janvier 2018.
Les mesurages réalisés par ces organismes devront répondre aux exigences fixées dans un référentiel validé par le Cofrac et reprenant notamment les normes techniques visées par la réglementation.
Cet arrêté prévoit que les responsables techniques et les techniciens de mesures des organismes accrédités disposent des connaissances et compétences sur :

- les fondements de la radiométrie et de la spectroradiométrie ;
- les méthodologies de mesurage et la mise en œuvre de l'instrumentation ;
- la méthode d'évaluation des risques d'exposition en milieu de travail ;
- la signification des valeurs limites d'exposition ;
- la réglementation relative à la prévention des risques d'exposition aux ROA.

Ces organismes de mesurage devront s'assurer que le domaine spectral couvert par leur accréditation est en adéquation avec les conditions d'exposition des travailleurs pour lesquels ils procèdent aux mesurages. Ils participeront également à des vérifications de la qualité de leurs mesures et transmettront un bilan de leur activité au ministre du travail.

CONCLUSION

Les arrêtés du 1er mars 2016 viennent compléter le dispositif réglementaire mis en place depuis 2010 afin d'en assurer la pleine effectivité.
L'arrêté relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux ROA en milieu de travail est ainsi déjà applicable à l'ensemble des employeurs concernés par l'emploi de travailleurs exposés aux ROA.
L'arrêté relatif aux conditions d'accréditation des organismes pouvant procéder aux mesurages des niveaux d'exposition aux ROA en milieu de travail qui ne s'adresse qu'aux organismes chargés des mesurages de l'exposition aux ROA, a permis au Cofrac d'engager sans délai l'élaboration du référentiel d'accréditation auquel ces organismes auront à satisfaire.
Enfin, il convient de souligner que, comme pour le bruit et les vibrations, les mesurages de l'exposition aux ROA en milieu professionnel sont réalisés à l'initiative de l'employeur dans le cadre de l'évaluation de ce risque ou sur demande des services d'inspection du travail, auquel cas l'employeur doit faire appel pour leur réalisation à un organisme de mesure accrédité. ●

1. Directive 2006/25/CE du 5 avril 2006 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels).

BIBLIOGRAPHIE

[1] Articles L. 4121-1 à L. 4121-5 du Code du travail.

[2] Article R. 4452-2.

[3] Article R. 4452-7, R.4452-12, articles 1 à 4 de l'arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail.

[4] Article R. 4452-1.

[5] Articles R. 4452-5 et R.4452-6.

[6] Article 4 de l'arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail.

[7] Article R. 4452-9.

[8] Article R. 4452-8.

[9] Article R. 4452-10.

[10] Article R. 4452-11.

[11] Articles R. 4452-13, R. 4452-14 et R. 4452-15.

[12] Articles R. 4452-16 et R. 4452-17.

[13] Article R. 4452-18.

[14] Article R. 4452-20.

[15] Article R. 4452-21.

[16] Articles R. 4452-22, R. 4452-23, R. 4452-24, R.4452-25 et R.4452-26.

[17] Article R. 4452-31.

[18] Articles R. 4452-29 et R. 4452-30.

[19] Articles R. 4722-21 et R. 4722-21-1.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Exposition des travailleurs aux sources de lumière artificielle : normes de sécurité applicables

Olivier Enouf, Jimmy Dubard Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)

Cet article présente la classification des sources de rayonnement optique artificiel en fonction des valeurs limites d'exposition ainsi que les exigences associées. Il pointe également les similitudes et les différences entre les deux référentiels de sécurité liés aux rayonnements optiques et présente les différents dispositifs de sécurité à mettre en œuvre.

Les sources de lumière artificielle (laser, LED, lampes à décharge, lampes à incandescence) sont couramment utilisées dans l'industrie (soudage, contrôle non destructif [CND], bâtiment…) et le tertiaire (santé, recherche, enseignement, défense, télécom…). Le rayonnement émis par ces sources peut présenter un danger pour les yeux et la peau des travailleurs.

La directive (2006/25/CE du 05/04/2006) [1] donne les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels [ROA]). Ces rayonnements optiques peuvent être « cohérents » (laser, cf. Figure 1) ou « non cohérents » (sources de rayonnement optique autres que laser, cf. Figure 2). Des valeurs limites d'exposition (VLE) pour ces deux types de sources sont établies et reprises dans deux référentiels de sécurité liés aux rayonnements optiques :

- NF EN 60825-1 octobre 2014 [2] : « Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : Classification des matériels et exigences » ;
- NF EN 62471 décembre 2008 [3] : « Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes ».

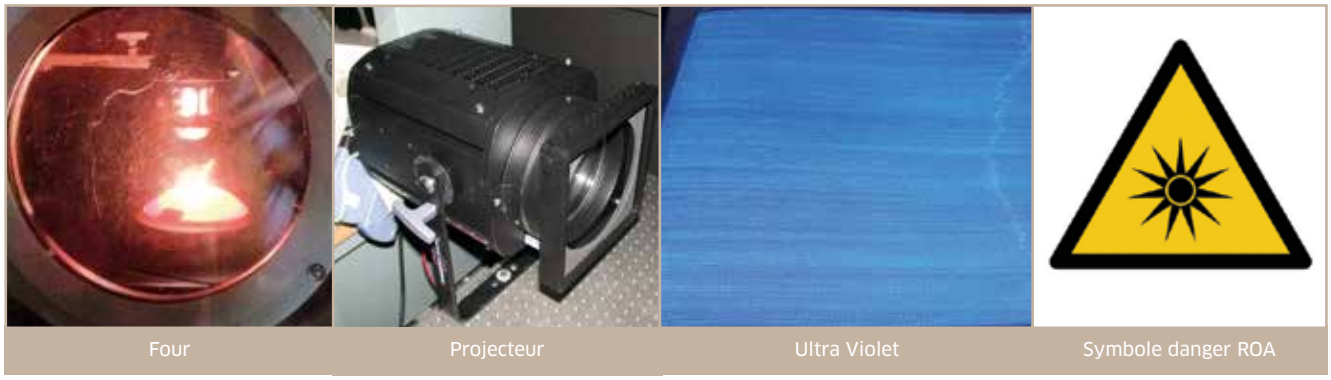
La directive 2006/25/CE portant sur les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) a été transcrite en France par le décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 [4] relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux ROA.

Ce décret modifie le Code du travail et définit les principes de prévention. L'employeur doit prendre les dispositions visant à supprimer ou, à défaut, à réduire au minimum les risques résultant de l'exposition aux ROA.

Pointeur laser vert | Laser industriel de découpe | Symbole danger laser

© LNE

FIGURE 1→
Exemples de sources laser.



↑FIGURE 2
Autres sources de rayonnement optique artificiel.

Il impose une évaluation des risques à partir de données documentaires ou de mesures. Il recommande la mise en place de moyens de prévention en utilisant des procédés moins nocifs, en limitant la durée d'exposition du travailleur ou en modifiant l'agencement du poste de travail.
L'employeur a une obligation d'information sur les risques pour la santé en lien avec l'exposition aux sources de ROA et de surveillance médicale.
Cette directive définit les valeurs limites d'exposition.

LES VALEURS LIMITES D'EXPOSITION (VLE)

Les VLE sont issues des travaux et des recommandations de l'ICNIRP[1] et de l'ACGIH[2]. Elles sont définies pour les deux types de rayonnements cohérents et incohérents correspondant respectivement aux sources laser et aux sources autres que laser.
Pour les deux types de rayonnement, les VLE sont dépendantes de la longueur d'onde, du rayonnement accessible, de la géométrie de la source apparente, de la durée d'exposition journalière et de la forme temporelle de l'émission.
Les VLE sont aussi utilisées dans les deux normes « produits » suivantes :

- NF EN 60825-1 octobre 2014 [2] : « Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : Classification des matériels et exigences ». Cette norme est applicable pour les appareils à laser ;
- NF EN 62471 décembre 2008 [3] : « Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes ». Cette norme est applicable pour les appareils avec sources de rayonnements optiques artificiels autres que laser.

LES NORMES DE SÉCURITÉ

Ces deux normes de sécurité définissent des « catégories » de risque :

- classes de rayonnement laser pour la norme NF EN 60825 ;
- groupes de risque pour la norme NF EN 62471.

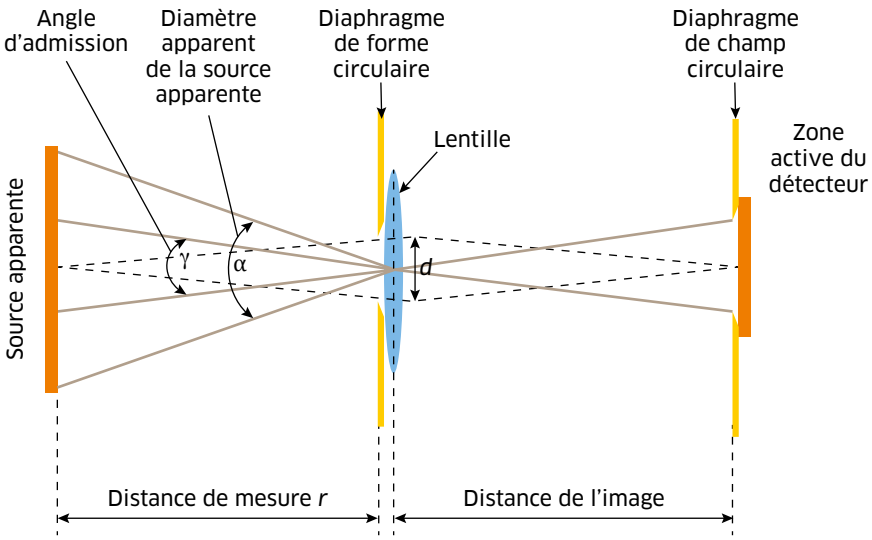
Ces catégories sont établies à partir de valeurs limites qui sont « monochromatiques » ou longueur d'onde par longueur d'onde pour les appareils à laser et par bandes spectrales pour les appareils avec des sources de rayonnements optiques autres que laser.
Le tableau 1 résume les classes laser et les groupes de risque.
Les VLE de la directive [1] sont équivalentes à la limite de la classe 1 pour les appareils à laser et au groupe « sans risque » pour les autres appareils.
Le tableau 2 synthétise et compare les caractéristiques des VLE.
Dans le cas des sources laser, la VLE est dépendante de la dimension « apparente » de la source. Cette dimension apparente correspond à la dimension angulaire de la plus petite image rétinienne de la source. Une erreur d'évaluation de la dimension apparente peut entraîner une détermination de VLE supérieure à ce qu'elle devrait être.
Les limites d'exposition étant définies, il faut les comparer au rayonnement accessible de l'appareil en tenant compte des conditions géométriques de mesure.
La figure 3 donne le principe du dispositif d'évaluation pour les deux types de rayonnement.

COHÉRENT SOURCE LASER	INCOHÉRENT AUTRES SOURCES
NF EN 60825-1 : 2014	NF EN 62471 : 2008
Sécurité des appareils à laser Partie 1 : Classification des matériels et exigences	Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes
Monochromatique	Spectre large
Classes laser : 1, 1C, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4	Groupes de risque : 0 (sans risque), 1 (risque faible), 2 (risque modéré) et 3 (risque élevé)

TABLEAU 1→
Classes laser et groupes de risque.

	COHÉRENT SOURCE LASER	INCOHÉRENT AUTRES SOURCES
NORMES	NF EN 60825-1: 2014	NF EN 62471: 2008 (Directive)
DOMAINE SPECTRAL	180 nm – 1 mm	200 nm – 3000 nm
GRANDEURS ÉVALUÉES	Éclairement Exposition énergétique	Luminance Éclairement Exposition énergétique
UNITÉS	W/m^2 J/m^2	$W/m^2/sr$ ou W/m^2 $J/m^2/sr$ ou J/m^2
TRAITEMENT ÉVALUATION	Cœfficient de correction (diamètre apparent)	Fonctions spectrales de pondération (UV, Bleue, Thermique)

↑TABLEAU 2
Caractéristiques des VLE.



↑FIGURE 3
Principe du dispositif d'évaluation.

	COHÉRENT SOURCE LASER	INCOHÉRENT AUTRES SOURCES
NORMES	NF EN 60825-1: 2014	NF EN 62471: 2008
ANGLE D'ADMISSION OU CHAMP VISÉE	Fixe	Variable (simulation des mouvements oculaires)
DISTANCE DE MESURE	100 mm	200 mm ou plan 500 lx (≠ GLS*) (= GLS*)

GLS: General Lighting Service

↑TABLEAU 3
Caractéristiques géométriques de mesures.

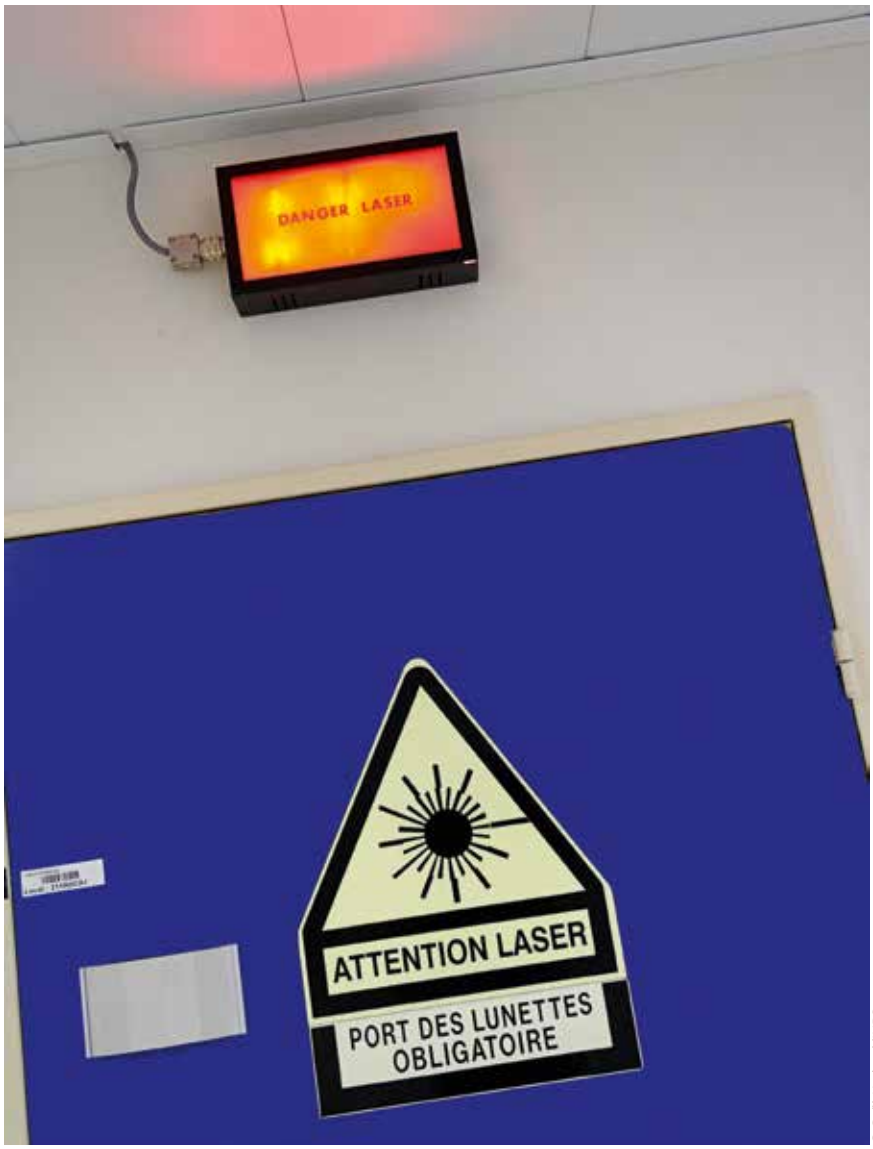
Dans le tableau 3 sont précisés les distances de mesure et l'angle d'admission ou champ de visée.
Le diaphragme de forme circulaire faisant office de diaphragme d'ouverture a un diamètre dépendant de la longueur d'onde pour les sources laser.
Dans le cas de l'évaluation de sources incohérentes, le champ de visée ou angle d'admission a une valeur dépendante de la durée d'exposition. Une erreur dans l'évaluation du champ de visée à appliquer entraînerait une sous-estimation du rayonnement accessible.
Ces notions complexes de dimensions apparentes et d'angle d'admission peuvent être une source d'erreur respectivement pour la détermination de la VLE ou pour la mesure du rayonnement accessible.
Cela s'est confirmé dans le cas de l'évaluation des classes laser selon la norme NF EN 60825-1 où un avis aux opérateurs (laboratoires de mesure) publié au *Journal Officiel* a rappelé comment devait être interprété cette notion de dimension apparente.
Des précisions dans l'application de la norme NF EN 62471 seront-elles nécessaires pour éviter des erreurs dans l'évaluation du risque pour les sources incohérentes ?

LES DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ

Le rayonnement accessible étant évalué, l'utilisateur de l'appareil connaît le risque et peut alors mettre

	COHÉRENT SOURCE LASER	INCOHÉRENT AUTRES SOURCES
NORMES	NF EN 60825-1: 2014	NF EN 62471: 2008
MARQUAGES SÉCURITÉ	oui	Rapport technique
PRESCRIPTIONS DE FABRICATION	Oui	Non
ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE	Oui	Non
NORMES EPI	EN 207 (laser) EN 208 (réglage laser)	EN 169 (soudage) EN 170 (UV) EN 171 (IR)

↑TABLEAU 4
Prescriptions de sécurité et EPI.



© Gaël Kerbaol/INRS

↑ Pour entrer dans ce laboratoire équipé d'un laser, le port des lunettes est obligatoire.

en œuvre des moyens de protection. Les normes « produits » peuvent prévoir la mise en place de dispositifs de sécurité ou prescrire des recommandations pour assurer la protection des utilisateurs.
Le tableau 4 résume les prescriptions de sécurité définies dans les normes ainsi que les normes existantes pour les équipements de protection individuelle.
Pour les appareils à laser de classe 3B et 4, la norme de référence laser impose l'évaluation de distance nominale de danger oculaire (DNDO). Pour les sources incohérentes, l'évaluation de la distance de sécurité est présentée dans le rapport technique associé à la norme NF EN 62471 pour les produits appartenant aux groupes de risque 2 et 3. ●

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

2. American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Parlement européen 2006. Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). J.O. 38–59.

[2] NF EN 60825-1 2014. Sécurité des appareils à laser – Partie 1: classification des matériels et exigences, Afnor, 121.

[3] NF EN 62471 2008. Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes, Afnor, 46.

[4] République française Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. J.O. 4 Juillet 2010, Texte 11.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Toxicité rétinienne de la lumière bleue: une étude sur le rat

Pierre Boulenguez, Christophe Martinsons, Samuel Carré Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

Imène Jaadane, Alicia Torriglia Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm)

Sabine Chahory École nationale vétérinaire d'Alfort (Enva)

Cet article présente une expérience visant à mieux comprendre les mécanismes de la toxicité rétinienne de la lumière bleue. L'expérience a été conduite sur des rats Wistar libres de leurs mouvements, exposés jusqu'à dix-huit heures à des spectres riches en lumière bleue. Les rétines ont été analysées par microscopie électronique en transmission, Western Blot, immunofluorescence et *Terminal transferase dUTP nick end labelling* (TUNEL).

Le risque dû à la lumière bleue (RDLB) désigne un phénomène photochimique encore mal compris par lequel les radiations à l'extrémité bleue du spectre visible induisent des dommages dans la couche des photorécepteurs et l'épithélium pigmentaire rétinien (EPR).

Les lésions aiguës, qui apparaissent jusqu'à quarante-huit heures après une exposition à forte dose à la lumière bleue (radiation rétinienne pondérée RDLB > 20 J/cm²), ont été décrites au cours des années 1970 [2]. Dès ces premières recherches, l'exposition chronique à de faibles doses a aussi été suspectée de jouer un rôle dans l'apparition de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) – première cause de malvoyance des personnes de plus de 50 ans dans les pays développés.

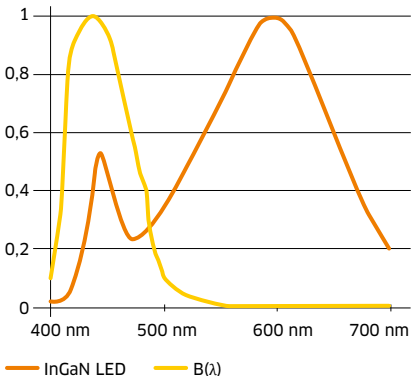


FIGURE 1→
Spectre d'action du RDLB et spectre d'une LED InGaN.

À notre connaissance, ce lien n'a pas été démontré mais des travaux récents montrent que la N-retinylidene-N-retinylethanolamine (A2E), une protéine associée à la DMLA, est photosensible dans l'intervalle de longueurs d'ondes du RDLB [11].

L'intensification des recherches concernant le RDLB s'explique par l'émergence de l'usage des diodes électroluminescentes (LED) à « lumière blanche » pour l'éclairage: les LED nitrure de gallium-indium (InGaN) et nitrure de gallium (GaN-on-GaN) émettent en effet plus de lumière bleue par lumen que les sources qu'elles remplacent (Cf. Figure 1).

Le spectre d'action du RDLB (Cf. Figure 1) a été déterminé par expérimentation animale. Van Norren et Gorgels [9] ont recensé les organismes modèles suivants dans la littérature: rats (9), macaques (7), lapins (2), et écureuils (1).

L'*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) s'est appuyée sur ces études (notamment sur [2]) pour estimer que le seuil de toxicité se situe à une dose rétinienne aiguë de radiation pondérée RDLB entre 20 et 30 J/cm² [7]. Une valeur limite d'exposition (VLE) a par la suite été fixée à 2,2 J/cm² en prenant un facteur de sécurité [10].

Pour s'assurer que l'usage normal d'une source n'induirait pas un dépassement de cette VLE, une quantité intermédiaire appelée

« luminance pondérée RDLB moyennée spatialement » (LPRDLBMS) est généralement employée. La LPRDLBMS est obtenue à partir de la luminance spectrique de la source, pondérée par le spectre d'action du RDLB, et moyennée dans un angle solide fini dont l'étendue dépend du temps d'exposition [6].
La LPRDLBMS prend en compte les mouvements oculaires volontaires et involontaires et la contraction pupillaire. La maîtrise dans sa mesure, ainsi que des incertitudes spectrale, spatiale et directionnelle, est essentielle à la classification correcte d'une source en un groupe de risque photobiologique [12, 13].

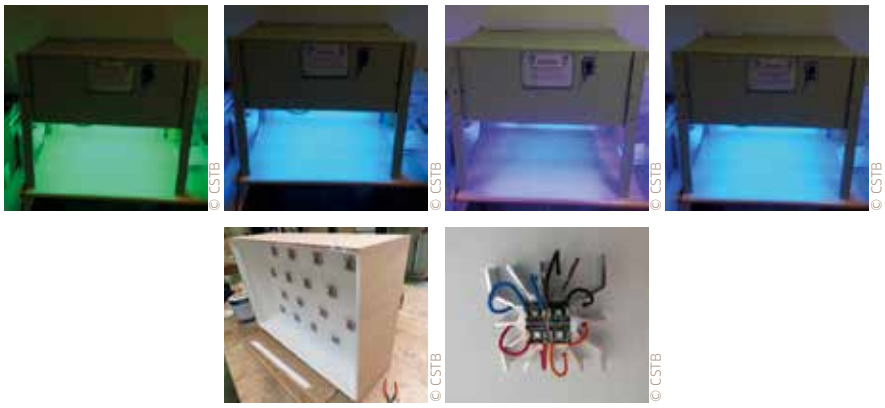
EXPÉRIENCE *IN VIVO*

Une expérimentation sur le rat a été entreprise afin de mieux comprendre les mécanismes biologiques de la toxicité rétinienne de la lumière bleue. Toutes les procédures animales ont été approuvées par le comité d'expérimentation de l'École nationale vétérinaire d'Alfort (Enva).
Le rat Wistar (Cf. Figure 2) a été employé comme modèle. L'espèce est parfois présentée comme l'organisme modèle de référence et la souche Wistar a été utilisée en ophtalmologie depuis sa création [5].
Dans le cadre du RDLB et de la DMLA, la validité du modèle demeure objet de débats [8]: l'animal est nocturne, albinos, sans macula et ses mécanismes de réparation rétiniens sont moins performants que chez l'homme. Les sites primaires de la DMLA (EPR, membrane de Bruch et choroïde) restent toutefois bien représentés et il est plus facile de travailler avec le rat qu'avec d'autres animaux (par exemple le macaque).
Des mâles âgés de six semaines libres de se déplacer dans leurs cages ont été exposés jusqu'à dix-huit heures à l'aide du dispositif présenté dans la figure 3. Chaque groupe de rats a été exposé à un seul des spectres détaillés dans le tableau 1.

DOSIMÉTRIE

L'estimation des doses rétiniennes reçues par les animaux a reposé sur des mesures spectrophotométriques et sur un modèle de la vision du rat.
Des éclairements spectriques ont été mesurés dans les cages à l'aide d'un spectrophotomètre à tête diffusante. L'uniformité de l'éclairement lumineux dans le plan des yeux (donnée par le ratio $\frac{E_{v,min}}{E_{v,ave}}$) était d'environ 0,7 pour toutes les répartitions spectrales.
L'éclairement rétinien à chaque instant était dépendant de l'orientation du regard. Pour estimer la dose reçue, il a alors été considéré que:
- en moyenne, sur la durée du stimulus, un animal garde la tête orientée dans le plan moyen et le regard à l'horizontal;
- comme dans [9], la géométrie de l'œil peut être approchée par une sphère dont le diamètre est la distance focale (notée *f*).

Comme seule la surface diffusante émettait de la lumière (Cf. Figure 3),



↑FIGURE 3
Dispositif d'illumination. Les cages été placées sous une surface diffusante (haut). Au-dessus de la surface diffusante, dix-huit modules source étaient installés (bas gauche). Chaque module source était constitué de quatre LED (bas droite).

↑FIGURE 2
Rat Wistar.

	XP-E BLUE	XP-E ROYAL BLUE	NCSE119A	NCSB119
Type	DEL	DEL	DEL	DEL
Marque	Cree	Cree	Nichia	Nichia
Longueur d'onde dominante (nm)	473	449	507	473

↑TABLEAU 1
LED utilisées pour le dispositif d'illumination.

un facteur de correction de l'éclairement spectrique horizontal E_λ à l'éclairement cornéen $E_{\lambda,cor}$ a été appliqué :

$$E_{\lambda,cor}=\frac{E_\lambda}{2}\ [W/nm.m^2].$$

L'éclairement spectrique rétinien a alors été approché par [9] :

$$E_{\lambda,ret}=\tau E_{\lambda,cor}\frac{A_{cor}}{A_{ret}}\ [W/nm.m^2],$$

où τ est la transmissivité du milieu oculaire, A_{cor} l'aire illuminée de la cornée et A_{ret} l'aire illuminée de la rétine. L'aire A_{cor} a été estimée par :

$$A_{cor}=\frac{\pi d_p^2}{4}\ [m^2],$$

où d_p était le diamètre de la pupille. L'aire A_{ret} a été approchée par l'aire de l'hémisphère oculaire :

$$A_{ret}=2\pi f^2\ [m^2],$$

L'éclairement spectrique rétinien moyen a alors été estimé par :

$$E_{\lambda,ret}=\tau E_{\lambda,cor}\frac{d_p^2}{8f^2}\ [W/nm.m^2].$$

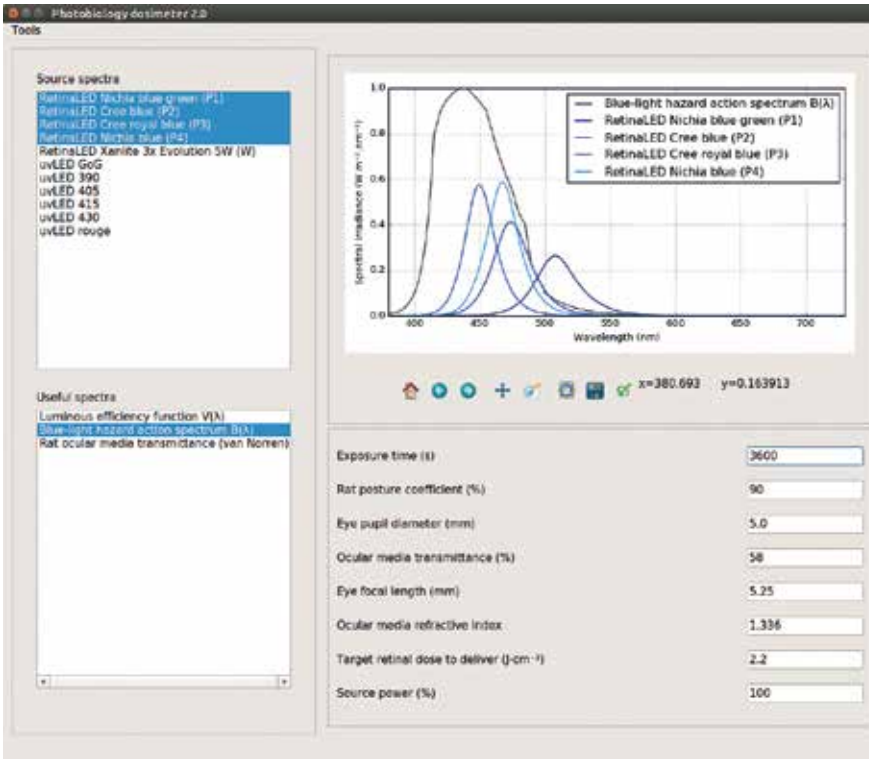
Les valeurs du diamètre pupillaire d_p, de la focale f et de la transmittivité τ ont été choisies suivant [9] (d_p =5 mm, f=5.525 mm, et τ=0.58 à 403 nm), en cohérence avec les valeurs de [3]. Il est intéressant de remarquer que des valeurs sensiblement différentes pour d_p ont été proposées dans [1] (0.4 mm ≤ d_p ≤ 1.2 mm) et [4] (d_p =0.5 mm). Une explication pourrait être la différence entre la pupille d'entrée et la pupille réelle.
L'éclairement énergétique rétinien moyen a été déduit de l'éclairement spectrique rétinien moyen par intégration numérique :

$$E_{ret}=\Delta_\lambda\sum_{i=1}^{n}E_{\lambda,ret,i}\ [W/m^2],$$

avec Δλ = 1 nm. Les doses rétiniennes ont finalement été données par :

$$D_{ret}=tE_{ret}\ [J/m^2],$$

où t est le temps d'exposition.
Bien que des incertitudes demeurent dans les doses calculées (Cf. Figures 4 et 5), en raison notamment de l'œil schématique, de l'hypothèse sur la posture des animaux et des incertitudes sur le diamètre de la pupille, les rapports de doses entre les différents spectres sont indépendants de ces paramètres et sont supposés exacts.



↑FIGURE 4
Logiciel de dosimétrie.

ANALYSES BIOLOGIQUES

Un fond d'œil a été réalisé immédiatement après le stimulus. Les rétines ont ensuite été analysées par *Western Blot*, immunofluorescence, *Terminal transferase dUTP nick end labelling* (TUNEL) et microscopie électronique à transmission [14].
L'examen macroscopique de l'œil a mis en évidence un œdème conjonctival et rétinien, sans blanchissement visible. Des mécanismes de mort cellulaire ont été détectés pour un nombre important de photorécepteurs, notamment par nécrose. Ces mécanismes sont dose-dépendants. L'existence de cette nécrose explique l'œdème rétinien, de type interstitiel, et pourrait également expliquer la présence d'une réaction inflammatoire rapide, mettant en jeu le stress oxydatif.

CONCLUSION

La recherche concernant le risque dû à la lumière bleue s'est intensifié ces dernières années en raison de l'émergence des sources LED en éclairage. Les seuils de toxicité associés aux lésions aigües sont connus [10] et la classification des sources en groupe de risque photobiologique [6] devrait permettre de se prémunir contre ce genre de risque. Les effets chroniques des faibles doses demeurent moins bien compris, de sorte que l'hypothèse qu'elles constituent un facteur de risque dans l'apparition de la dégénérescence maculaire liée à l'âge doit faire l'objet de recherches complémentaires.
Une nouvelle itération de l'expérience est en cours, fondée sur un dispositif d'illumination amélioré qui lève l'hypothèse sur la posture moyenne des animaux. ●

Quantities	Units	RetinaLED Nichia blue green (P1)	RetinaLED Cree blue (P2)	RetinaLED Cree royal blue (P3)	RetinaLED Nichia blue (P4)
▾ Source					
Irradiance (horizontal)	W·m⁻²	11.4	15.6	17.7	19.5
Radiance	W·sr⁻¹·m⁻²	3.62	4.98	5.63	6.2
Illuminance (horizontal)	lx	4.06e+03	1.69e+03	639	1.47e+03
Luminance	cd·m⁻²	1.29e+03	537	203	468
BLH-weighted irradiance (horizontal)	W·m⁻²	1.34	8.06	15.1	12.3
BLH-weighted radiance	W·sr⁻¹·m⁻²	0.427	2.56	4.81	3.92
▾ Settings					
Exposure	s	3.6e+03	3.6e+03	3.6e+03	3.6e+03
Posture	%	90	90	90	90
Pupil diameter	m	0.005	0.005	0.005	0.005
Ocular media transmittance	%	58	58	58	58
Focal length	m	0.00525	0.00525	0.00525	0.00525
Ocular refractive index	1	1.34	1.34	1.34	1.34
Dose to deliver	J·m⁻²	2.2e+04	2.2e+04	2.2e+04	2.2e+04
Source power	%	100	100	100	100
▾ Areas					
Eye	m²	0.000346	0.000346	0.000346	0.000346
Cornea	m²	1.96e-05	1.96e-05	1.96e-05	1.96e-05
Irradiated retina	m²	0.000173	0.000173	0.000173	0.000173
▾ Eye					
▾ Irradiances					
Corneal irradiance	W·m⁻²	10.2	14.1	15.9	17.5
Retinal irradiance (Campbell 93)	W·m⁻²	4.6	6.33	7.16	7.89
Retinal irradiance (Sliney 84 & van Norren 11)	W·m⁻²	0.673	0.925	1.05	1.15
Retinal irradiance (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	W·m⁻²	0.96	1.26	1.37	1.55
▾ Retinal doses					
Retinal dose (Campbell 93)	J·m⁻²	1.66e+04	2.28e+04	2.58e+04	2.84e+04
Retinal dose (Sliney 84 & van Norren 11)	J·m⁻²	2.42e+03	3.33e+03	3.77e+03	4.15e+03
Retinal dose (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	J·m⁻²	3.46e+03	4.55e+03	4.92e+03	5.59e+03
▾ Photometric					
Corneal illuminance	lx	3.68e+03	1.52e+03	575	1.32e+03
Retinal illuminance (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	lx	0.503	0.203	0.0742	0.175
Retinal dose (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	lx·s	1.81e+03	731	267	629
▾ BLH-weighted					
Corneal BLH-weighted irradiance	W·m⁻²	1.21	7.25	13.6	11.1
Retinal BLH-weighted irradiance (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	W·m⁻²	0.503	0.203	0.0742	0.175
Retinal BLH-weighted dose (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	J·m⁻²	1.81e+03	731	267	629
▾ Illumination					
Exposure time to achieve 2.2e+04 J·m⁻² (Sliney 84 & van Norren 11 w. spectral transmittance)	s	2.29e+04	1.74e+04	1.61e+04	1.42e+04

↑FIGURE 5
Doses calculées
(par heure d'exposition).

Remerciements

Les projets RetinaLED et uvLED ont été menés grâce à des collaborations entre ophtalmo-biologistes de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), vétéri-naires ophtalmologistes de l'Ecole nationale vétérinaire d'Alfort (Enva), et physiciens du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). Ils ont été financés par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

BIBLIOGRAPHIE

[1] M.T. Block., 1969. *A note on the refraction and image formation of the rat's eye. Vision Research 9(11),* pp. 705-711.

[2] Ham W. T. Jr, Mueller H. A., Sliney D. H., 1976. *Retinal sensitivity to damage from short wavelength light. Nature 260,* pp. 153-155.

[3] Hughes A., 1979. *A schematic eye for the rat. Vision Research* 19, pp. 569-588.

[4] Sliney D. H., 1984. *Quantifying retinal irradiance levels in light damage experiments. Current Eye Research 3(1),* pp. 175-179.

[5] Clause B. T., 1993. *The Wistar rat as a right choice: Establishing mammalian standards and the ideal of a standardized mammal. Journal of the History of Biology 26,* pp. 329-349.

[6] CIE S 009:2002. *Photobiological safety of lamps and lamp systems. European Standard* 62471.

[7] ICNIRP. 2005. *Adjustment of guidelines for exposure of the eye to optical radiation from ocular instruments: statement from a task group of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Applied Optics* 44(11), pp. 2162-2176.

[8] Zeiss C. J., 2010. *Animals as models of age-related macular degeneration: an imperfect measure of the truth. Veterinary Pathology 47(3),* pp. 396-413.

[9] Van Norren D., Gorgels TG., 2011. *The action spectrum of photochemical damage to the retina: a review of monochromatic threshold data. Photochemistry and Photobiology* 87(4), pp. 747-753.

[10] ICNIRP. 2013. *Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. Health Physics 105(1),* pp. 74-96.

[11] Arnault E., Barrau C., Nanteau C., Gondouin P., Bigot K., Viénot F., Gutman E., Fontaine V., Villette T., Cohen-Tannoudji D., Sahel J.A., Picaud S., 2013. *Phototoxic action spectrum on a retinal pigment epithelium model of age-related macular degeneration exposed to sunlight normalized conditions. PLoS One* 8(8).

[12] Boulenguez P., Carre S., Perraudeau M., Martinsons C., 2013. *Blue light hazard of LEDs – Comparison of the photobiological risk groups of fifteen lamps assessed using the uniform spectrum assumption and a new hyperspectral imaging method. Proceedings of the CIE Centenary Conference "Toward a new century of light",* Paris.

[13] Point S., 2014. Proposition d'une méthode d'évaluation du risque rétinien en lumière bleue associé à des luminaires d'éclairage à LEDs par imagerie monospectrale. *Radioprotection* 49(3), pp. 163-167.

[14] Jaadane I., Boulenguez P., Chahory S., Carré S., Savoldelli M., Jonet L., Behar-Cohen F., Martinsons C., Torriglia A., 2015. *Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs). Free Radical Biology & Medicine.* S0891-5849(15)00158-6.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Les sources de rayonnements électromagnétiques industrielles

Philippe Demaret INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Si la plupart des sources de rayonnement électromagnétique émettent des niveaux de champs de faible intensité, certaines applications industrielles peuvent produire des champ électriques et/ou magnétiques d'intensité élevée. Cet article présente les principales familles de machines industrielles sources de champs électromagnétiques, en fonction des fréquences de rayonnement émis et du niveau de champ généralement mesuré.

Dans nos sociétés modernes, nous sommes tous exposés à des champs électriques et magnétiques dont les origines sont essentiellement des sources artificielles telles que des appareils électriques, des équipements de radiodiffusion, de communication, etc. La majorité de ces sources de champs électromagnétiques peuvent se trouver aussi bien dans le cercle privé que sur le lieu de travail. Elles produisent généralement des niveaux de champ très faibles de telle sorte que la plupart des activités sont peu susceptibles de donner lieu à des expositions supérieures aux valeurs déclenchant l'action (VA) fixées par la directive européenne 2013/35/UE [1].

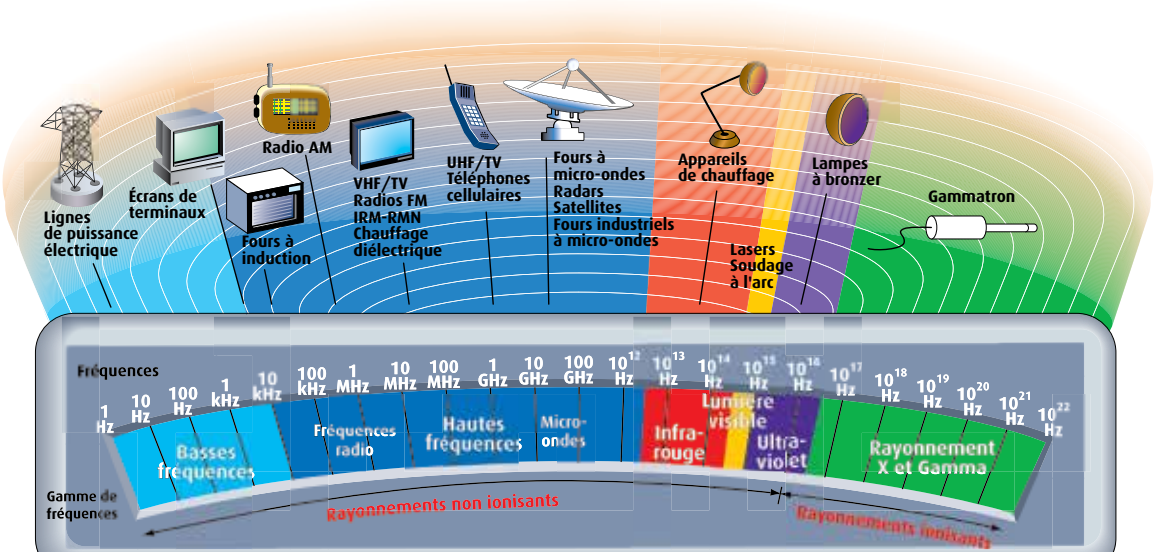
Cependant, certaines applications industrielles qui utilisent des tensions et/ou des courants élevés sont susceptibles d'émettre des niveaux de champ électrique et/ou magnétique importants. Elles doivent faire l'objet, de la part des entreprises, d'une évaluation plus approfondie si des salariés sont susceptibles d'être soumis à ces champs électromagnétiques.
L'objectif de cet article est de permettre aux employeurs de repérer ces équipements particuliers.

LES FAMILLES D'ÉQUIPEMENTS INDUSTRIELS

Les applications industrielles et domestiques des champs électromagnétiques sont nombreuses et peuvent être classées en fonction de la fréquence du rayonnement émis (Cf. Figure 1). Les applications industrielles peuvent être réparties en six familles (Cf. Tableau 1). Ce classement a été réalisé en fonction de la fréquence du rayonnement électromagnétique émis à l'exception de la famille des télécommunications qui regroupe des applications dans quasiment toutes les fréquences.

Famille « statique »

Les machines industrielles qui entrent dans cette famille sont généralement équipées d'aimants statiques puissants ou mettent en œuvre des courants électriques continus de forte intensité. Ce type d'application se rencontre dans les secteurs de la fabrication d'aimants statiques, mais également dans les centres d'usinage à grande vitesse. Les cuves à électrolyse utilisées pour la préparation industrielle de l'aluminium (Cf. Figure 2), le dépôt de métal sur des objets (chromage, cuivrage, étamage, etc.), la fabrication de gaz, etc., sont des machines alimentées par des sources de courants élevés de plusieurs dizaines de milliers d'ampères. L'induction magnétique mesurée dans les ateliers où sont utilisées des cuves à électrolyse est de l'ordre de quelques dizaines de milli-teslas (mT). Elle est généralement inférieure à la valeur limite d'exposition (VLE) la plus sévère définie par la directive européenne 2013/35/UE (VLE = 2000 mT), mais dépasse les valeurs limites concernant le risque d'attraction et de projection d'objets ferromagnétiques



© Atelier F. Causse pour l'INRS

↑FIGURE 1
Le spectre électromagnétique.

(3 mT) ou d'interférence avec des dispositifs actifs implantés tels que des stimulateurs cardiaques (0,5 mT).
Dans les laboratoires de recherches et les hôpitaux, les appareils à résonance magnétique nucléaire (RMN) ou imagerie par résonance magnétique (IRM) mettent en œuvre des électro-aimants à supraconducteurs qui génèrent des inductions magnétiques statiques supérieures à 10000 mT au cœur du système. La directive 2013/35/UE permet ces cas exceptionnels. Elle stipule dans son article 10 que, pour ces équipements, « *l'exposition peut dépasser les VLE si elle est liée à l'installation, à l'essai, à l'utilisation, au développement, à l'entretien d'équipements d'imagerie par résonance magnétique (IRM) destinés aux soins aux patients dans le secteur de la santé ou si elle est liée à la recherche dans ce domaine, pour autant que certaines conditions soient remplies…* » [1].

Famille « très basses fréquences » ou « *Extremely Low Frequencies* (ELF) »

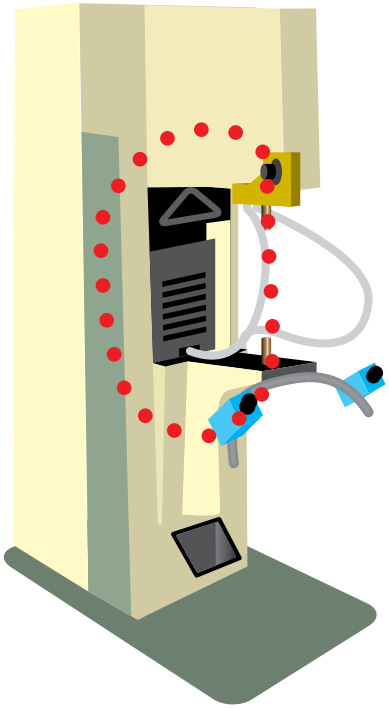
Elles concernent deux types d'applications: la distribution d'électricité et le soudage électrique.
Les ELF (*Extremely Low Frequencies*) sont les fréquences correspondant au réseau d'alimentation général de l'électricité domestique et industrielle. La fréquence de distribution est de 50 Hz en Europe et de 60 Hz en Amérique du Nord. La distribution de l'électricité se fait au moyen de lignes à haute-tension, de transformateurs et de lignes basse-tension (380 V ou 220 V). Sur les pylônes, le champ électrique peut atteindre des valeurs supérieures à 10 kV/m (donc supérieure à la VA de 10 kV/m définie par la directive 2013/35/UE) et le champ magnétique peut dépasser 1000 µT (donc supérieur à la valeur basse déclenchant l'action de 1000 µT définie par la directive 2013/35/UE). Ces valeurs décroissent rapidement sitôt qu'on s'éloigne de la ligne. Au sol, sous les lignes, elles ne sont plus que de l'ordre de 2 à 8 kV/m pour le champ électrique et de 20 à 100 µT pour l'induction magnétique.
Les équipements de soudage électriques susceptibles d'émettre des rayonnements électromagnétiques à la fréquence de 50 Hz sont nombreux. Le plus fréquemment rencontré est le soudage par résistance. Le soudage par résistance ou soudage par points (pinces et presses) utilise des courants très élevés (plusieurs kA). Parfois, l'induction magnétique créée par ces procédés se distribue à la fois sur la fréquence fondamentale du courant (50 Hz) et sur ses nombreuses fréquences harmoniques.

↓TABLEAU 1
Les familles d'applications industrielles des champs électromagnétiques.

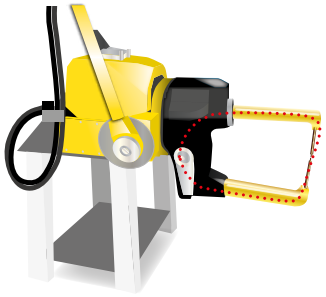
	FAMILLE	GAMME DE FRÉQUENCES	APPLICATION INDUSTRIELLE
1	Statique	0 Hz	Électrolyse
2	Très basses fréquences ELF: *Extremely Low Frequency*	50 – 60 Hz	Distribution d'électricité Soudage par résistance
3	Moyennes fréquences	50 Hz à plusieurs MHz	Induction
4	Radiofréquences	Quelques MHz	Chauffage par pertes diélectriques
5	Hyperfréquences	2,45 GHz	Micro-ondes
6	Gamme très large	Très variable	Télécommunications

© INRS

↑FIGURE 2
Cuve d'électrolyse pour l'étamage de tôles: vue des amenées de courant.



↑FIGURE 3
Presse de soudage par résistance sur châssis fixe.



↑FIGURE 4
Pince de soudage par points à transformateur intégré.

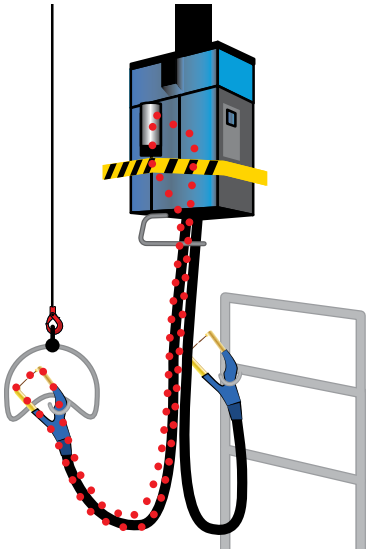


FIGURE 5→
Pince de soudage par points à transformateur déporté.

L'exposition à proximité de ce type d'équipement peut être importante, particulièrement dans l'axe perpendiculaire à la boucle de courant (en général sur le côté de la soudeuse) et dépasser les VA réglementaires.
Dans le cas des soudeuses par résistance sur châssis fixe (Cf. Figure 3), l'exposition au poste de travail dépasse la VA fixée par la directive européenne dans 35% des cas (mesurés lors d'une campagne Carsat/Cramif/INRS). Pour les pinces de soudage par résistance à transformateur intégré (Cf. Figure 4), les mesures ont montré que le champ magnétique le plus important se trouvait au droit du transformateur et du point de contact entre les électrodes. L'exposition des opérateurs dépasse la VA dans presque 45% des cas contrôlés. Dans la mesure du possible, l'opérateur devra se tenir à l'endroit où l'induction magnétique est la plus faible, à savoir derrière le transformateur. Pour les pinces à transformateur déporté (Cf. Figure 5), le champ le long du câble peut être important, et donc exposer fortement l'opérateur. L'exposition des opérateurs dépasse la VA dans plus de 60% des cas contrôlés. Dans la mesure du possible, l'opérateur devra éviter tout contact avec le câble d'amenée du courant dans les électrodes (câble sur l'épaule, entre les jambes…) et devra éviter de se tenir dans la boucle formée par le transformateur, le câble et la pince de soudage.

Famille « moyennes fréquences »
Cette famille regroupe toutes les machines mettant en œuvre le procédé d'électrothermie par induction. Celui-ci repose sur le principe suivant: tout corps conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une tension électrique induite, à l'origine d'un courant électrique producteur de chaleur par effet joule.
Ces machines travaillent dans la gamme des moyennes fréquences comprises entre 50 Hz et plusieurs MHz. Cette gamme de fréquences est aussi employée pour des détecteurs de métaux (aéroports) et certains portiques antivol.
Dans les applications d'induction, les puissances utilisées sont généralement

© INRS

FIGURE 6
Inducteurs pour le chauffage de pièces avant brasage.

© INRS

FIGURE 7
Creuset en fonderie.

© INRS

FIGURE 8
Presse de formage du bois.

de l'ordre du kW, voire du MW. Les secteurs d'activité concernés sont:

- l'industrie sidérurgique et le travail des métaux: fusion et affinage métallique dans des fours à canal ou à creuset, purification de certains matériaux tels les semi-conducteurs, recuit et formage de certains aciers, traitement de surface des métaux pour une trempe superficielle, soudage et brasage de précision en orfèvrerie (Cf. Figures 6 et 7);
- l'industrie électronique: dégazage de certaines pièces telles les électrodes des tubes électroniques, création de plasma pour le travail de certaines pièces ou le perçage de céramiques, fusion pour l'affinage des microcristaux tels le germanium ou le silicium.

Le champ magnétique est très variable d'une application à l'autre. Il peut être très élevé à proximité immédiate de l'inducteur et, au poste de travail, les VA sont dépassées pour 40% des mesures effectuées.

Famille « radiofréquences »

Cette famille regroupe les machines de chauffage par pertes diélectriques qui mettent en œuvre des fréquences de quelques MHz. Ce type de chauffage est fondé sur le principe suivant: tout matériau diélectrique (isolant) placé dans un champ électrique se charge électriquement. Si le champ est alternatif, les inversions répétées de charge s'accompagnent de pertes qui se transforment en chaleur.

Les fréquences d'inversion doivent être élevées, généralement entre 3 MHz et 3 GHz. Dans l'industrie, la fréquence ISM (industrie, scientifique, médicale) autorisée la plus couramment rencontrée est 27,12 MHz, mais on trouve aussi des fréquences de 6,78; 13,56 ou 40,68 MHz.

Les secteurs d'activité dans lesquels est utilisé ce type d'équipement sont:

- le travail du bois (Cf. Figure 8):
  - traitement des bois pour le séchage ou le formage des pièces de bois,

© INRS

FIGURE 9
Presse de soudage HF du plastique.

© INRS

FIGURE 10
Four à micro-ondes industriel pour la décongélation de viande.

TYPE D'ÉMISSION	FRÉQUENCES
Radiophonie	Bande FM de 88 à 108 MHz
Télévision	VHF de 30 MHz à 300 MHz UHF de 300 MHz à 3 GHz
CB Talkie-walkie	27 et 400 MHz
Téléphone portable	900, 1 800 et 2 200 MHz
Satellite	Quelques GHz
Radar	Quelques GHz

↑TABLEAU 2
Exemple de fréquences de différentes applications de télécommunication.

  - collage des bois pour la fabrication des contreplaqués, agglomérés et autres panneaux laminés;
- les industries des textiles, la papèterie, l'industrie des plastiques (Cf. Figure 9):
  - séchage, découpage et formage des produits textiles et papetiers,
  - formage, découpage, moulage et soudage des matières thermoplastiques.

Le champ électrique peut être très élevé à proximité de l'applicateur (électrode). Il dépasse la VA de 61 V/m fixée par la directive européenne dans plus de 40% des cas pour l'ensemble des mesures. Pour certains types de fabrication (soudage de bâches), le pourcentage de dépassement peut être supérieur à 60%. Il décroît très rapidement avec l'éloignement par rapport à la source.

Famille hyperfréquences

Le chauffage par micro-ondes est obtenu par l'émission d'un champ électromagnétique à la fréquence de 2,45 GHz au moyen d'une antenne (magnétron) qui met en vibration les molécules d'eau du matériau à chauffer.
Les fours industriels à micro-ondes sont utilisés, par exemple, dans:

- l'industrie agroalimentaire pour la décongélation d'aliments, le déparasitage des céréales et autres produits agricoles;
- l'industrie du caoutchouc pour la vulcanisation ou le moulage (Cf. Figure 10).

Le champ électromagnétique est intense à l'intérieur des enceintes blindées où est placé le matériau à chauffer. Ce type d'émission est facile à confiner. Il faut toutefois être prudent au niveau des ouvertures (entrées et sorties d'un tunnel, par exemple).
Les valeurs du champ électrique mesurées à proximité de ces installations sont généralement inférieures aux VA fixées par la directive (VA = 140 V/m à 2,45 GHz). Des dépassements ont été relevés pour presque 20% des mesures effectuées. À chaque fois, ces mesures avaient été faites en des points très proches des parois du four (d < 0,5 m).

Famille « Télécommunications »

Cette famille regroupe tous les moyens de télécommunication: les émissions de radiodiffusion, de télédiffusion, la CB, la téléphonie mobile, la télémesure, le radiobalisage, les transmissions satellitaires et les radars civils ou militaires.

Pour en savoir +

- Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Champs alternatifs de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz. INRS, *Hygiène et sécurité du travail*, ND 2143.
- Dossier « Champs électromagnétiques » sur www.inrs.fr
- Fiches « Champs électromagnétiques ». INRS, Série ED 4200 à 4219.

Les fréquences sont très variables. Quelques exemples sont présentés dans le tableau 2.
Pour ces équipements, les zones où le niveau de champ électromagnétique est susceptible de dépasser les VA sont généralement matérialisées afin d'éviter une surexposition.

CONCLUSION

Les applications susceptibles d'émettre des champs électromagnétiques sont très nombreuses et ne cessent de se développer. De nouvelles utilisations apparaissent régulièrement.
Les équipements industriels ont été classés en six familles en fonction des applications les plus courantes et des fréquences:

- électrolyse/IRM (statique);
- alimentation électrique (ELF);
- chauffage/soudage de matériaux conducteurs et présence d'une bobine (induction);
- chauffage/soudage de matériaux isolants et présence d'un générateur (radiofréquences);
- chauffage de produits contenant de l'eau et présence d'un magnétron (hyperfréquences ou micro-ondes);
- transmission de « données » et présence d'une antenne (télécommunications).

Les VA définies par la directive européenne 2013/35/UE sont parfois dépassées aux postes de travail. C'est pourquoi il est indispensable de réaliser une veille technologique rigoureuse des nouveaux modèles d'équipements afin d'avoir une meilleure connaissance du risque. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques). Journal Officiel du 26 juin 2013.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Évaluation de l'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques non ionisants

Bernard Démoulin Université Lille 1, groupe TELICE-IEMN, CNRS UMR 8520

Le poste de travail peut être la source de champs électromagnétiques non ionisants présentant un risque d'exposition qui doit être confronté à des seuils de tolérance officiels. Pour interpréter les phénomènes physiques sous-jacents, cet article présente différentes configurations typiques pouvant générer des courants dans le corps humain. La fréquence de ces signaux électriques indésirables joue un rôle majeur dans la dissipation de puissance *in vivo*.

En dehors des courants transitoires dus aux propriétés intrinsèques du corps humain, les phénomènes électriques affectant l'opérateur ne peuvent provenir que de sources présentes dans son environnement de travail. Ces sources sont généralement produites lors de l'apparition de tensions électriques ou de champs électromagnétiques. À ce titre, il est bien connu qu'à proximité immédiate d'une source de tension, le risque majeur vient du contact accidentel avec des pièces métalliques soumises à un potentiel électrique. Le contact engendre des courants de conduction dont il faut s'efforcer d'évaluer l'amplitude pour les confronter au seuil de tolérance. De même, la génération des courants dans le corps peut provenir de l'influence magnétique ou électrique due aux champs régnant à proximité de la source: on parle alors de courants induits. Si l'exposition aux contacts ou aux champs s'avère permanente et s'il est admis que les sources produisent des signaux variant dans le temps sous une période T, leur fréquence f (Hz), inverse de la période, jouera un rôle déterminant sur l'établissement des courants dans le corps et autres mécanismes physiques.

La valeur de la fréquence d'exposition conduit à subdiviser les phénomènes selon divers critères. À une fréquence de 0 Hz, on parle de régime statique. Les sources de tensions sont continues, c'est-à-dire invariantes dans le temps, et elles ne concernent que les stimulations par contact. À ce premier cas s'ajoutent les sources d'énergie électrique délivrée à la fréquence industrielle de 50 Hz. Bien que très proches des effets engendrés par les tensions continues, l'émission de tensions sous une fréquence aussi basse peut tout de même produire des inductions extérieures, causées par le couplage entre le travailleur et l'environnement proche. À l'induction extérieure se superpose une induction interne agissant directement sur le corps humain. Ces deux phénomènes cohabitent jusqu'aux fréquences de quelques MHz. Enfin, aux fréquences plus élevées dépassant quelques dizaines de MHz, les temps de propagation des champs et des courants ne peuvent être ignorés: l'induction sera alors gouvernée par le concept d'onde électromagnétique. L'analyse exposée par la suite est restreinte aux mécanismes où sont successivement dissociées les stimulations par induction externe, par induction interne et par immersion dans les ondes électromagnétiques.

STIMULATION PAR INDUCTION EXTERNE

La configuration illustrée à la figure 1 représente typiquement l'alimentation en énergie d'une voie ferrée électrifiée, la charge étant assimilée

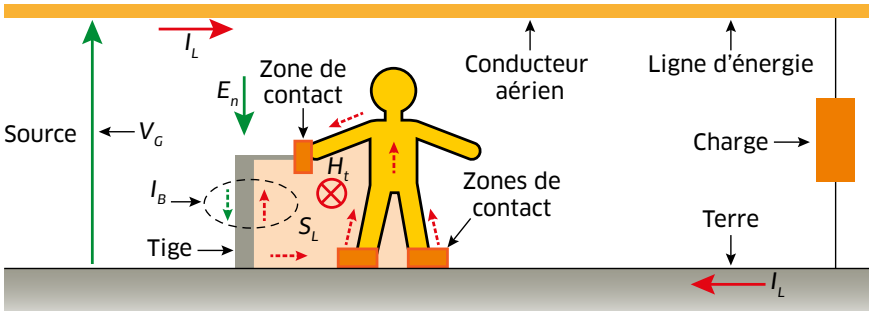


FIGURE 1
Illustration d'une stimulation par induction externe.

à une locomotive. Une ligne d'énergie électrique est positionnée parallèle au sol. Le conducteur aérien est soumis à une différence de potentiel V_G(V) dont l'amplitude est rapportée au sol. À l'extrémité opposée prend place une charge branchée entre le conducteur et le sol. La source de tension V_G engendre le courant I_L(A) orienté suivant la flèche portée sur le conducteur, le courant retourne vers la source de tension par le sol. Dans la présente application, la source de tension V_G pourra largement dépasser la fréquence de 50 Hz pour atteindre une dizaine de MHz.

Un observateur localisé sous la ligne sera soumis au champ magnétique produit par le courant de charge I_L ainsi qu'au champ électrique engendré par la tension V_G. Le courant de charge I_L engendre un champ magnétique H_t(A/m) perpendiculaire au conducteur aérien et au plan de coupe du schéma symbolisé par la flèche rouge. Inversement, à la tension V_G on peut joindre le champ électrique E_n(V/m) désigné par la flèche verte pointée vers le sol. Les directions imposées au champ magnétique et au champ électrique résultent de conventions édifiées par l'électrocinétique. Imaginons maintenant que l'observateur entre en contact avec une tige métallique enfoncée dans le sol. La source produisant une tension de fréquence basse f = 50 Hz, cet observateur sera principalement soumis à des courants induits I_B (flèches pointillées rouges et vertes) générés par induction extérieure. Il convient alors d'analyser séparément et de manière qualitative le lien entre I_B et l'exposition aux champs H_t et E_n.

Induction produite par le champ magnétique H_t

Le champ magnétique H_t engendre un flux magnétique au travers la surface S_L décrite par la zone ombrée de la figure 1, c'est-à-dire la boucle formée par le contact du bras de l'observateur avec la tige métallique. Il peut être montré que le flux induit une tension et que la tension donne naissance aux courants matérialisés sur le schéma par les flèches pointillées de couleur rouge. L'amplitude des courants va évidemment dépendre de l'amplitude de H_t, donc du courant I_L généré par la charge de la ligne. Les courants vont également dépendre de la résistance du corps humain et surtout des résistances de contacts marquées sur le schéma par les rectangles jaunes. La forme de la boucle de surface S_L intervient aussi sur l'amplitude des courants. D'autre part, la fréquence de la tension V_G agit fortement sur le mécanisme d'induction, car à l'approche d'une centaine de kHz, on observe un effet grandissant de la surface et de la forme de la boucle, cette propriété justifiant d'ailleurs l'usage du terme induction extérieure.

Induction produite par le champ électrique E_n

En ce qui concerne l'induction produite par le champ électrique, les choses sont bien plus simples. En effet, la tige métallique entrant en contact avec le sol est portée au même potentiel que la terre. L'observateur est donc naturellement protégé de l'influence de E_n, car le courant induit par E_n (pointillés verts) sera principalement dérivé par la tige métallique. Il faut toutefois tempérer cette conclusion, puisque dans l'hypothèse du foudroiement de la ligne, l'amorçage d'un arc électrique entre le conducteur aérien et la tige métallique serait certainement fatal pour l'observateur.

STIMULATION PAR INDUCTION INTERNE

Faisons maintenant abstraction de la tige métallique. Sous ces nouvelles conditions d'exposition aux champs H_t et E_n, la stimulation ne peut venir que des inductions internes où interviennent directement l'interaction des champs avec le milieu conducteur constituant le corps humain. La taille L_B de l'observateur et l'envergure D_B du thorax contribuent de manière décisive à l'induction des courants. La figure 2 résume la stimulation par induction interne.

Pour faciliter la compréhension

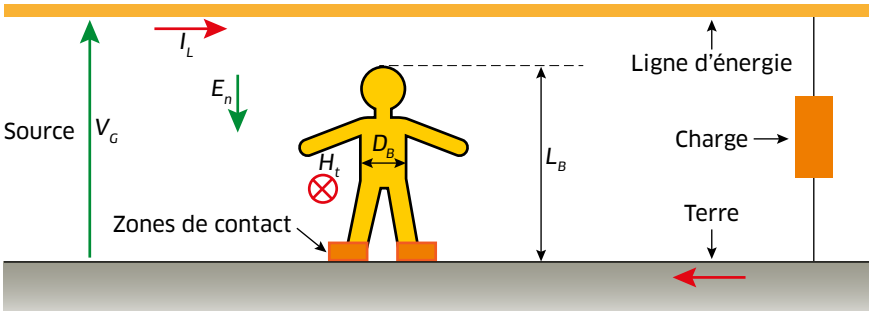


FIGURE 2
Influence engendrée par la ligne lors des mécanismes d'induction interne.

physique, le corps sera assimilé à un conducteur cylindrique de diamètre D_B et de hauteur L_B. Sous cette simplification, on montre que l'induction optimale engendrée par le champ magnétique est procurée par une orientation du cylindre parallèle à la direction de H_t. Cela équivaut à un observateur positionné à l'horizontale et perpendiculaire au conducteur aérien. Inversement, l'interaction optimale avec le champ électrique demeure dans la position verticale de l'observateur. Analysons maintenant ces deux interactions.

Interaction exercée par le champ magnétique H_t

La figure 3 décrit très sommairement l'interaction du champ magnétique avec le conducteur cylindrique assimilé au corps humain en position horizontale, condition la plus sévère. Le champ magnétique H_t engendre dans le tronc de l'observateur un flux générateur du courant I_B décrivant dans le cylindre des parcours circulaires. L'amplitude des courants est cette fois dépendante de paramètres propres au corps humain, notamment la conductivité électrique moyenne mentionnée sur le schéma par le symbole σ_B(S/m) et les paramètres géométriques D_B et L_B.

Interaction avec le champ électrique E_n

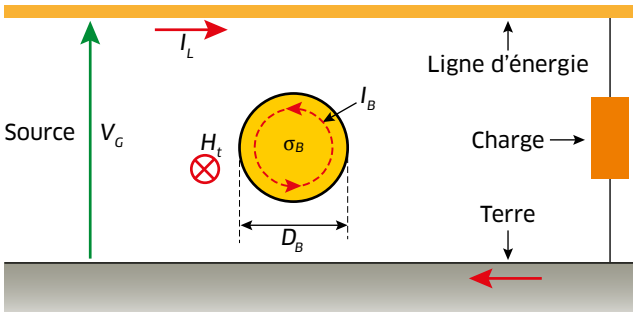
L'observateur soumis à l'interaction du champ électrique E_n est donc assimilable à un cylindre conducteur entrant en contact avec la surface du sol (la figure 4 en illustre le contexte).

L'interaction du champ électrique fait immédiatement penser à la tige métallique enfoncée dans le sol telle qu'illustrée à la figure 1. Les choses sont toutefois plus complexes, car le cylindre de diamètre D_B et de dimension longitudinale L_B se comporte comme une antenne réceptrice constituée d'un milieu non métallique dont la conductivité électrique σ_B est près de cent mille fois inférieure à celle de l'acier. Dans le processus d'interaction du champ électrique, l'analyse physique montre que deux mécanismes cohabitent. Dans un premier temps, en considérant que le contact avec le sol est de bonne qualité, le champ E_n engendre le courant I_B orienté conformément à la figure 4. La répartition verticale du courant répond alors approximativement au profil de la zone ombrée en couleur verte. Le second mécanisme a pour cause les phénomènes de propagation des champs et des courants. La notion de longueur d'onde sommairement développée au-dessous devrait apporter quelques éclaircissements.

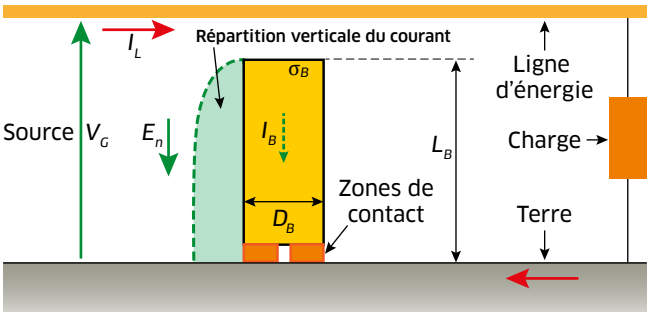
Notion de longueur d'onde

Jusqu'alors, il était admis que les champs et les courants s'établissent instantanément. En réalité, tout phénomène électrique se propage à une vitesse très élevée. Par exemple, un champ électrique ou magnétique, prenant naissance dans le vide (ou dans l'air) dégénèrent en une onde qui se propage avec une vitesse très proche de celle de la lumière estimée à $c = 3.10^8$ m/s. De cette propriété étendue aux variations cycliques de fréquence $f = 1/T$, il ressort que les champs parcourent dans l'espace et durant la période T, la distance λ donnée par le produit $\lambda = cT$. Pour cette raison, λ désigne la longueur d'onde. Ainsi, des champs animés d'une fréquence de 1 MHz possèdent pour longueur d'onde $\lambda = 300$ m. Ce chiffre, très supérieur à la taille L_B de l'observateur, signifie que, sous cette fréquence, les phénomènes d'induction demeurent quasi instantanés et que les exemples qui précèdent sont corrects. Par contre, des champs animés d'une fréquence cent fois plus élevée, soit f = 100 MHz, procurent une longueur d'onde de valeur cent fois plus faible, soit $\lambda = 3$ m. À 100 MHz, la taille d'un adulte correspond donc à une fraction de longueur d'onde: la durée de la propagation des champs intervient aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur du cylindre assimilé au corps humain.

Examinons tout d'abord l'action du champ électrique E_n à l'extérieur du cylindre. De ce point de vue, l'objet se comporte comme une antenne réceptrice. Des calculs, qui ne seront pas développés ici, montrent qu'en présence de champs extérieurs de fréquences suffisamment élevées, on peut atteindre des conditions pour lesquelles les courants générés sont les plus élevés. Ainsi, il a été démontré que pour une fréquence telle $\lambda/4 = L_B$, soit 41 MHz pour un observateur de taille $L_B = 1{,}8$ m, on obtient le courant d'amplitude maximal. Si l'on accroît la fréquence jusqu'à obtenir $3\lambda/4 = L_B$, un autre pic



↑FIGURE 3
Illustration de l'induction interne due au champ magnétique.



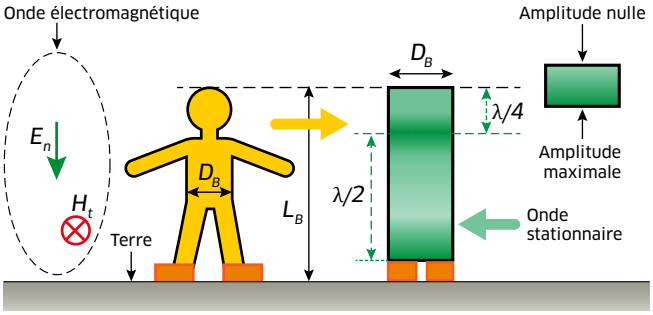
↑FIGURE 4
Illustration de l'induction interne due au champ électrique.

de courant se produit à 124 MHz, et ainsi de suite.
Le second mécanisme étroitement lié à l'induction s'exprime par la dissipation de puissance due aux courants I_B engendrés dans le corps humain. Cette puissance dissipée est convertie sous la forme d'un rayonnement thermique. Les analyses théoriques montrent qu'au même titre que l'induction interne, les phénomènes de propagation gouvernent partiellement les pertes thermiques et qu'elles augmentent de manière drastique avec l'accroissement de la fréquence. Ainsi, aux fréquences approchant ou dépassant 100 MHz, on constate que les interactions produites par le champ électrique et le champ magnétique ne peuvent plus être dissociées. Il est alors plus commode d'imaginer l'observateur exposé à l'interaction d'une onde électromagnétique globale, dont la fréquence est cependant bien trop faible pour engendrer une ionisation du matériel cellulaire.

STIMULATION PAR UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Revenons sur une émission produite à la fréquence de 124 MHz. Cela correspond à une longueur d'onde de $\lambda = 2{,}42$ m, c'est-à-dire légèrement supérieure à $L_B = 1{,}80$ m. La figure 5 décrit l'onde stationnaire établie par le courant I_B et par le champ intérieur au cylindre de conductivité modérée σ_B.
Les amplitudes nulles et maximales sont établies par les zones allant du vert pâle au vert soutenu. Les maximums et les zéros sont espacés d'une demi-longueur d'onde, soit $\lambda/2 = 1{,}21$ m. Sachant que la conductivité électrique σ_B est homogène, la dissipation maximale de puissance engendrée par le courant I_B se manifestera sur les ventres de courant, donc sur les zones en vert soutenu. La puissance dissipée sera convertie sous forme thermique. Cependant, aux fréquences supérieures à 100 MHz, la dissipation d'énergie due aux courants induits I_B se superpose à d'autres phénomènes

FIGURE 5→
Illustration de l'interaction du corps humain avec une onde électromagnétique (accordé sur la seconde résonance quand $L_B = 3\lambda/4$).



thermiques engendrés par l'oscillation forcée des molécules d'eau, comme lors de la cuisson par micro-ondes. Heureusement, l'interaction avec les champs rencontrés au poste de travail mettent en jeu des puissances bien plus faibles, mais toutefois comparables ou supérieures aux puissances développées par les courants induits.

ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

Les exemples fournis dans cet article montrent bien le rôle important joué par la fréquence : en conséquence, l'évaluation de l'exposition du corps humain doit impérativement en tenir compte. Les mécanismes d'induction extérieure illustrés dans la figure 1 et définis entre 50 Hz et une centaine de kHz, suggèrent une mesure des courants induits. Sachant que la dissipation de puissance intervient principalement dans les zones de contact du corps avec les objets extérieurs (tige métallique et sol), c'est à ce niveau qu'il convient de l'évaluer.
Pour l'induction interne illustrée dans les figures 3 et 4, la séparation des interactions produites par le champ magnétique et le champ électrique suggère une mesure indépendante des variables champ magnétique H_t et champ électrique E_n. La question de la dissipation de puissance est plus ambigüe, car partagée entre les effets de contacts et les dissipations internes par les courants induits.
Pour la stimulation par les ondes électromagnétiques telle qu'illustrée dans la figure 5, le critère d'évaluation de l'exposition peut être donné par une mesure de la puissance convertie sous forme thermique. La mesure étant très difficile à réaliser *in vivo*, il est préférable de réaliser une simulation théorique à l'aide de logiciels spécifiques, ou d'envisager des mesures sur mannequins reproduisant autant que possible les caractéristiques physiques du milieu biologique. Dans l'un ou l'autre cas, les paramètres de l'onde électromagnétique s'expriment dans la notion de densité de puissance établie par le produit $p = E_n H_t$ et prenant pour unité le W/m². Les textes officiels font également référence au concept de débit d'absorption spécifique (DAS). Le DAS qui a pour unité le W/kg prend en compte l'hétérogénéité de la masse anatomique.
Cet article est restreint aux seuls aspects qualitatifs de l'interaction des champs électromagnétiques avec le corps humain. Il peut être avantageusement complété par la consultation des documents qui précisent les définitions officielles et les seuils de tolérance évoqués en introduction (Cf. « Pour en savoir plus »). ●

Pour en savoir

- Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques de 1 Hz à 100 kHz. INRS, *Hygiène et sécurité du travail*, 222, PR47, 1er trimestre 2011.
- *IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz.* IEEE Std C95.1, 1999 Edition.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Transposition de la directive 2013/35/UE en droit français : un nouveau dispositif réglementaire dès janvier 2017

Peggy Mathieu Direction générale du travail

Patrick Moureaux INRS, département Expertise et conseil technique

La directive européenne 2013/35/UE vient d'être transposée en droit français par le décret n°2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. Dès le 1er janvier 2017, les prescriptions de ce décret, codifiées dans le Code du travail, entreront en vigueur. Décryptage des objectifs et du contenu de ce nouveau dispositif réglementaire qui vise une gestion du risque graduée selon son ampleur et sa nature.

La directive européenne 2013/35/UE du 26 juin 2013[1] fixe les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour les travailleurs exposés à des champs électromagnétiques. Elle abroge la précédente directive de 2004 non transposée par les États membres en raison des difficultés rencontrées notamment pour l'application de certaines valeurs limites d'exposition dans le secteur médical et pour certaines activités industrielles.

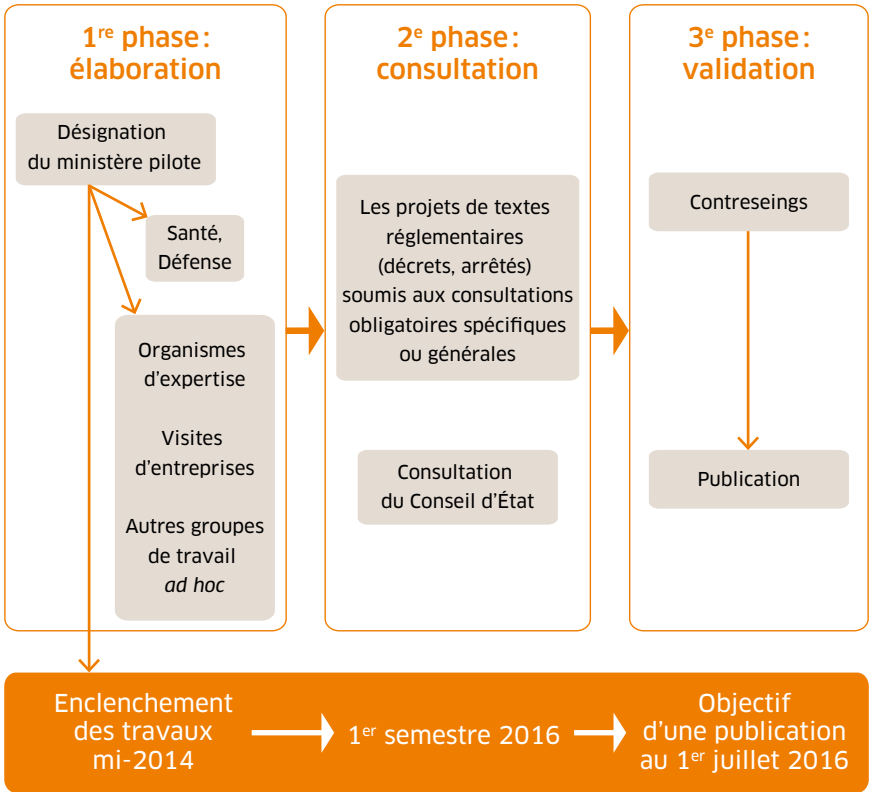
Cette directive est d'une approche complexe de par les spécificités conceptuelles qu'elle introduit, et s'appuie sur des notions de physique ardues, alors qu'elle vise un très grand nombre d'entreprises étant donnée la diversité des sources de champs électromagnétiques. Ces sources, dont certaines sont créées de fait dans le voisinage de toute installation électrique tandis que d'autres sont générées et utilisées dans de nombreuses activités telles que les procédés de fabrication, la recherche, les communications, les applications médicales, la production, le transport et la distribution d'électricité, la radiodiffusion, la navigation aéronautique et maritime et la sécurité, peuvent dans tous les cas constituer un risque pour les travailleurs et nécessitent que l'employeur l'évalue et, le cas échéant, mette en œuvre les mesures de prévention adaptées.

Le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques transpose cette directive en droit français. Les dispositions de ce décret, codifiées dans le Code du travail, entreront en vigueur dès le 1er janvier 2017. Il sera en outre complété par des arrêtés d'application.

LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROCESSUS DE TRANSPOSITION

La transposition est un acte obligatoire par lequel l'État membre insère dans des délais imposés dans son système juridique les règles de droit pour remplir les objectifs d'une directive de l'Union européenne. Cette obligation laisse cependant aux États membres la compétence quant à la forme et les moyens. Elle se traduit par l'adoption en droit français d'actes législatif (loi) ou réglementaire (décret et arrêté).

A contrario des directives économiques, en matière sociale, il convient de rappeler qu'une directive constitue un socle de prescriptions minimales que les États membres restent libres de maintenir ou de transposer plus favorablement pour atteindre l'objectif visé par le



↑FIGURE 1

Les différentes étapes de la transposition de la directive (source: Direction générale du travail).

CHAMP ET FRÉQUENCE	EFFETS SENSORIELS	EFFETS SUR LA SANTÉ
Champ magnétique statique entre 0 et 1 Hz	Vertiges, nausées, goût métallique	Modification de la circulation sanguine dans les membres et des fonctions cérébrales Modification de la fonction cardiaque
Champs à basse fréquence entre 1 Hz et 10 MHz	Phosphènes (perçus comme des taches de lumière) (variation mineure de la fonction cérébrale entre 1 et 400 Hz)	Fourmillement ou douleur (stimulation nerveuse) Contractions musculaires brèves Perturbation du rythme cardiaque
Champs à haute fréquence entre 100 kHz et 6 GHz	Effet auditifs causés par les micro-ondes pulsées entre 0,3 et 6 GHz	Échauffement excessif de tout ou partie du corps, brûlures
Champs à haute fréquence entre 6 et 300 GHz		Lésions oculaires ou cutanées localisées dues à la chaleur

NB: Les effets des champs de fréquence intermédiaire (entre 100 kHz et 10 MHz) sont une combinaison des effets des champs à basse fréquence et à haute fréquence.

↑TABLEAU

Synthèse des effets sur la santé et des effets sensoriels (source: guide européen 2015).

texte, ici la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. En l'espèce, la France a recherché l'équilibre entre les possibilités offertes par la directive et l'homogénéité du cadre réglementaire national.

Les travaux de transposition de la directive 2013/35/UE se sont déroulés en trois phases (Cf. Figure 1).

Au niveau interministériel, le secrétariat aux affaires européennes (SGAE), placé sous l'autorité du Premier ministre, a désigné le ministère chargé du travail chef de file pour la conduite des travaux de transposition, menés en collaboration avec les ministères concernés (ministères en charge de la santé, de la défense, de l'agriculture…) et avec l'appui technique des organismes et agences d'expertise (INRS, Anses, etc.).

Une fois le projet de décret finalisé, il a été procédé aux consultations obligatoires, soit, pour le ministère chargé du Travail, le Conseil d'orientation sur les conditions de travail (COCT) qui réunit les partenaires sociaux (syndicats et organisations professionnelles) ainsi que les organismes d'expertise, instituts et autorités compétentes (INRS, Anses, OPPBTP, etc.). Ont également été consultés le commissaire à la simplification (SGG), le Conseil national d'évaluation des normes (CNEN) qui sont chargés d'évaluer la juste proportionnalité des obligations qui s'appliqueront aux employeurs dont les collectivités territoriales et le Conseil d'État.

Enfin, la dernière phase a consisté à recueillir les signatures des ministres compétents, en l'occurrence la ministre chargée du Travail, le ministre chargé de l'Agriculture, et le Premier ministre, puis d'en organiser la publication au Journal officiel de la République française.

OBJECTIFS DE LA DIRECTIVE

Dans un contexte économique européen contraint, cette directive concilie les recommandations internationales scientifiques avec les situations de travail existantes en introduisant la souplesse nécessaire

ENCADRÉ

Valeurs limites d'exposition (VLE) et valeurs déclenchant l'action (VA)

VLE relatives aux effets sensoriels :
- en champ statique (0 à 1 Hz) pour éviter les effets de vertige qui peuvent survenir lorsque que l'on se déplace dans un tel champ ;
- entre 1 et 400 Hz afin de protéger contre la stimulation du système nerveux central dans la tête qui peut se traduire par l'apparition de phosphènes rétiniens ou la modification mineure passagère de certaines fonctions cérébrales ;
- entre 0,3 et 6 GHz lors d'une exposition de la tête à des rayonnements pulsés qui peuvent provoquer des effets auditifs.

VLE relatives aux effets sur la santé :
- en champ statique (0 à 1 Hz) pour éviter des modifications de la circulation sanguine dans les membres, des fonctions cérébrales ainsi que de la fonction cardiaque ;
- entre 1 Hz et 10 MHz pour éviter le risque de stimulation de tous les tissus du système nerveux central et périphérique ;
- entre 100 kHz et 300 GHz afin de protéger contre le risque d'échauffement de tout ou partie du corps.

VA entre 1 Hz et 10 MHz :
- une exposition à un champ électrique sous la VA haute garantit le respect de la VLE relative aux effets sur la santé dans toute cette bande de fréquences ainsi que le respect de la VLE sensorielle entre 1 et 400 Hz ;
- une exposition conduisant à une induction magnétique sous la VA haute assure le non-dépassement de la VLE « santé » mais des effets sensoriels peuvent survenir dans la bande de fréquence 1 à 400 Hz lorsque cette exposition reste au-dessus de la VA basse.

VA entre 100 KHz et 300 GHz :
- le respect de celles-ci assure le respect de la VLE relative aux effets sur la santé.

à la poursuite des activités dans les principaux secteurs concernés. Elle vise à garantir un niveau de protection des travailleurs satisfaisant sans pour autant faire peser de charges excessives sur les entreprises. Cette souplesse se traduit néanmoins par un système complexe de double valeur limite d'exposition (VLE) et ses corollaires de valeurs déclenchant l'action (VA), complété d'un dispositif dérogatoire. Ces dérogations, conditionnées à la mise en œuvre de mesures spécifiques, notamment l'obligation de respecter les VLE, visent des secteurs d'activité définis, forces armées et imagerie par résonance magnétique (IRM), ou des secteurs dont l'identification éventuelle est laissée à l'appréciation des États membres.

Les prescriptions de la directive 2013/35/UE sont destinées à prévenir l'ensemble des effets biophysiques connus, directs et indirects, produits par les champs électromagnétiques dans la gamme de fréquences de 0 Hz à 300 GHz. En revanche, les éventuels effets à long terme, y compris les effets cancérigènes potentiels, ne sont pas couverts par ces prescriptions du fait qu'il n'existe actuellement pas d'éléments scientifiques probants qui permettent d'établir un lien de cause à effet.

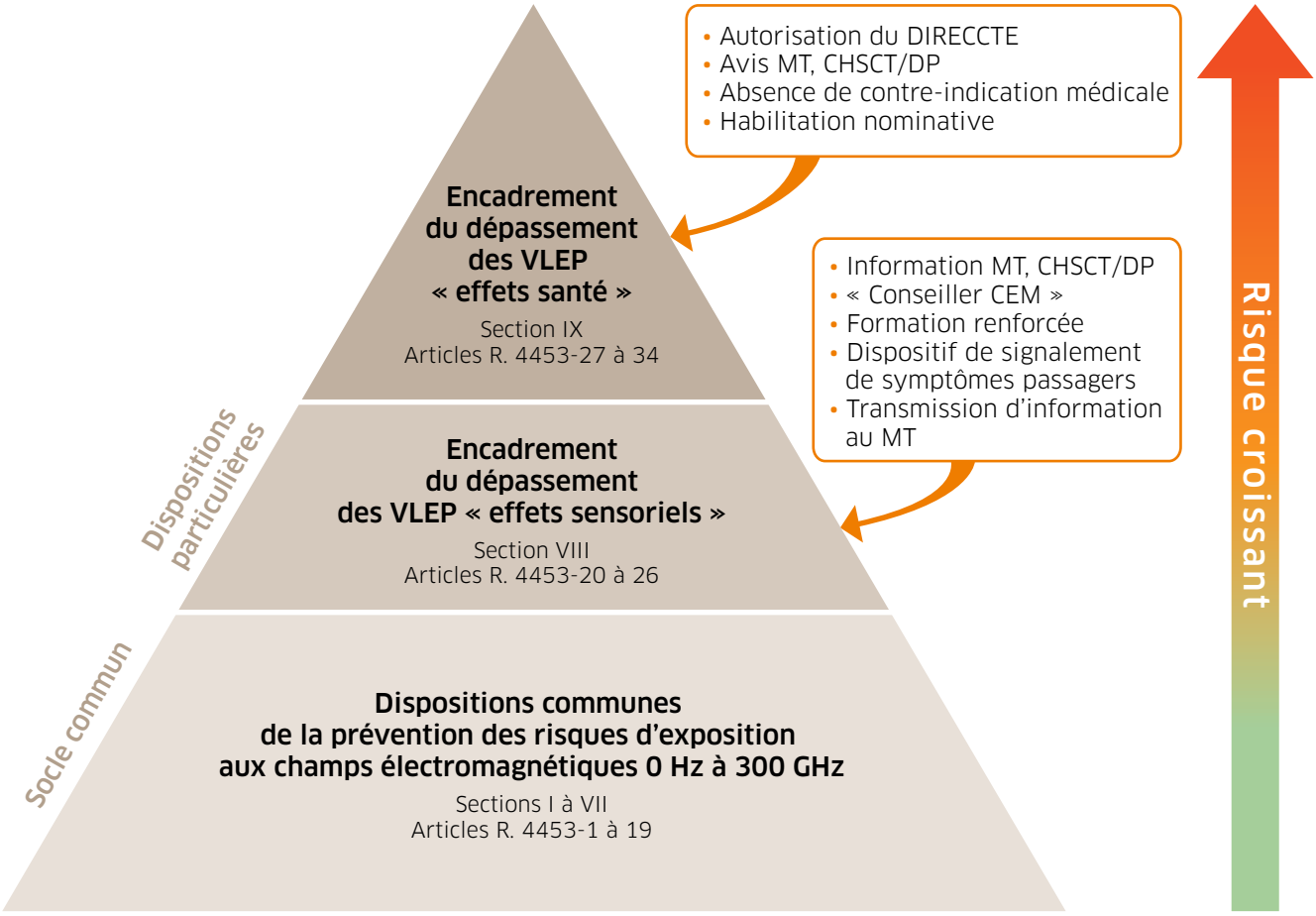
Les effets avérés sur la santé sont des effets à court terme présentant un seuil dont le niveau est variable selon la fréquence (Cf. Tableau). Afin de garantir que ces seuils ne sont jamais atteints, des VLE exprimées en champ électrique en débit d'absorption spécifique (DAS) et en intensité de courant dans le corps humain ont été établies. Il est ainsi important de noter que ces grandeurs ne sont pas directement mesurables, car internes au corps humain. En outre, les effets étant variables en fonction de la fréquence du champ à l'origine de l'exposition et selon que le champ est électrique ou magnétique, continu ou pulsé, la directive introduit deux profils de VLE (VLE relative aux effets sensoriels et VLE relative aux effets sur la santé). La démonstration du respect de la VLE ne peut donc être faite qu'au moyen de calculs ou de modélisations qui peuvent s'avérer complexes. Compte tenu de cette particularité, la directive introduit également deux profils de valeurs déclenchant l'action (VA basse et VA haute) pour assurer le respect des VLE (Cf. Encadré). Ces VA sont exprimées en champ électrique et en champ magnétique ou induction magnétique, et sont directement mesurables au poste de travail.

Des VA sont aussi fixées pour les courants de contact (courant électrique traversant le corps à la suite d'un contact avec un objet conducteur chargé par l'influence d'un champ électromagnétique) et pour les courants induits dans les mains et les bras. D'autres VA ont pour objectif de limiter et éviter les décharges d'étincelles au poste de travail. La directive a également prévu des VA en champ statique afin de se protéger du risque de projection d'objets ferromagnétiques et d'éviter les risques d'interférences avec les dispositifs médicaux actifs implantés.

Des questions techniques liées à la mise en œuvre de cette directive pouvant encore être soulevées, la Commission européenne a élaboré un « Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE » auquel renvoie la directive.

LE FIL CONDUCTEUR DE LA TRANSPOSITION

Le ministère chargé du Travail a souhaité construire un dispositif de



↑FIGURE 2

Dispositif de prévention des risques dus aux champs électromagnétiques (source: Direction générale du travail, 2016).

gestion du risque gradué selon l'ampleur et la nature du risque, accessible aux TPE/PME, qui pourront le mettre en œuvre simplement, tout en maintenant la souplesse offerte par la directive aux grandes entreprises, qui pourront utiliser des outils de modélisation élaborés et la dérogation sectorielle pour l'IRM.

Les objectifs visés lors de l'élaboration du décret étaient de:

- normaliser l'écriture des exigences attendues pour une intégration homogène dans le Code du travail. Les exigences de la directive ont été transposées selon la démarche retenue dans le Code du travail pour les autres risques professionnels;
- simplifier l'approche:
  - l'approche par objectif a été retenue pour laisser à l'employeur la responsabilité des moyens mis en œuvre pour prévenir les risques. À ce titre, les prescriptions de moyens posées dans quelques cas particuliers par la directive n'ont pas été reprises, par exemple la mise à la terre des ouvrages ou le contrôle des mouvements;
  - les VLE et les VA sont regroupées dans trois tableaux pour offrir une vision globale puisque plusieurs d'entre elles peuvent s'appliquer simultanément;
- encadrer les situations d'exposition au-delà des VLE: ces situations qui ne peuvent être que temporaires et justifiées, sont subordonnées à la mise en œuvre par l'employeur de moyens techniques et organisationnels complémentaires et au dialogue interne avec les parties prenantes (délégués du personnel, CHSCT, médecin du travail). En tout état de cause, la santé et la sécurité des travailleurs doivent toujours être garanties;
- garantir une protection adaptée des femmes enceintes et des travailleurs de moins de 18 ans:
  - l'exposition des femmes enceintes doit être maintenue à un niveau inférieur aux valeurs limites fixées pour le public aux champs électromagnétiques et, par précaution, elle est réduite au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes;
  - la liste des travaux interdits aux travailleurs de moins de 18 ans est complétée par les travaux dont l'exposition aux champs électromagnétiques est susceptible de dépasser les VLE du fait

de l'action conjuguée des risques inhérents à ce type de travaux et de la vulnérabilité du jeune;
- prendre en compte les travailleurs à risques particuliers: cette catégorie de travailleurs recouvre, notamment, les travailleurs portant un dispositif médical implanté ou non, actif ou passif, qui peut dysfonctionner ou générer un risque à des niveaux d'exposition inférieurs aux VA;
- faire évoluer les outils de l'inspection du travail en conséquence: le dispositif classique de mise en demeure et de demande de vérification est complété pour ce type d'exposition. Sa déclinaison pratique fera l'objet d'arrêtés spécifiques (mesurage, accréditation des organismes de mesures).

DÉCRYPTAGE DU NOUVEAU DISPOSITIF RÉGLEMENTAIRE

Le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 s'inscrit dans le cadre général des obligations de l'employeur en matière de santé et de sécurité des travailleurs sur les fondements des principes généraux de prévention. Il complète ce cadre de dispositions spécifiques à la gestion des risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques en insérant notamment au chapitre III du titre V du livre IV de la quatrième partie du Code du travail, les articles R. 4453-1 à 34.

Principes de prévention (article R. 4453-2)

En matière de champs électromagnétiques, l'employeur doit prendre des mesures de prévention visant à supprimer ou à réduire au minimum les risques, en tenant compte du progrès technique et de la disponibilité de mesures de maîtrise du risque à la source.

Valeurs limites (articles R. 4453-3 à 5 et R. 4152-7-1)

Les niveaux d'exposition des travailleurs doivent être comparés aux VA et VLE qui conditionnent les mesures de prévention à mettre en œuvre. Les VLE ne doivent être dépassées en aucun cas sauf dérogations particulières. On rappelle que les VA sont les niveaux d'exposition opérationnels au-delà desquels des mesures ou moyens de prévention doivent être mis en œuvre et, pour celles concernant les effets biophysiques directs, en deçà desquels les VLE sont considérées comme respectées.

Évaluation des risques (articles R. 4453-6 à 12)

Aux fins d'évaluation des risques, l'employeur doit déterminer les niveaux de champs électromagnétiques auxquels les travailleurs sont exposés, par une évaluation documentaire et, si nécessaire, par un mesurage, un calcul ou une simulation numérique.

La réglementation ouvre la possibilité d'une détermination des niveaux d'exposition par des méthodes d'évaluation simplifiées. Elle fixe également les éléments que l'employeur doit prendre en considération lorsqu'il procède à l'évaluation des risques, notamment toute incidence sur la santé et la sécurité des travailleurs de moins de 18 ans et des travailleurs à risques particuliers (femmes enceintes et travailleurs équipés de dispositifs médicaux implantés ou non, passifs ou actifs).

Pour conduire cette évaluation, l'employeur s'appuie sur le ou les salariés compétents pour s'occuper des activités de protection et de prévention des risques professionnels mentionnés à l'article L. 4644-1 du Code du travail ou, à défaut, sur l'intervenant en prévention des risques professionnels (IPRP) et les organismes (Carsat, INRS) mentionnés au même article.

Les résultats de l'évaluation des risques, ainsi que les VLE ou les VA pertinentes retenues, sont consignés dans le document unique d'évaluation des risques (DUER) et conservés sous une forme susceptible d'en permettre la consultation à une date ultérieure.

L'employeur communique les résultats de cette évaluation au médecin du travail et au CHSCT et, à défaut, aux délégués du personnel (DP).

Mesures et moyens de prévention (articles R. 4453-12 à 16)

Lorsque les résultats de l'évaluation des risques mettent en évidence la moindre possibilité de dépassements des VA ou, le cas échéant, des VLE, l'employeur détermine et met en œuvre des mesures et des moyens de prévention qui se fondent notamment sur:
- le choix d'autres procédés de travail n'exposant pas aux champs électromagnétiques ou entraînant une exposition moindre;
- le choix d'équipements de travail appropriés émettant, compte tenu du travail à effectuer, des champs électromagnétiques moins intenses;
- le choix de moyens techniques visant à réduire l'émission de champs électromagnétiques des équipements de travail;
- la modification de la conception et de l'agencement des lieux et postes de travail visant à réduire l'exposition aux champs électromagnétiques;
- le choix d'une organisation du travail visant à réduire la durée et l'intensité des expositions;
- des programmes appropriés de maintenance des équipements de travail, des postes de travail et du lieu de travail;
- la mise à disposition d'équipements de protection individuelle appropriés;
- la mise en œuvre de mesures techniques et organisationnelles visant à éviter tout risque lié aux effets indirects.

Ces dispositions ne sont pas cependant pas exigées, lorsque les trois conditions cumulatives suivantes sont remplies:
- les VA ne concernent que les effets biophysiques directs;
- l'employeur a démontré que les VLE ne sont pas dépassées;
- les risques pour la sécurité peuvent être écartés.

Les lieux de travail où l'exposition des travailleurs dépasserait les VA sont identifiés et font l'objet d'une signalisation spécifique et appropriée. Leur accès est limité s'il y a lieu. Dans le cas où l'exposition des travailleurs dépasserait les VLE, ils

© Yves Cousson pour l'INRS

↑ Les lieux de travail où l'exposition des travailleurs dépasserait les valeurs d'action doivent faire l'objet d'une signalétique spécifique.

font alors l'objet d'une restriction ou d'un contrôle d'accès.
Pour les travailleurs à risques particuliers (femmes enceintes et travailleurs équipés de dispositifs médicaux implantés ou non, passifs ou actifs), l'employeur adapte, en liaison avec le médecin du travail, les mesures et moyens de prévention.
Toute exposition accidentelle d'un travailleur, au-delà des VLE, nécessite, après la prise de mesures pour réduire l'exposition à un niveau inférieur aux VLE, l'information du CHSCT ou, à défaut, des DP ainsi que de l'agent de contrôle de l'inspection du travail en précisant les circonstances, les causes présumées et les mesures envisagées pour éviter le renouvellement de ce dépassement.

Information et formation des travailleurs (articles R. 4453-17 et 18)

L'employeur veille à ce que chaque travailleur susceptible d'être exposé à un risque lié à des champs électromagnétiques reçoive toute l'information nécessaire et une formation en rapport avec les résultats de l'évaluation des risques qu'il aura préalablement réalisée.
La réglementation fixe également un ensemble d'éléments que l'employeur doit porter à la connaissance des travailleurs, entre autres :

- les précautions à prendre par les travailleurs pour assurer la protection de leur santé et de leur sécurité et celle des autres travailleurs présents sur le lieu de travail, notamment l'importance de déclarer le plus précocement possible au médecin du travail qu'ils sont équipés de dispositifs médicaux implantés ou non, passifs ou actifs ;
- les règles particulières établies pour les travailleurs à risques particuliers.

Les postes de travail où l'exposition des travailleurs dépasserait les VA relatives aux effets biophysiques directs ou à certains effets indirects ou présentant d'autres risques d'effets indirects comportent une notice de poste destinée à informer les travailleurs des risques et des dispositions prises pour les éviter (règles de sécurité applicables et consignes relatives aux mesures de protection collective et individuelle) établies par l'employeur.

Suivi de l'état de santé des travailleurs (article R. 4453-19)

Dans le cadre de la réglementation actuelle, les travailleurs exposés à des champs électromagnétiques ne bénéficient pas d'une surveillance médicale renforcée au titre de l'article R. 4624-18 du Code du travail. En revanche, ils bénéficient d'une visite médicale lorsqu'une exposition au-delà des VLE est détectée ou lorsque le travailleur signale un effet indésirable ou inattendu sur sa santé susceptible de résulter d'une exposition à des champs électromagnétiques.

Dispositions particulières relatives à l'encadrement du dépassement des VLE (articles R. 4453-20 à 26, articles R. 4453-27 à 34 et article R. 4153-22-1)

Les situations de travail pouvant bénéficier du système dérogatoire aux dépassements des VLE sont réglementairement encadrées par un dispositif à deux niveaux (Cf. Figure 2) :

- le premier fixe les dispositions particulières et complémentaires applicables au dépassement des VLE « effets sensoriels » sans que les VLE « effets pour la santé » soient dépassées quel que soit le secteur d'activité, y compris celui disposant d'équipements d'imagerie par résonance magnétique (IRM) ;
- le second complète les précédentes dispositions établies pour le dépassement des VLE « effets sensoriels », à celles particulières au dépassement des VLE « effets pour la santé » dans le seul cas spécifique des IRM destinées aux soins des patients dans le secteur la santé ou de la recherche dans ce domaine.

Ces dispositions sont sans préjudice de celles découlant de la mise en œuvre des principes généraux de prévention, de l'évaluation des risques, des mesures et moyens de prévention, de l'information et la formation des travailleurs ou du

suivi de leur état de santé, puisque l'employeur doit démontrer l'absence d'alternative possible à exposer un travailleur au-delà de ces VLE compte tenu de la pratique de travail.
En cas d'exposition supérieure aux VLE relatives aux effets sensoriels, la réglementation impose notamment à l'employeur de :

- consigner la justification dans le DUER ;
- informer le médecin du travail et le CHSCT, ou à défaut les DP ;
- mettre en œuvre des mesures et moyens de prévention complémentaires propres à garantir la santé et la sécurité des travailleurs ;
- désigner une personne chargée d'assurer la fonction de conseiller à la prévention des risques liés aux champs électromagnétiques ;
- organiser, pour chaque travailleur concerné, une formation renforcée sur les risques, les mesures et moyens de prévention spécifiques à prendre pendant cette exposition ;
- mettre en place un dispositif permettant aux travailleurs de signaler l'apparition de tout effet sensoriel ;
- transmettre au médecin du travail, pour chaque travailleur, les informations relatives à la nature du travail, aux caractéristiques des champs électromagnétiques, aux niveaux d'exposition et, le cas échéant, les résultats des mesures, du calcul, ou de la simulation numérique ainsi que la fréquence des expositions.

En cas d'exposition supérieure aux VLE relatives aux effets pour la santé, la réglementation prévoit, en complément de ce qui précède, que l'employeur :

- demande l'avis du médecin du travail et du CHSCT, ou à défaut des DP ;
- définisse les mesures et moyens de protection appropriés garantissant la protection des travailleurs contre les effets nocifs pour la santé et les risques pour la sécurité (exposition temporaire, absence de contre-indication médicale du travailleur, délivrance d'une habilitation nominative) ;
- mette en place un dispositif permettant aux travailleurs de signaler l'apparition de tout autre effet.

En outre, l'employeur doit demander l'autorisation de dépasser les VLE relatives aux effets sur la santé au directeur régional des entreprises, de la concurrence, de la consommation, du travail et de l'emploi (Direccte). Ce dernier prend sa décision dans un délai de deux mois, après enquête de l'agent de contrôle de l'inspection du travail.
Les travailleurs de moins de 18 ans ne peuvent pas occuper des postes entrant dans le cadre de ces dispositions particulières, puisqu'il n'est pas prévu de dérogation de telles expositions à des fins de formation professionnelle.

Contrôle de la mise en œuvre des dispositions du Code du travail (articles R. 4722-21-2, R. 4722-21-3, R. 4724-17-1, R. 4724-17-2 et 4° de l'article R. 4724-18)

Comme pour les autres risques, notamment physiques (bruit, vibrations mécaniques, rayonnements optiques artificiels), l'agent de contrôle de l'inspection du travail aura la possibilité de demander à l'employeur de faire procéder à un contrôle technique des VA ou des VLE par un organisme accrédité ou, le cas échéant, par un organisme agréé.
Il convient néanmoins de signaler que si le mesurage permet de vérifier le respect des VA, leur dépassement ne signifie pas pour autant un dépassement des VLE.
Enfin, le régime des sanctions, en cas de manquement aux obligations fixées au Code du travail constaté par l'agent de contrôle, repose sur le régime de droit commun fixé à l'article L. 4741-1 du Code du travail.

CONCLUSION

Le processus d'évaluation de ce risque permet de comparer l'exposition du travailleur à la VA pertinente, directement mesurable au poste de travail, et garantissant le respect de la VLE correspondante. Cette approche protectrice, accessible et simple, est à privilégier. La réglementation n'exclut pas la possibilité de comparer l'exposition du travailleur à la VLE, mais la contrepartie de cette approche est la complexité de sa mise en œuvre.
En pratique, les situations de travail susceptibles d'exposer les travailleurs au-delà des VA sont relativement bien identifiées et ne concernent que certains types d'installations présentes principalement dans l'industrie, les secteurs de la production, du transport et de la distribution d'énergie ainsi que les télécommunications ou la radiodiffusion. Le nombre de travailleurs concernés par de tels niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques est ainsi très limité au regard du nombre de travailleurs exposés.
Afin d'aider les entreprises à réaliser leur évaluation des risques au poste de travail sans avoir recours à une expertise extérieure, des outils pratiques et simples sont déjà ou seront mis à leur disposition. Ils leur permettront d'identifier rapidement les sources de champs électromagnétiques dans un secteur d'activité donné et de statuer sur le risque en fonction du profil de travailleur exposé (porteur d'implant, femme enceinte…). De tels outils d'évaluation du risque sont mentionnés dans le guide européen de bonnes pratiques précité (voir tableau 3.2 de ce guide) ou sur le site internet de l'INRS[2].
Dans la grande majorité des cas, cette évaluation est de nature à conclure à l'absence de risque. Mais, dans les autres cas, l'employeur devra approfondir son analyse, soit en s'appuyant sur le salarié compétent qu'il aura désigné, soit en ayant recours à une expertise extérieure qui le conseillera sur les mesures de prévention et les moyens de protection à mettre en œuvre pour réduire l'exposition au poste de travail. ●

1. Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE.

2. www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/ce-qu-il-faut-retenir.html

Évaluation & prévention

Rayonnements optiques artificiels : évaluation des risques sans mesure
P. 50

Mesure des rayonnements optiques incohérents au poste de travail
P. 55

Luminaires à LED : évaluation du risque rétinien en laboratoire de fabricant
P. 60

Les moyens de prévention et de protection contre les ROA
P. 64

Équipements de protection contre les risques dus aux LED d'éclairage
P. 69

L'organisation de la prévention du risque laser au CNRS
P. 74

Comment mesurer un champ électromagnétique et évaluer l'incertitude de mesure ?
P. 77

Métrologie des champs impulsionnels basses fréquences
P. 80

Évaluation de l'exposition des travailleurs d'EDF : synthèse des mesures
P. 86

Un protocole d'intervention en entreprise pour l'évaluation simplifiée des risques liés aux rayonnements électromagnétiques
P. 90

Oseray, un outil simple pour une première estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques
P. 94

Wise, un outil d'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques
P. 98

Quelle surveillance médicale des travailleurs exposés aux champs électromagnétiques ?
P. 102

Les moyens de prévention contre les champs électromagnétiques
P. 107

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Rayonnements optiques artificiels : évaluation des risques sans mesure

Jean-Marc Deniel INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Bien que leurs effets néfastes pour la peau et les yeux soient connus, les rayonnements optiques artificiels représentent un risque souvent insoupçonné au travail. Il peut être évalué en utilisant la méthode dite « en trois temps » qui évite le recours systématique à la mesure. En particulier, une première étape d'évaluation associe risque et nature des sources. Sinon, le risque peut être évalué numériquement à l'aide du logiciel CatRayon, qui se révèle également utile lors des actions de réduction du risque.

Des rayonnements optiques artificiels (ROA) sont produits lors de processus industriels, parfois pour leurs caractéristiques propres (désinfection par UV-C, détection de défaut par fluorescence aux UV, éclairage scénique, séchage par infrarouge…), parfois comme résidu du processus de fabrication (soudage, métallurgie ou verrerie par exemple). Dans tous ces cas, ils peuvent représenter un risque pour la peau et les yeux.

Les rayonnements ultraviolets et infrarouges ne déclenchent aucun stimulus visuel : ils peuvent rester insoupçonnés si leur exposition ne s'accompagne ni de douleur ni de gêne. De plus, leurs effets néfastes pour la peau et les yeux sont en majorité différés. Pour toutes ces raisons, le risque lié à l'exposition aux ROA n'est pas toujours détecté. Les salariés ne travaillent alors que partiellement, voire pas du tout protégés (Cf. Figure 1).

Protéger les salariés de l'exposition aux ROA répond alors à une double nécessité :

- identifier les risques ;
- les évaluer pour s'en protéger, si nécessaire en quantifiant l'exposition.

ÉVALUER LE RISQUE EN TROIS TEMPS

La méthode présentée ici permet d'évaluer le risque encouru par les salariés, en limitant les moyens mis en œuvre : la mesure n'intervient qu'en dernière extrémité.

Cette méthode garantit une absence de risque ou, au contraire, avère la nécessité d'une action de réduction des risques.

Le logigramme présenté dans la figure 2 décrit schématiquement la méthode proposée ici :

- au préalable, les sources et les postes exposés sont repérés et identifiés ;
- dans certains cas, une estimation sommaire ou une connaissance du danger associé au type de source peut suffire à déterminer si l'exposition est sans risque ou s'il faut réduire ces risques ;
- sinon, il peut être possible de calculer l'exposition aux ROA et les risques qui en découlent, à l'aide du logiciel CatRayon [1,2] et sans recourir à des mesures ;
- si l'exposition ne peut être calculée par CatRayon, il conviendra de recourir à des mesurages.

Cet article porte sur les deux premiers niveaux de cette méthode, ainsi que sur l'utilisation de CatRayon lors des actions de réduction des risques.

Niveau 1 : connaissance *a priori* ou estimation sommaire

L'objectif est ici de catégoriser la source comme inoffensive, dangereuse ou à risque incertain en recourant aux connaissances du domaine.

Une source de ROA sera considérée inoffensive si elle ne présente pas de risque, ou bien un risque négligeable. C'est le cas lorsque :

- l'exposition ne peut être dangereuse que dans des conditions improbables ;

© Sylvie Legoupi pour l'INRS

© Gaël Kerbaol/INRS

© Claude Almodovar pour l'INRS

↑FIGURE 1

Protection partielle des salariés vis-à-vis des ROA. À gauche : l'opérateur protège ses yeux du « coup d'arc », mais sa peau n'est que partiellement protégée des effets délétères des UV. Au centre : l'opérateur protège ses mains des matières incandescentes mais ni ses yeux ni sa face des rayonnements infrarouges. À droite : pour raisons scéniques, les yeux des salariés sont exposés.

- dans des conditions normales, le risque inexistant ou faible ;
- la luminance de la source d'éclairage est inférieure à 10 000 cd.m^{-2} : il n'y a pas de risque lié à la lumière visible ni à la « lumière bleue ».

Cela concerne, par exemple, l'éclairage général, d'appoint par LED ou halogène avec verre de protection ou l'usage des photocopieuses.

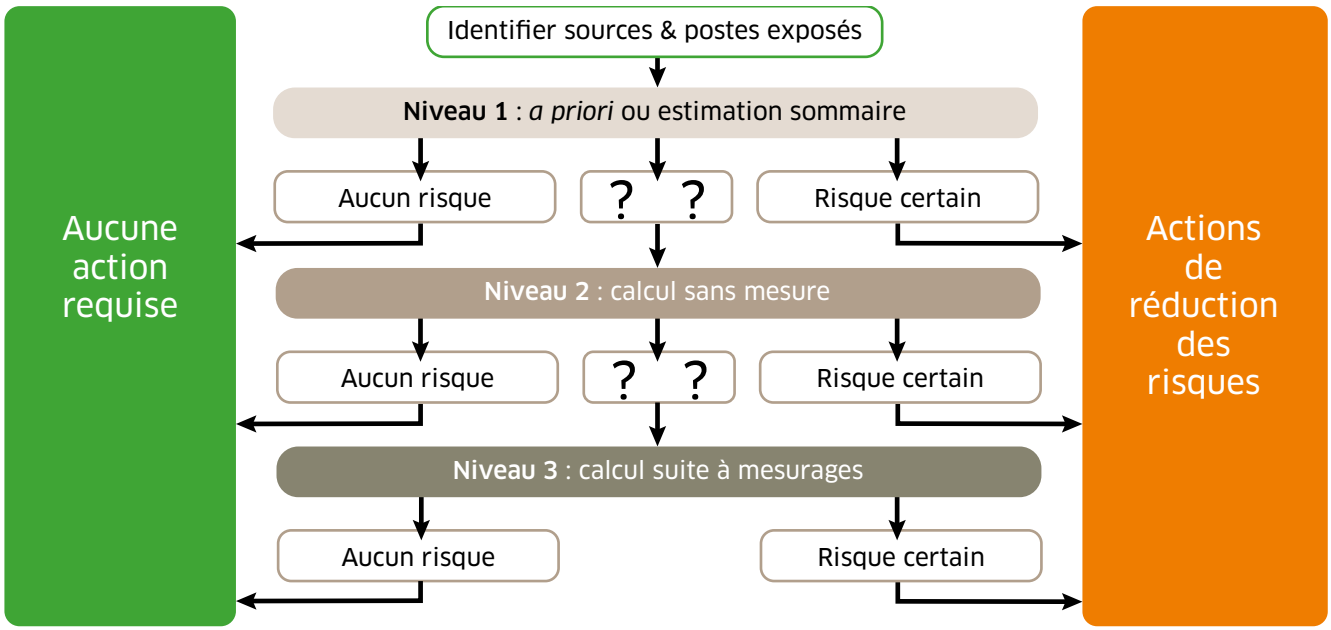
À l'inverse, d'autres sources de ROA sont connues pour présenter un risque certain (dont l'indice de risque quantifié est supérieur à 1 mais non évalué précisément). Il s'agit des ROA émis pendant le soudage, le chauffage, la fabrication et la transformation de produits (verres, métaux) et les processus photochimiques. S'ajoute à cela toute utilisation de source émettant des UV-B ou UV-C.

Enfin, dans certaines situations, il n'est pas possible de se prononcer *a priori* sur le danger ou l'innocuité d'une source de ROA. Le risque varie suivant que ces sources sont ou non directement visibles et en fonction de la distance et de la durée d'exposition. L'incertitude concerne aussi les cas où la source de ROA a été modifiée. Il s'agit, par exemple, des luminaires au verre de protection retiré ou endommagé, d'appareils modifiés, du *relamping* de tubes « lumière noire » ou actiniques (désinsectiseurs). Ces situations nécessiteront de passer au niveau 2 de la méthode présentée ici.

L'évaluation sommaire se fonde

↓FIGURE 2

Logigramme d'évaluation des risques liés aux ROA.



© Vincent Grémillet pour l'INRS

© Vincent Grémillet pour l'INRS

↑FIGURE 3
Photolyse des graisses dans les hottes par UV-C : indications et protections insuffisantes.
(À gauche) Le panneau omet le risque pour la peau en cas d'exposition aux UV-C.
(À droite) L'opérateur suit les indications portées sur l'appareil : il lui manque une protection du visage.

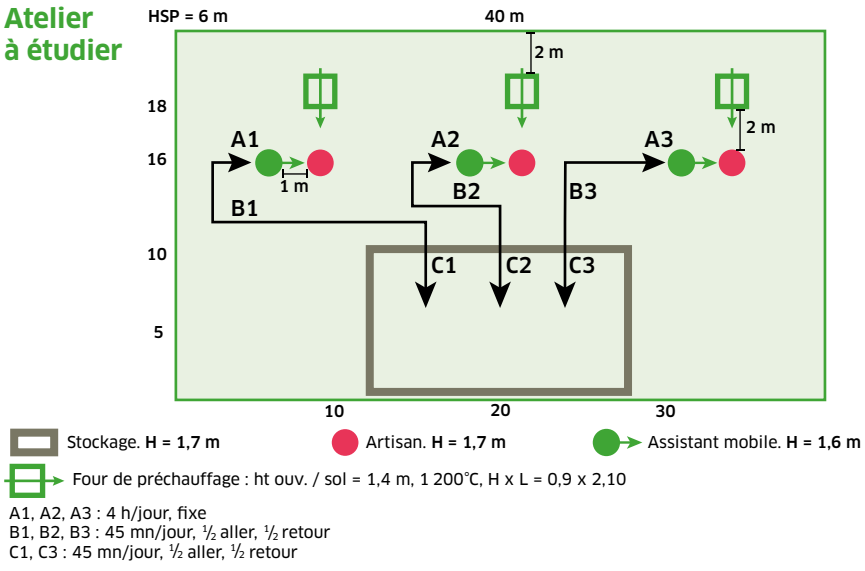
d'abord sur la bibliographie. Celle-ci intègre les études permettant de connaître les risques par exposition aux ROA associés à certaines activités comme la métallurgie [3], les verreries [4] ou le soudage [5], ou bien associés à certains types de sources (UV [6], LED [7]).

Évaluer sommairement l'exposition aux ROA repose aussi sur les informations fournies par les fabricants : notices, étiquettes, marquage CE. Ce dernier passe par le classement des sources de ROA suivant la norme NF EN 62471:2008 [8] en quatre groupes, de « sans risque » à « risque élevé ». Les annotations des constructeurs doivent néanmoins être lues avec un regard critique : elles peuvent parfois être incomplètes (Cf. Figure 3), amenant à des mesures de sécurité insuffisantes.

Des guides pratiques abordant les risques liés aux ROA sont édités par les pouvoirs publics (Union européenne [9], gouvernements belge [10] et anglais [11]). Ils abordent les points suivants :

- savoir associer un type de source à un risque ;
- lister les sources inoffensives et les activités à risque ;
- une méthode pour appréhender les risques et les évaluer ;
- les mesures de prévention, d'information et de suivi médical.

L'INRS publie également un document de sensibilisation à l'exposition aux ROA [12] qui intègre les étapes de la méthode présentée ici. Il développe des listes de cas d'expositions inoffensives ou aux effets délétères avérés.



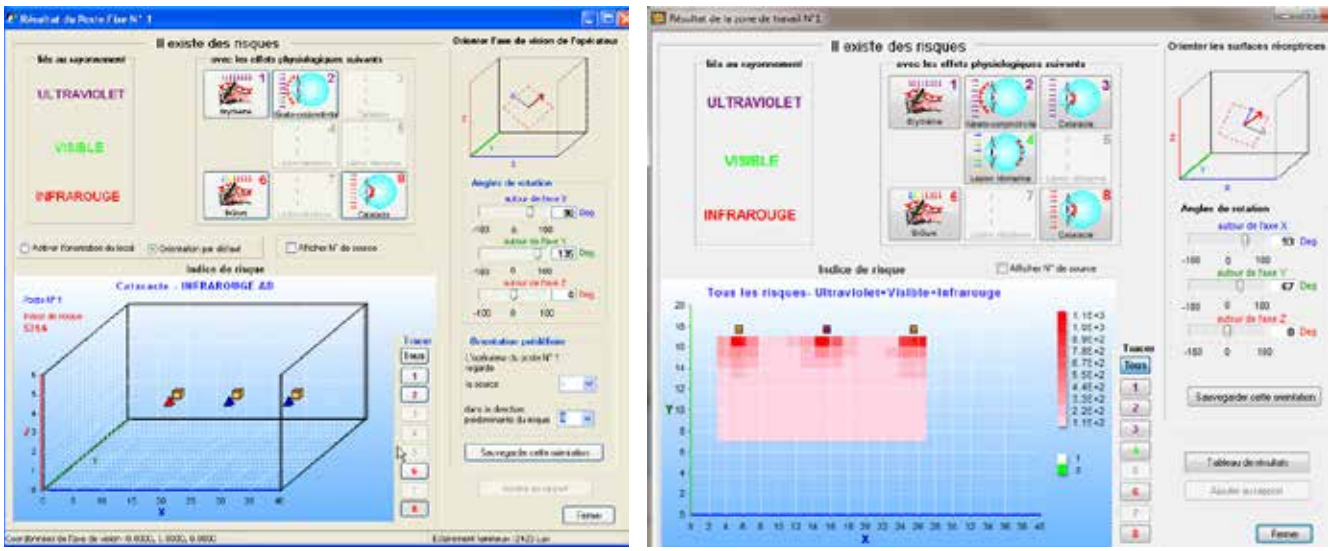
←FIGURE 4
Relevés *in situ*. Sur ce document sont repérés les sources de ROA ainsi que les postes et zones de travail, associés à des durées d'exposition.

Niveau 2 : évaluer le risque par calcul sans mesure

Lorsque le risque n'est ni inexistant, ni faible, ni avéré, son indice peut être calculé sans nécessairement recourir à des mesures.

L'évaluation d'une situation d'exposition aux ROA se fonde sur la comparaison entre des valeurs caractérisant la situation et des valeurs limite d'exposition (VLE) admissibles pour une journée de travail de huit heures [13].

L'évaluation prend en compte à la fois les tissus exposés, le domaine spectral, la durée d'exposition (ou son absence), l'étendue géométrique des



↑FIGURE 5

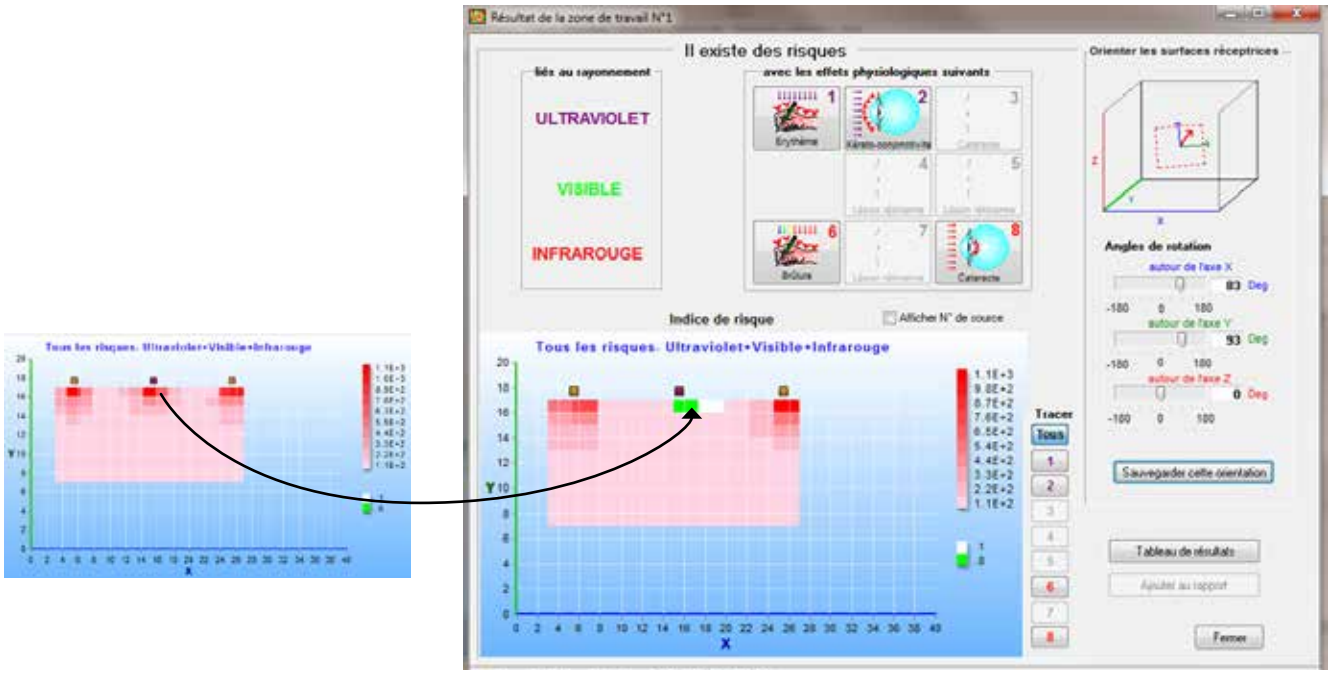
CatRayon : évaluation des risques au poste de travail (à gauche) et dans les zones de travail (à droite) par exposition à trois sources de ROA. L'interface montre interactivement l'indice de risque associé à chaque VLE. Elle permet de modifier l'orientation du salarié librement, comme vers un risque prédominant ou une source en particulier.

sources vis-à-vis des tissus récepteurs de ROA. Cela amène à considérer sept VLE. En pratique, ces calculs ne sont pas réalisables manuellement : il faut recourir à un logiciel comme CatRayon, logiciel téléchargeable gratuitement sur www.inrs.fr [2]. Celui-ci s'appuie sur une base de données de nombreux types et modèles de sources :

- lampes à usage spécifique : lampes à vapeurs de mercure, (supra)actiniques, de lumière noire, germicide, de cosmétique et de traitements médicaux, pour arts graphiques, brûleurs infrarouges halogènes, émettrices infrarouges ;
- lampes à usage général (hors LED) : dichroïques, halogènes, à incandescence, fluorescentes (à tube ou compactes), aux halogénures métalliques, haute pression (vapeur de mercure, sodium), à induction ;
- arcs de soudage, suivant diamètre, tension, intensité, catégorie (électrode, fil plein, fil fourré) et

↓FIGURE 6

Évaluation du risque dans une zone de travail, exposées à trois sources de ROA. À gauche : situation initiale, les indices de risque dépassent 1 partout. À droite : effet bénéfique de l'adjonction d'une protection collective devant la source centrale (l'absence de risque est indiquée en vert).



métal soudé (acier, cuivre, fontes, aluminium) ;
- fours d'aciérie, de forge, de verrerie ;
- autres : projection thermique, chalumeaux.

Le logiciel permet d'apprécier la situation d'exposition à travers des indices de risque : il s'agit du rapport d'une valeur évaluant l'exposition aux ROA sur la VLE correspondante. Un indice de risque inférieur ou égal à 1 signifie l'absence de risque pour les salariés. Au-delà de ce seuil, des actions de réduction de l'exposition doivent être mises en œuvre.

À partir d'un relevé en entreprise contenant l'identification des sources, la géométrie du projet et les paramètres d'exposition des salariés (Cf. Figure 4), CatRayon permet de modéliser la situation d'exposition aux ROA.

CatRayon calcule tous les indices de risque pour chaque poste fixe ou mobile. Il fait de même pour toutes les zones de travail, ce qui permet d'apprécier la distribution des indices de risque dans l'espace. Les résultats sont présentés graphiquement (Cf. Figure 5) et interactivement, suivant que l'utilisateur préfère examiner tous les types de risque, ou l'un d'eux en particulier, ou bien qu'il décide de modifier l'orientation des salariés.

CHOISIR UNE PROTECTION COLLECTIVE OU INDIVIDUELLE DES SALARIÉS À L'AIDE DE CATRAYON

Au-delà de l'évaluation, CatRayon est aussi utile pour définir les actions de réduction des risques en respectant l'ordre de priorité propre à la démarche de prévention :

1. choisir une source de ROA réduisant le risque ;
2. ajuster itérativement l'organisation du travail, par augmentation des distances entre sources et salariés, et réduction des durées journalières d'exposition ;
3. lancer une recherche automatisée des filtres de protection efficaces pour ramener les indices de risque à 1 ou moins, dans le cadre de la protection collective des postes fixes, mobiles et des zones de travail (Cf. Figure 6) ;
4. lancer une telle procédure pour définir la protection individuelle des postes fixes et mobiles.

CatRayon permet d'aller plus loin que l'évaluation, il constitue une aide pour limiter les expositions liées aux sources de ROA par la réorganisation du travail et le choix de protections collectives et individuelles adaptées. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Barlier-Salsi A., Salsi S. CatRayon3: Un logiciel pour évaluer l'exposition au rayonnement optique dans les locaux de travail et déterminer les moyens de protection. INRS, Notes scientifiques et techniques, 2007 ; 265:57.

[2] INRS. CatRayon 4, logiciel d'évaluation de l'exposition aux rayonnements optiques dans les locaux de travail. www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/outils.html?refINRS=outil03

[3] Barlier A. Rayonnements optiques dans une forge - mesures et moyens de protection. INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 1994, 155:181-93.

[4] Salsi S., Barlier A. Rayonnements optiques dans les verreries à main - Étude de 21 postes de travail. INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 1987, 126, pp. 75-87.

[5] Salsi S., Barlier A. Rayonnements optiques émis lors du soudage à l'arc avec électrodes enrobées - Risques et moyens de prévention. INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 1991, 143, 223-33.

[6] Barlier-Salsi A., Salsi S. Lampes à rayonnement ultraviolet - quantification des risques associés à leur utilisation. INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 1998 ; 170, pp. 49-56.

[7] Martinsons C. Les diodes électroluminescentes et le risque rétinien dû à la lumière bleue. *Photoniques,* 2013, 44-9.

[8] NF EN 62471. Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. AFNOR. 2008, 46.

[9] Commission Européenne. Guide non contraignant pour la mise en oeuvre de la directive 2006/25/CE sur les rayonnements optiques artificiels [Internet]. Luxembourg: Union européenne; 2011. http://bookshop.europa.eu

[10] Service public fédéral Emploi, Travail et Concertation sociale. Rayonnements optiques artificiels. www.emploi.belgique.be/publicationDefault.aspx?id=34609

[11] HSE. *Non-ionising radiation - Optical radiation [Internet]. Control Artif. Opt. Radiat. Work Regul.* 2010. www.hse.gov.uk/radiation/nonionising/optical.htm

[12] Salsi S., Barlier-Salsi A. *Sensibilisation à l'exposition aux rayonnements optiques artificiels (ROA) sur les lieux de travail (hormis les lasers et appareils à laser),* INRS, ED 6113, 2011.

[13] 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. 2010, texte 11.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Mesure des rayonnements optiques incohérents au poste de travail

Annick Barlier-Salsi INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Indispensable dans certaines situations, la mesure de l'exposition aux rayonnements optiques n'en reste pas moins complexe à réaliser. Cet article présente les deux méthodes disponibles pour y parvenir, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Fixant les conditions de surveillance de la santé des travailleurs ainsi que les valeurs limites d'exposition (VLE) en matière de rayonnements optiques artificiels (ROA), la réglementation[1] impose aux employeurs de procéder à une analyse *a priori* des risques fondée sur des documents ou des calculs [1]. Mais en l'absence d'informations suffisantes, une évaluation des risques par la mesure s'impose. La difficulté des mesures réside dans la multiplicité des effets des ROA et par conséquent des grandeurs à déterminer, ainsi que dans la diversité des sources rencontrées *in situ*. Au-delà du contexte réglementaire, la logique de la démarche de prévention veut que les mesures ne reflètent pas simplement une exposition aux ROA dans une configuration figée à un temps t, mais qu'elles prennent en compte l'évolution possible du poste de travail et permettent de proposer une protection adaptée. De plus, les VLE étant également susceptibles d'évoluer, les appareils et la configuration de mesure doivent être choisis de manière à assurer autant que possible la pérennité des mesures.

Les grandeurs à déterminer et à comparer aux VLE pour évaluer les risques sont présentées dans le tableau 1. Pour mesurer celles-ci, deux méthodes sont possibles : l'utilisation de radiomètres pour mesurer directement les grandeurs requises (E_{eff}, E_{UVA}…) ou la mesure de l'éclairement énergétique spectrique E_λ produit par la source afin de déterminer les grandeurs nécessaires par calcul (Cf. Figure 1).

Il est à noter que, dans cet article, seules les mesures de l'éclairement énergétique sont décrites, sachant que les grandeurs en luminances énergétiques peuvent, par exemple, être calculées à partir des grandeurs en éclairement énergétique et de mesures de la luminance lumineuse.

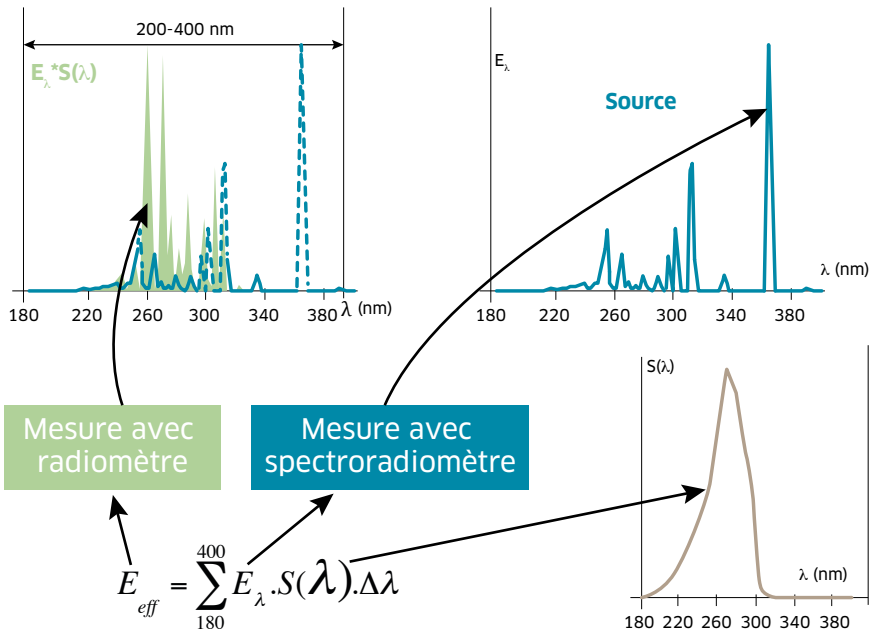


FIGURE 1→
Illustration des méthodes de mesure des ROA disponibles – Exemple détermination de la grandeur E_{eff}.

LES RADIOMÈTRES

Détaillons la première méthode reposant sur le radiomètre. Ce dernier permet d'afficher directement la grandeur à déterminer sur le domaine spectral concerné. La sonde radiométrique se compose de différents éléments :

- un détecteur dont l'étendue de la sensibilité spectrale est supérieure ou égale au domaine spectral concerné ;
- des filtres passe-bandes permettant de délimiter le domaine spectral, par exemple entre 180 et 400 nm pour la détermination de E_{eff} ;
- pour les grandeurs efficaces, un filtre dont la réponse spectrale correspond à la courbe d'efficacité spectrale du rayonnement concerné, soit $S(\lambda)$ pour déterminer E_{eff}, $B(\lambda)$ pour L_B et E_B et $R(\lambda)$ pour L_{R1} et L_{R2}.

La détermination des sept grandeurs radiométriques décrites dans le tableau 1 implique donc l'utilisation de sept configurations de détection. Certains radiomètres disposent de sondes modulaires, les différents éléments optiques sont alors montés à la demande. D'autres sont équipés de systèmes intégrés, chaque sonde correspond alors à une grandeur à déterminer.

Les radiomètres présentent l'avantage de fournir une réponse directe et instantanée. En revanche, la prise en compte des courbes d'efficacité spectrale ainsi que la délimitation des domaines spectraux par le biais des filtres précités rendent les mesures dépendantes des paramètres pris en considération dans le calcul des grandeurs à comparer aux VLE. En cas de modification de ces paramètres, les mesures de sources réalisées antérieurement aux modifications ainsi que le matériel deviennent par conséquent obsolètes.

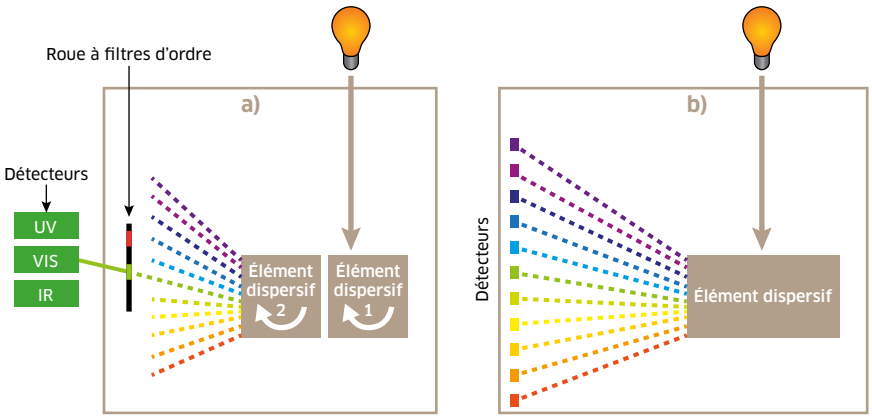
Par ailleurs, un radiomètre nécessite que la source à mesurer ait une répartition spectrale proche de la source utilisée pour son étalonnage. Cette condition est quasiment toujours

DOMAINE SPECTRAL	GRANDEUR À DÉTERMINER	SYMBOLES, TERMES ET UNITÉS
180 – 400 nm	$E_{eff} = \sum_{180}^{400} E_\lambda . S(\lambda) . \Delta\lambda$ W.m^{-2}	λ : Longueur d'onde (nm). E_λ : Éclairement énergétique spectrique (W.m^{-2}.nm^{-1}). L_λ : Luminance énergétique spectrique (W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}). Δλ : Largeur de bande (nm). S(λ) : Pondération spectrale qui tient compte du rapport entre la longueur d'onde et les effets du rayonnement ultraviolet sur les yeux et la peau. B(λ) : Pondération spectrale qui tient compte du rapport entre la longueur d'onde et la lésion photochimique de l'œil provoqué par la lumière bleue. R(λ) : Pondération spectrale qui tient compte du rapport entre la longueur d'onde et la lésion de l'œil par effet thermique provoquée par des rayonnements visible et IRA. E_{eff} : Éclairement énergétique efficace (UV) (W.m^{-2}). E_{UVA} : Éclairement énergétique total (UVA) (W.m^{-2}). E_B : Éclairement énergétique efficace (lumière bleue) (W.m^{-2}). L_B : Luminance énergétique efficace (lumière bleue) (W.m^{-2}.sr^{-1}). L_R : Luminance énergétique efficace (lésion par effet thermique) (W.m^{-2}.sr^{-1}). E_{IR} : Éclairement énergétique total (lésion par effet thermique) (W.m^{-2}). E_{Peau} : Éclairement énergétique total (visible, IRA et IRB) (W.m^{-2}).
315 – 400 nm	$E_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_\lambda . \Delta\lambda$ W.m^{-2}	
300 – 700 nm	$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda . B(\lambda) . \Delta\lambda$ W.m^{-2}.sr^{-1}	
	$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda . B(\lambda) . \Delta\lambda$ W.m^{-2}	
380 – 1 400 nm	$L_{R2} = \sum_{380}^{1400} L_\lambda . R(\lambda) . \Delta\lambda$ W.m^{-2}.sr^{-1}	
780 – 1 400 nm	$L_{R1} = \sum_{780}^{1400} L_\lambda . R(\lambda) . \Delta\lambda$ W.m^{-2}.sr^{-1}	
780 – 3000 nm	$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_\lambda . \Delta\lambda$ W.m^{-2}	
380 – 3000 nm	$E_{Peau} = \sum_{380}^{3000} E_\lambda . \Delta\lambda$ W.m^{-2}	

↑TABLEAU 1

Grandeurs à déterminer selon le décret 2010-750. Ces grandeurs sont définies dans le décret 2010-750 [2] et sont issues des recommandations de l'ICNIRP[3] de 2007 pour l'ultraviolet [3] et de 1997 pour le visible et le proche infrarouge [4]. À noter que, depuis la parution du décret, l'ICNIRP a édité en 2013 de nouvelles recommandations pour l'exposition au visible et au proche infrarouge [5].

satisfaite pour les mesures sur le domaine infrarouge (les sources étalon sont généralement des lampes tungstènes halogène dont le spectre continu est proche de celui des sources infrarouge rencontrées dans l'industrie, puisqu'il s'agit dans les deux cas de corps portés à haute température). En revanche, dans le domaine ultraviolet, bon nombre de sources émettent sur un spectre étroit, voire de quelques raies, donc très éloigné du spectre d'une lampe étalon au deutérium. Cela peut conduire à une sous-estimation du risque.



↑FIGURE 2
Schémas de spectroradiomètres a) à balayage et à double monochromateurs, b) à barrettes de détecteurs (ex.: CCD).

LES SPECTRORADIOMÈTRES

La seconde méthode, qui s'appuie sur la mesure de l'éclairement énergétique spectrique E_λ, s'effectue à l'aide d'un spectroradiomètre. Ces dispositifs permettent de mesurer la répartition spectrale d'une source en éclairement E_λ ou en luminance L_λ énergétique. L'élément de base est donc l'élément dispersif, le plus courant est un réseau de diffraction, dont la fonction est de séparer le rayonnement émis par la source selon les différentes longueurs d'onde. Le rayonnement émis sur chacune des longueurs d'onde est alors mesuré à l'aide de détecteurs spécifiques, soit successivement (cas des spectroradiomètres à balayage, cf. Figure 2a) soit simultanément (cas des spectroradiomètres à barrettes de détecteurs comme les CCD, cf. Figure 2b).

La mesure de la répartition spectrale de la source, puis la détermination des grandeurs à comparer aux VLE par calcul (Cf. Figure 1) permet de s'affranchir des autres paramètres pris en compte pour les déterminer. Une modification de ces paramètres ne nécessite pas de nouvelles mesures mais conduit simplement à recalculer les grandeurs à partir des nouveaux critères. De plus, une évaluation des risques fondée sur plusieurs référentiels (décret 2010-750 [2] et nouvelles recommandations ICNIRP [5]…) est alors réalisable.

Spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs

Pour couvrir l'ensemble du domaine spectral 200 - 3 000 nm, un seul spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs équipé d'au moins trois détecteurs de sensibilités spécifiques à un domaine spectral est suffisant. Cependant, son coût élevé, son encombrement, sa fragilité ainsi que la durée des mesures provenant de l'analyse successive de chacune des longueurs d'onde, en font un appareil réservé aux mesures en laboratoire. Toutefois, dans la mesure où la source à analyser est transportable, la détermination de la répartition spectrale en laboratoire à l'aide de cet instrument est tout-à-fait envisageable et même recommandée. En effet, comparé à une mesure *in situ*, la mesure en laboratoire est plus fiable, du fait de l'appareil de mesure qui présente une bonne performance, mais également du fait d'une meilleure maîtrise de l'environnement.

Spectroradiomètre à barrette de détecteurs

Dans le cas des spectroradiomètres à barrettes, compte-tenu de la spécificité des détecteurs, deux appareils au moins sont nécessaires pour couvrir la quasi-totalité du domaine spectral: les détecteurs CCD, sensibles aux rayonnements émis entre 200 et 1 100 nm, et les détecteurs InGaAs, couvrant le domaine 1 000 - 2 500 nm.

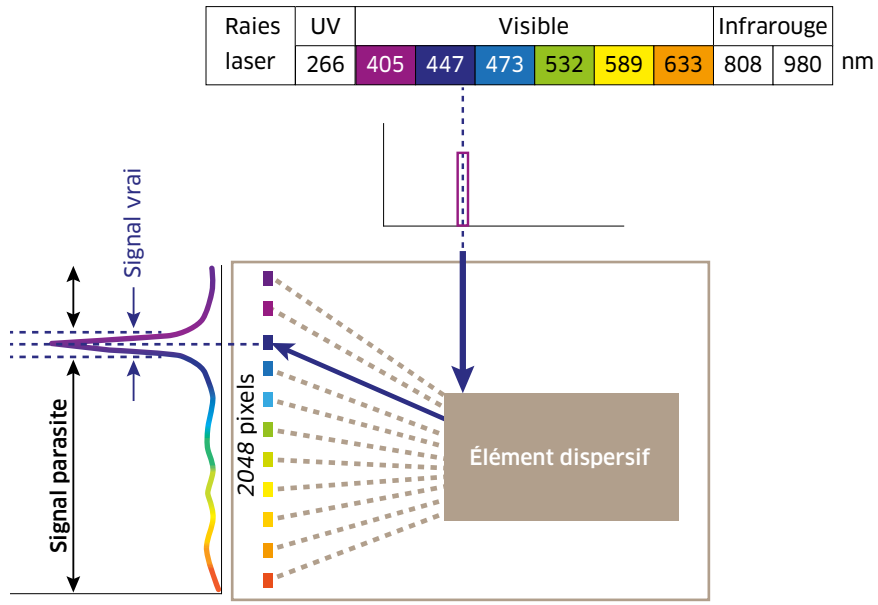
Contrairement aux spectroradiomètres à balayage, la mesure avec un spectroradiomètre à barrettes de détecteurs CCD ou InGaAs est instantanée.

Dans le domaine infrarouge, une étude réalisée à l'INRS a comparé les résultats obtenus sur trois lampes (lampe à arc au xénon, lampe tungstène halogène et lampe infrarouge) avec un spectroradiomètre à détecteurs inGaAs (NIR 256 Avantes) et un spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs (OL750 Optronic Laboratories) pris comme référence. Elle montre que la valeur maximale des écarts enregistrés sur la grandeur E_{IR}, limitée au domaine 1 000 - 2 500 nm, est inférieure à 10 %. Sachant que les normes NF EN 14255-1 [6] et NF EN 14255-2 [7], relatives aux mesures des ROA au poste de travail, admettent une incertitude maximale de 30 % pour les mesurages, on peut considérer que ce type d'appareil est adapté aux mesures du rayonnement infrarouge au poste de travail.

Dans le domaine ultraviolet et visible, un signal parasite est observé lors de la mesure de certaines sources avec les spectroradiomètres CCD. Il est dû, au niveau de chaque détecteur composant la barrette, à la réception d'un rayonnement de longueur d'onde sans rapport avec la longueur d'onde associée à ce détecteur. Les erreurs les plus importantes

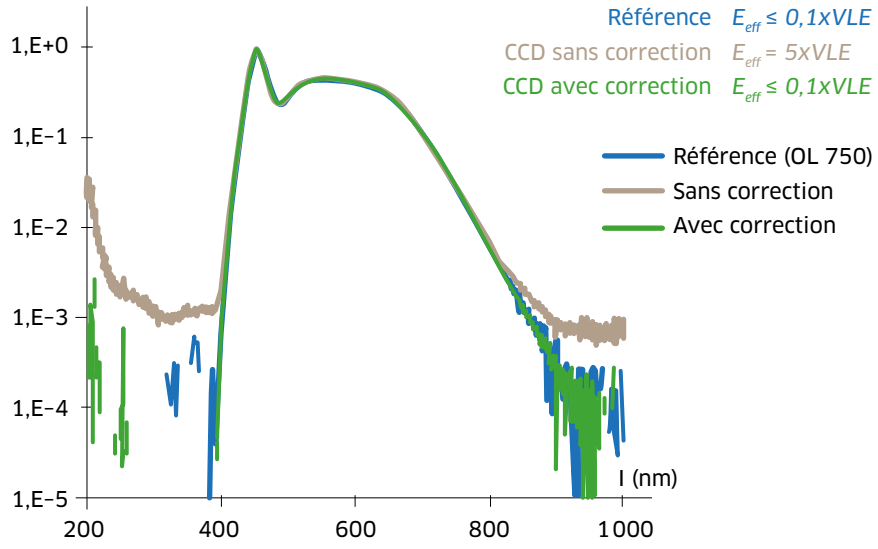
apparaissent notamment lorsque les sources ont un niveau d'émission faible dans l'ultraviolet comparativement au niveau d'émission dans le visible. C'est pourquoi une méthode de correction de la lumière parasite développée au NIST[2] [8] a été reprise à l'INRS [9]. Elle consiste à injecter dans l'appareil des raies monochromatiques à l'aide de lasers et à relever pour chaque raie émise, le signal sur la totalité du domaine spectral (Cf. Figure 3). Ainsi, le signal vrai correspond au signal enregistré sur la bande spectrale de longueur d'onde égale à la raie d'émission, alors que le signal en dehors de la bande d'émission correspond à la lumière parasite. Le signal enregistré à partir de chacune des raies d'émission (80 environ pour le NIST, réduit à 9 dans l'étude INRS) conduit à la construction d'une matrice qui, appliquée au signal mesuré sur la source, permet de réduire considérablement les erreurs dues à cette lumière parasite.

Un exemple de spectre mesuré sur une LED à l'aide, d'une part, d'un spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs pris comme référence et, d'autre part, d'un spectroradiomètre CCD corrigé et non corrigé, est présenté dans la figure 4. En comparant le spectre mesuré avec CCD non corrigé au spectre de référence, le signal correspondant à la lumière parasite apparaît clairement pour les longueurs d'ondes inférieures à 400 nm, mais également pour celles supérieures à 800 nm. Dans la figure 4, la détermination de la grandeur E_{eff} dans les trois configurations montre que l'erreur commise en utilisant un spectroradiomètre CCD non corrigé est de l'ordre de 5 000 %. Dans une situation d'évaluation des risques *in situ*, une mesure de ce type avec un spectroradiomètre CCD non corrigé conduirait à préconiser une protection contre les ultraviolets alors que la source a une émission négligeable sur ce domaine spectral. En revanche, la grandeur E_{eff} calculée à partir du spectre corrigé est semblable à celle déterminée à partir du spectre de référence.



↑FIGURE 3

Illustration de la méthode de correction de la lumière parasite.



↑FIGURE 4

Répartition spectrale relative d'une LED mesurée à l'aide d'un spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs, pris comme référence, et avec un spectroradiomètre CCD corrigé et non corrigé – détermination de E_{eff} à même distance de la source

MÉTHODE D'ÉVALUATION DES RISQUES À PARTIR DES MESURES

Un poste de travail est susceptible d'évoluer au cours d'une journée ou à plus long terme. Il importe donc que les mesures réalisées permettent d'évaluer les risques dans différentes situations, de manière à rester représentatives de la situation réelle de travail et se traduisent, si besoin, par la mise en œuvre de protections adaptées. Prendre en considération ces évolutions ainsi que les évolutions possibles des VLE influent sur

le choix de l'appareil et de la configuration de mesure au poste de travail. Dans ce contexte, une mesure à l'aide d'un spectroradiomètre permet de caractériser uniquement la source et donc de prendre en considération ces évolutions. Une mesure réalisée dans la configuration exacte de travail n'est ni toujours la plus judicieuse ni toujours possible compte tenu des contraintes liées aux postes. Dans ces conditions, il est plus intéressant, par exemple, de se placer à une distance qui permet d'avoir un signal suffisant plutôt qu'à la distance réelle d'exposition. Si le poste comprend plusieurs sources de caractéristiques identiques, il est préférable de se limiter à la mesure d'une seule source. La totalité des sources sera alors prise en compte *a posteriori*, au moment de l'évaluation des risques.

L'évaluation des risques dans les conditions réelles d'exposition peut, par exemple, être réalisée à l'aide du logiciel CatRayon [10]. Ce dernier permet le cas échéant de choisir une protection adaptée si et seulement si les mesures sont réalisées sous formes spectrales. CatRayon comprend également un module d'entrée de données « MesSourcesCatRayon » avec lequel il est possible de saisir les valeurs mesurées, les caractéristiques de la source ainsi que la configuration de mesure. Une évaluation *a posteriori* des risques par simulation implique donc de relever avec précision les caractéristiques des sources (forme, dimension), leur dispositions, les distances et les angles de mesures.

La démarche entreprise par les Centres de mesures physiques (CMP) des Carsat et l'INRS pour évaluer les risques dus aux ROA au poste de travail est fondée sur la méthode d'évaluation des risques décrite précédemment. Ainsi, le matériel choisi pour couvrir le domaine spectral 200-1 100 nm est un spectroradiomètre CCD avec 2048 pixels de grandes dimensions, rétro-éclairés et à haute sensibilité dans l'UV et le proche infrarouge. Il est complété par un spectroradiomètre à détecteurs InGaAs de 256 pixels pour couvrir l'infrarouge moyen.

Bien entendu, les spectroradiomètres CCD équipant les CMP sont corrigés pour prendre en compte la lumière parasite. La matrice de correction ainsi que l'étalonnage des appareils sont réalisés par l'INRS. Il est apparu nécessaire d'intégrer la matrice de correction de la lumière parasite ainsi que les corrections d'étalonnage dès l'acquisition des mesures, de manière à les rendre transparentes pour l'utilisateur. C'est pourquoi une interface spécifique a été développée à l'INRS en remplacement de l'interface livrée avec l'appareil. Le principal objectif de cette démarche est que l'ensemble des CMP soit équipé du même type de matériel, de façon à pouvoir réaliser des mesures au poste de travail avec le même niveau de fiabilité et avec pour projet à plus long terme de mutualiser les données recueillies en entreprises. ●

1. Directive européenne 2006/25/CE transposée en droit français par le décret n° 2010-750 [2] du 2 juillet 2010.

2. National Institute of Standards and Technology.

3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). J. Off., 2006, pp 38–59.

[2] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. *J. Off.* 4 Juillet 2010, Texte 11.

[3] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths 180 nm to 400 nm (incoherent optical radiation). *Health. Phys.* 2004, 87, pp. 171–86.

[4] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 µm). *Health. Phys.,* 1997, 73, pp. 539–54.

[5] ICNIRP. Guidelines on limits exposure to incoherent visible and infrared radiation. *Health. Phys.,* 2013, 105, pp. 74–91.

[6] NF EN 14255-1. Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents – Partie 1 : Rayonnements ultraviolets émis par des sources artificielles sur les lieux de travail. Afnor, 2005, 29 p.

[7] NF EN 14255-2. Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents – Partie 2 : Rayonnements visibles et infrarouges émis par des sources artificielles sur les lieux de travail. Afnor, 2006, 43 p.

[8] Zong Y., Brown SW., Johnson BC., Lyckke KR., Ohno Y. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometer. *Appl. Opt.,* 2006, 45, pp.1111–9.

[9] Barlier-Salsi A. Stray light correction on array spectroradiometers for optical radiation risk assessment in the workplace. J. *Radiol. Prot.* 2014, 34, pp. 915–30.

[10] INRS. CatRayon 4, logiciel d'évaluation de l'exposition aux rayonnements optiques dans les locaux de travail. 2012. www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil03.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Luminaires à LED : évaluation du risque rétinien en laboratoire de fabricant

Sébastien Point Société française de radioprotection (SFRP)

Comment estimer le risque rétinien en lumière bleue que présentent les luminaires à LED en cours de développement ? Cet article a pour vocation d'aider à comprendre et à évaluer ce risque, sans visée métrologique, et de proposer quelques moyens de protection simples et efficaces pour aider les entreprises qui développent ces luminaires à LED à mieux protéger les salariés ayant la charge de les concevoir ou de les tester.

Dans les années 1970, les travaux de Ham, Mueller et Sliney [1,2] ont ouvert la voie à la description des mécanismes de blessure photochimique de la rétine lors d'une exposition importante ou prolongée à la lumière bleue. On sait ainsi aujourd'hui que l'absorption du rayonnement bleu par la rétine entraîne la formation de radicaux libres et d'espèces réactives de l'oxygène [3] à l'origine de la survenue de lésions cellulaires potentiellement irréversibles. Sur la base de ces travaux, l'*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) [4] a défini un spectre d'action de la lumière bleue B(λ) (Cf. Figure 1) et une dose limite (ou exposition énergétique maximale admissible) de 1 million de J/(m².sr), en dessous de laquelle on n'attend pas d'effet sanitaire.

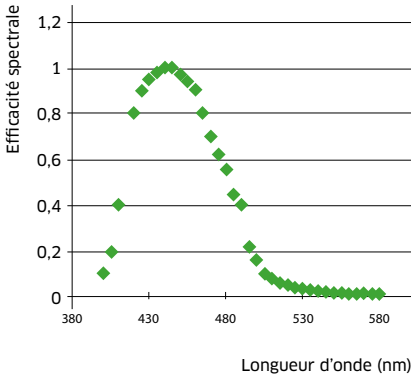


FIGURE 1→
Spectre d'action de la lumière bleue sur la rétine humaine (Source : S. Point).

Cette exposition énergétique à la lumière bleue (que l'on notera Hb) peut être traduite comme le produit de la durée d'exposition T par une grandeur directement mesurable, la luminance efficace à la lumière bleue (notée Lb), selon l'équation (1) :

$$Hb\ [J/(m^2.sr)] = Lb[W/(m^2.sr)].T[s] \quad (1)$$

LES VALEURS LIMITES D'EXPOSITION

Pour respecter l'exposition énergétique maximale admissible en lumière bleue, la norme européenne EN 62471 [5] définit des valeurs limites d'exposition (VLE) fondées sur Lb ainsi que des groupes de risque reposant sur ces VLE et sur la durée d'exposition. Le groupe de risque augmente avec la réduction du temps nécessaire au dépassement de l'exposition énergétique maximale, c'est-à-dire avec l'augmentation de la luminance efficace en lumière bleue de la source. Le tableau 1 associe VLE et groupes de risque. On constate que :

- le groupe sans risque rassemble les sources de luminance en lumière bleue inférieure à 100 W/m²/sr qui n'exposent donc l'observateur à 1 million de J/(m².sr) qu'au-delà d'une durée d'exposition de 10 000 s (soit environ 2h45) ;
- le groupe de risque faible rassemble les sources de luminance en lumière bleue comprise entre 100 W/m²/sr et 10 000 W/m²/sr qui n'exposent l'observateur à 1 million de J/(m².sr)

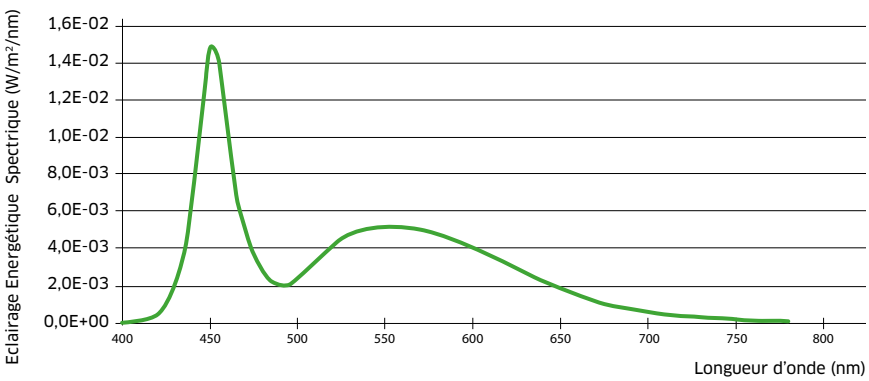
RISQUE RÉTINIEN EN LUMIÈRE BLEUE	GROUPE SANS RISQUE	GROUPE RISQUE FAIBLE	GROUPE RISQUE MODÉRÉ	GROUPE RISQUE ÉLEVÉ
Durée(s) d'exposition maximale(s)	10000	100	0,25	< 0,25
VLE (W/m²/sr)	< 100	< 10000	< 4000000	> 4000000
Hb max J/(m².sr)	10^6	10^6	10^6	10^6

↑TABLEAU 1
Critères de définition des groupes de risque.

qu'au-delà d'une durée d'exposition de 100 s ;
- le groupe de risque modéré rassemble les sources de luminance en lumière bleue supérieure à 10000 W/m²/sr mais inférieure à 4000000 W/m²/sr qui exposent l'observateur à 1 million de J/(m².sr) si la durée d'exposition dépasse le délai d'apparition du réflexe palpébral (un quart de seconde) ;
- le groupe de risque élevé concerne les sources de luminance en lumière bleue supérieure à 4000000 W/m²/sr pour lesquelles le délai d'apparition du réflexe palpébral est trop long pour éviter une atteinte de la rétine. La dose maximale admissible est donc dépassée « instantanément ».

LA TECHNOLOGIE LED

L'application de l'EN 62471 est désormais exigée par les normes de conception des appareils d'éclairage (comme l'EN 60598-1 [6]) qui incluent des LED (*Light-Emitting Diodes*), lesquelles combinent une luminance élevée et un spectre riche en bleu. En effet, les LED blanches, pour la plupart, utilisent les propriétés émissives de matériaux luminophores, généralement du Ce:YAG. Ce type de luminophore, lorsqu'il absorbe le rayonnement bleu émis par la diode (faite généralement de nitrure d'indium-gallium), produit un rayonnement continu couvrant la partie vert-jaune-rouge du spectre visible. La lumière bleue n'est cependant pas entièrement convertie. Par conséquent, le spectre d'une LED blanche est constitué de la réponse du luminophore au rayonnement d'excitation bleu ainsi que de la partie non convertie de ce dernier (Cf. Figure 2). On note que le maximum du spectre d'action de la lumière bleue défini par l'ICNIRP se situe entre 435 et 445 nm de longueur d'onde, c'est-à-dire très proche du pic d'émission d'une LED blanche à luminophore (450/455 nm). C'est la raison pour laquelle les LED blanches à luminophore peuvent présenter des risques pour la rétine.



←FIGURE 2
Spectre typique d'une LED blanche à luminophore (Source : [7]).

ÉVALUER LE RISQUE

L'expression de Lb est formalisée par la norme EN 62471 par l'équation :

$$Lb = \int_{300\,nm}^{700nm} L\lambda(\lambda).B\lambda(\lambda).d\lambda \; [W/m^2/sr] \quad (2)$$

Bλ(λ) est la fonction de risque rétinien en lumière bleue pour l'œil adulte. Lλ(λ) est la luminance énergétique spectrique mesurée sur le champ de vision et s'éloigne donc très sensiblement de la définition classique de la luminance L donnée par l'équation (3) car la taille angulaire du champ de vision, sur lequel s'effectue la mesure, peut-être plus grande que la dimension apparente dA.cosθ de la source :

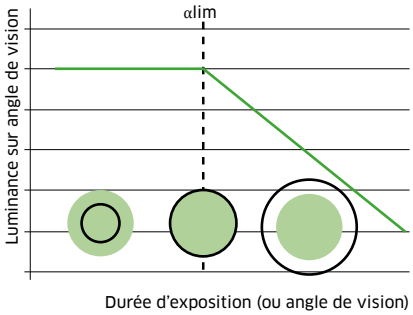
$$L = \frac{dI}{dA.\cos\theta} \quad (3)$$

avec dI l'intensité de la source, dA l'aire de la surface lumineuse et θ l'angle entre la normale à la surface lumineuse et la direction d'observation.
La réalisation de la mesure de luminance sur l'étendue du champ de vision traduit la volonté de prendre en compte les mouvements de l'œil, qui étalent la lumière sur la rétine, y « diluant » ainsi les valeurs d'éclairement énergétique. En lumière bleue, on estime que les mouvements de l'œil augmentent l'étendue du champ de vision proportionnellement à la durée d'exposition suivant les relations empiriques présentées dans le tableau 2. Cette précaution permet d'éviter la surestimation du risque en cas d'expositions longues au cours desquelles l'œil n'est pas fixe.
Si la taille angulaire du champ de vision est plus petite que la taille angulaire de la source, alors Lλ(λ) est égale à la luminance énergétique spectrique vraie de la source. Elle est mesurable simplement à l'aide d'un

RISQUE RÉTINIEN EN LUMIÈRE BLEUE	GROUPE SANS RISQUE	GROUPE RISQUE FAIBLE	GROUPE RISQUE MODÉRÉ	GROUPE RISQUE ÉLEVÉ
Durée(s) d'exposition maximale(s)	10000	100	0,25	< 0,25
Champ de vision correspondant (mrad)	100	11	1,7	1,7

↑TABLEAU 2

Correspondance entre la durée d'exposition et le champ de vision de l'œil humain (Source: d'après [5]).



↑FIGURE 3

Schéma de l'évolution de luminance selon le champ de vision et la taille angulaire de la source. αlim est l'angle limite du champ de vision au-delà duquel la luminance prise sur le champ de vision devient plus petite que la luminance vraie de la source (Source: S.Point).

spectroluminancemètre. En revanche, si la taille angulaire du champ de vision est plus grande que la taille angulaire de la source, alors Lλ(λ) est différente de la luminance énergétique spectrique vraie de la source et un protocole adéquat doit être appliqué.

Calcul de Lb

Afin de calculer Lb, il s'agit principalement de connaître la luminance énergétique spectrique Lλ(λ) sur le champ de vision. On présente ici deux méthodes d'évaluation de Lb peu coûteuses à la portée de tout laboratoire de fabricant: l'une fondée sur la mesure directe de Lλ(λ), l'autre sur l'estimation du rapport Kbv.

Mesure de Lλ(λ)

Comme on l'a indiqué précédemment, la luminance énergétique spectrique doit être mesurée sur le champ de vision. Une manière commode de connaître cette luminance énergétique spectrique Lλ(λ) dans l'axe optique est de mesurer l'éclairement énergétique spectrique Eλ(λ) produit par la source à travers un diaphragme de champ circulaire matérialisant le champs de vision requis. Dans ce cas, pour un champ de vision d'angle plat α, on exprime Lλ(λ) par l'équation (4). On calcule ensuite Lb à partir de l'équation (2):

$$L\lambda(\lambda)=\frac{E\lambda(\lambda)}{\Omega} \text{ avec } \Omega=(\pi.\ \alpha^2)/4 \qquad (4)$$

Au laboratoire, le champ de vision peut donc être matérialisé par un diaphragme de champ que l'on place devant la surface lumineuse et à la distance adéquate du plan de l'observateur occupé par l'objectif d'un spectroradiomètre équipé d'un diffuseur cosinus. La norme EN 62471 préconise, pour les lampes d'usage courant, que le plan de mesure soit placé à une distance de la source où celle-ci fournit un éclairement lumineux de 500 lux, avec un minimum de 200 mm. Seules les lampes pulsées ou les lampes à usage médical, industriel (ex.: la lithographie) ou esthétique (ex.: les cabines de bronzage) ainsi que les projecteurs de lumière, doivent obligatoirement être mesurés à 200 mm. Pourtant, le rapport d'application IEC/TR 62778 [8] recommande une distance de mesure identique de 200 mm pour tous les appareils d'éclairage, considérant que la valeur de 500 lux est arbitraire et ne représente pas la diversité des niveaux d'éclairement rencontrés. Les normes de conception des luminaires comme l'EN 60598-1 reprennent ces recommandations et les mesures sont donc assez communément réalisées à 200 mm pour tous les types de lampes. Ceci permet notamment de «standardiser» la dimension des diaphragmes mais implique des diamètres d'ouverture de l'ordre du dixième de mm pour matérialiser le champ de 1.7 mrad, ce qui est une véritable difficulté expérimentale. Ceci étant dit, on notera que, dans le cas théorique d'une source de lumière circulaire parfaitement homogène (Cf. Figure 3), le diaphragme n'est pas nécessaire. En effet, lorsque le champ de vision est plus petit que la taille angulaire de la source, Lλ est constante et égale à la luminance énergétique spectrique vraie. Elle est mesurable simplement à l'aide d'un spectroluminancemètre. Lorsque le champ de vision est supérieur à la taille angulaire de la source, c'est alors Eλ qui est constant. Dans la nature cependant, de nombreux luminaires à LED ne possèdent pas une luminance uniforme et présentent des points «chauds» car il est toujours difficile de diffuser la lumière provenant de sources de petite taille. Lorsque ces irrégularités sont nombreuses et de dimensions comparables à la dimension du champ de vision, alors la question du placement du diaphragme se pose: la méthode consistant à placer un diaphragme devant le luminaire devient longue et approximative. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'imagerie sont développées afin de faciliter la mesure de Lb [9,10], comme la méthode d'imagerie monospectrale développée par l'auteur.

Simple d'utilisation, cette méthode vise à évaluer Lλ(λ) à partir de l'image d'un luminaire à une longueur d'onde quelconque et de la distribution spectrale relative Sn de sa source. La technique repose sur:

- la réalisation d'une image de la lampe par une caméra (étalonnée en luminance) à travers un filtre sélectionnant précisément une longueur d'onde λref et la définition sur l'image, par logiciel, d'une surface correspondant au champ de vision dont on tire ensuite une valeur de luminance Lλ(λref);
- l'acquisition du spectre lumineux dont l'intensité à λref est ensuite normée à 1 pour obtenir une distribution

spectrale relative Sn(λ) ;
- le calcul de Lλ(λ) en appliquant l'équation :

$L\lambda(\lambda)=Sn(\lambda).L\lambda(\lambda ref)$ [W/m²/sr/nm] (5)

Dans cette méthode, on doit faire l'hypothèse que la distribution spectrale relative Sn(λ) enregistrée à 200 mm du luminaire est représentative de la distribution spectrale relative produite localement par des petits éléments de surface, ce qui se vérifie typiquement assez bien dans le cas (fréquent) de l'utilisation de lots de LED de mêmes puissance et température de couleur. On trouvera le détail de cette méthode dans un article publié dans la revue Radioprotection [7].

Estimation du Kbv

Le rapport technique IEC-TR 62778 propose une solution d'évaluation originale du risque rétinien en lumière bleue, fondée sur la mesure de la chromaticité de la source à tester au lieu de la mesure de Lλ.

Pour ce faire, on s'intéresse au rapport, noté Kbv, de la luminance efficace en lumière bleue Lb et de la luminance visuelle L prise sur le champ de vision :

$$Kbv=Lb/L=\left(\int_{300\,nm}^{700\,nm} L(\lambda).B\lambda(\lambda).d\lambda\right)/\left(Km.\int_{300\,nm}^{700\,nm} L(\lambda).V(\lambda).d\lambda\right),$$

avec Km=683 lm/W (6)

Comme Bλ(λ) est très proche de la courbe CEI 1931 « Z(λ) » et que V(λ) est, par définition, égale à la courbe CEI 1931 « Y(λ) », on peut, dans l'équation (6), substituer

$\int_{300\,nm}^{700\,nm} B(\lambda)$ par $k.\int_{300\,nm}^{700\,nm} Z(\lambda)$

et $\int_{300\,nm}^{700\,nm} V(\lambda)$ par $\int_{300\,nm}^{700\,nm} Y(\lambda)$.

On parvient ainsi à exprimer le rapport Lb/L en fonction de la chromaticité de la source (équation 7). Connaissant la luminance visuelle sur le champ de vision, on en déduit la luminance efficace en lumière bleue par l'équation (8) :

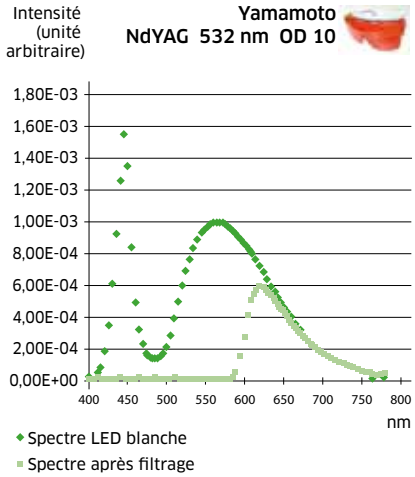
$$Kbv=\frac{k.Z}{Km.Y} \quad (7)$$

$$Lb=\frac{L.k.Z}{Km.Y}=\frac{k}{Km}.\frac{(1-x-y)}{y}.L$$ avec x et y coordonnées de la CIE 1931 (8)

Plus approximative mais nécessitant moins de compétences pour sa mise en œuvre, cette méthode peut donc être privilégiée pour une estimation rapide du niveau de risque rencontré, d'autant qu'une représentation graphique de Kbv, selon les coordonnées chromatiques d'une lumière blanche, est donnée dans l'IEC-TR 62778. Il faut tout de même que L soit mesurée sur le champ de vision.

PROTÉGER DU RISQUE

La diminution des doses reçues peut passer par des mesures simples : le port de lunettes filtrantes entre 400 et 600 nm de longueur d'onde par le personnel lors des activités de mesure (Cf. Figure 4) permet de supprimer les risques d'une photo-intoxication aiguë en supprimant la composante bleue des sources LED. Si le personnel du laboratoire travaille constamment à proximité de sources à LED en essai ou vieillissement sur paillasse ou sur panneau, il pourrait également être soumis à un effet « faible dose » récemment suggéré [11]. Les mesures appropriées permettant de diminuer l'exposition chronique au rayonnement bleu sont le masquage des sources pour en diminuer la luminance ou l'éloignement, car l'éclairement de la rétine diminue proportionnellement au carré de sa distance à la source. ●



↑FIGURE 4
Action de lunettes filtrantes (Source : S. Point).

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Nature* 260, 153 – 155, 11 March 1976.

[2] HAM W.T.J, MUELLER H.A. *The photopathology and nature of the blue light and near-UV retinal lesions produced by lasers and other optical sources, Laser applications in Medicine and Biology,* M.L. Wolbarsht, ed. Plenum, 1989, pp. 191-246.

[3] CÉSARINI J.-P. Risques oculaires du rayonnement bleu, *Radioprotection.*

[4] ICNIRP. *Statement on light emitting diodes (LEDs) and laser diodes: implications for hazard assesment. Health Physics,* 2000, 78 : 744-752.

[5] Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes, CEI 62471-1 : 2008.

[6] Luminaires. Parties 1 : Exigences générales et essais NF EN 60598-1 AFNOR, 2009.

[7] POINT S. Proposition d'une méthode d'évaluation du risque rétinien en lumière bleue associé à des luminaires d'éclairage à LEDs par imagerie monospectrale. Radioprotection.

[8] Application de la CEI 62471 aux sources de lumières et aux luminaires pour l'évaluation du risque lié à la lumière bleue, CEI/RT 62778 : 2012.

[9] BOULENGUEZ *ET AL.* *Blue light hazard of LEDs* – Comparison of the photo biological risk groups of fifteen lamps assessed using the uniform spectrum assumption and a new hyperspectral imaging method.

[10] SALSI S., BARLIER-SALSI A. Exposition aux dispositifs d'éclairage scénique : risque pour la santé des professionnels du spectacle vivant ou enregistré, *Radioprotection.*

[11] JAADAN I. *ET AL.* *Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs), Free Radical Biology and Medicine 84,* 2015, 373-384.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Les moyens de prévention et de protection contre les ROA

Michel Jacques INRS, département Ingénierie des équipements de travail

En présence de rayonnements optiques artificiels dangereux pour les travailleurs, il est nécessaire de mettre en œuvre des moyens de prévention ou de protection. S'appuyant sur la démarche de prévention énoncée dans la réglementation, cet article passe en revue différents moyens de prévention et de protection possibles allant de l'élimination du risque à la source, jusqu'à l'utilisation de moyens de protection individuelle.

En présence de rayonnements optiques artificiels (ROA) dangereux pour les travailleurs, il est nécessaire de mettre en œuvre des moyens de prévention ou de protection en vue de limiter l'exposition des travailleurs. La directive européenne 89/391/CEE [1], transposée en droit français dans l'article L. 4121-2 du Code du travail, spécifie que l'employeur doit mettre en œuvre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des travailleurs, sur le fondement des principes généraux de prévention (Cf. Encadré 1).

Concernant l'exposition aux ROA, la directive 2005/25/CE [2], transposée en droit français par le décret 2010-750 du 2 juillet 2010, reprend ces grands principes en spécifiant que la réduction des risques d'exposition aux ROA se fonde notamment sur :

- la mise en œuvre d'autres procédés de travail n'exposant pas aux ROA ou entraînant une exposition moindre ;
- le choix d'équipements de travail appropriés émettant, compte tenu du travail à effectuer, le moins de ROA possible ;
- la limitation de la durée et de l'intensité des expositions ;

ENCADRÉ 1

Les neuf principes généraux de prévention

1- Éviter les risques.
2- Évaluer les risques qui ne peuvent pas être évités.
3- Combattre les risques à la source.
4- Adapter le travail à l'homme, en particulier en ce qui concerne la conception des postes de travail ainsi que le choix des équipements de travail et des méthodes de travail et de production, en vue notamment de limiter le travail monotone et le travail cadencé et de réduire les effets de ceux-ci sur la santé.
5- Tenir compte de l'état d'évolution de la technique.
6- Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux.
7- Planifier la prévention en y intégrant, dans un ensemble cohérent, la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants.
8- Prendre des mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle.
9- Donner les instructions appropriées aux travailleurs.

- la conception, l'agencement des lieux et postes de travail et leur modification ;
- des moyens techniques pour réduire l'exposition aux ROA en agissant sur leur émission, leur propagation et leur réflexion, tels qu'écrans, capotages… ;
- des programmes appropriés de maintenance des équipements de travail et du lieu de travail ;
- l'information et la formation adéquates des travailleurs.

Les lieux de travail où, d'après les résultats de l'évaluation des risques, les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des ROA dépassant les valeurs limites d'exposition (VLE) font l'objet d'une signalisation appropriée. Ces lieux sont en outre circonscrits, lorsque cela est techniquement possible, et leur accès est limité.

Lorsqu'il n'est pas possible d'éviter les risques dus à l'exposition aux ROA par d'autres moyens, des équipements de protection individuelle, appropriés et adaptés, sont mis à la disposition des travailleurs. L'employeur veille à leur port effectif. Les équipements de protection individuelle doivent être choisis de façon telle qu'ils réduisent les expositions à un niveau qui ne dépasse pas les VLE.

DÉMARCHE DE PRÉVENTION

Les différents moyens de prévention et de protection sont passés en revue et explicités par des exemples. La sélection des mesures de prévention appropriées doit s'effectuer sur la base des résultats de l'analyse des risques.

Procédés ou équipements moins dangereux

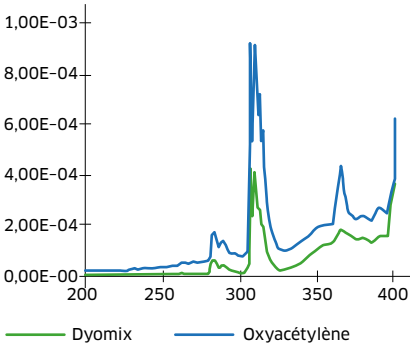
En premier lieu, il convient de s'interroger sur les procédés de travail mis en œuvre et les équipements utilisés : n'existe-t-il pas de procédés ou d'équipements n'émettant pas de ROA ou à défaut en émettant moins ? Ainsi, par exemple, dans les opérations classiques de soudage, soudobrasage et brasage à la flamme (Cf. Figure 1), le combustible est un mélange de deux gaz, oxygène et acétylène, stockés en bouteille sous haute pression. Un nouveau procédé appelé Dyomix® (Cf. Figure 2) utilise l'oxygène et l'hydrogène issus d'une électrolyse, pour créer une flamme à très haute température sans stockage haute pression.

↑FIGURE 1
Chalumeau avec procédé oxyacétylénique.

↑FIGURE 2
Chalumeau avec procédé Dyomix®.

Une mesure comparative des rayonnements émis par les deux procédés (Cf. Figure 3) a été effectuée. Dans les conditions d'essai, l'analyse des résultats met en évidence que le procédé oxyacétylénique présente des risques dus au rayonnement ultraviolet pour la peau et les yeux des soudeurs au-delà de 2h50 d'exposition journalière. En revanche, dans les conditions des essais réalisés, le procédé Dyomix® ne présente aucun risque sur l'ensemble des domaines spectraux.

Autre exemple, dans le domaine du spectacle, les projecteurs traditionnels, encore largement utilisés,



↑FIGURE 3
Répartition spectrale du rayonnement émis dans l'UV.

intègrent des lampes tungstène halogène et des lampes aux halogénures métalliques (HMI). Une grande partie de ces projecteurs sont classés en groupes de risque 2 (risque modéré) ou 3 (risque élevé) selon la norme EN 62471 [3], du fait de l'émission de rayonnements ultraviolets et infrarouges. Or, une nouvelle génération de projecteurs à LED est apparue ces dernières années. Ceux-ci n'émettent pas de rayonnements dans les domaines ultraviolet et infrarouge et sont de fait classés dans des groupes de risque moindre.

Limitation de la durée et de l'intensité des expositions

La réduction de l'exposition aux ROA peut, dans certains cas, passer par la limitation de la durée d'exposition. Ainsi, pour certaines valeurs limites, le fait de diviser par deux le temps d'exposition conduit à un niveau d'exposition réduit de moitié. Mais ce raisonnement ne fonctionne pas concernant certaines VLE. Par exemple, pour la « lumière bleue » correspondant à la gamme de longueurs d'onde 300 – 700 nm, il existe une valeur seuil de 10 000 s au-delà de laquelle la VLE reste la même : le fait de réduire la durée d'exposition de 8 heures à 3 heures (10 800 s) n'a donc aucun effet sur la réduction du niveau d'exposition. De la même façon, il existe une VLE dans l'infrarouge dont la valeur seuil est de 1 000 s.

Concernant l'intensité de l'exposition, il convient de se poser la

question de la pertinence de la puissance des sources et de leur nombre : a-t-on besoin d'un équipement de cette puissance ou un équipement émettant moins pourrait-il convenir ? Peut-on réduire le nombre de sources ? Pour certaines valeurs limites exprimées en éclairement, diviser par deux le nombre de sources conduit à un niveau d'exposition réduit de moitié. Mais, dès lors qu'il s'agit de valeurs limites en luminance, comme celle pour la « lumière bleue » et celle pour le « visible infrarouge » (380 - 1 400 nm), la réduction du nombre de sources n'a pas d'effet sur le niveau d'exposition.

Enfin, l'augmentation de la distance entre la source et le salarié permet, dans de nombreux cas, de réduire le niveau d'exposition : si la distance est multipliée par deux, l'exposition est divisée par quatre (Cf. Figure 4). Cependant, pour les sources collimatées telles que les lasers, le risque reste identique quelle que soit la distance à la source.

Conception des lieux et des équipements de travail

Les locaux et les équipements de travail doivent être conçus pour éviter la propagation des rayonnements optiques nocifs, en prenant en compte les divers modes de propagation : soit directe, soit par réflexion spéculaire (effet miroir), soit par réflexion diffuse (Cf. Figure 5).

Les rayonnements seront confinés dans des équipements de travail équipés de capots ou d'écrans garantissant un niveau d'exposition inférieur aux VLE. L'ouverture d'un capot ou d'une porte permettant l'accès à l'intérieur de l'équipement doit être conditionnée à la mise hors tension de la source, à l'aide de systèmes de verrouillage (l'ouverture de la porte coupe l'alimentation de la lampe) ou d'inter-verrouillage (la porte ne peut pas s'ouvrir tant que la lampe est allumée). Il peut être nécessaire de temporiser l'ouverture afin de permettre la dissipation de l'énergie accumulée (chaleur par exemple).

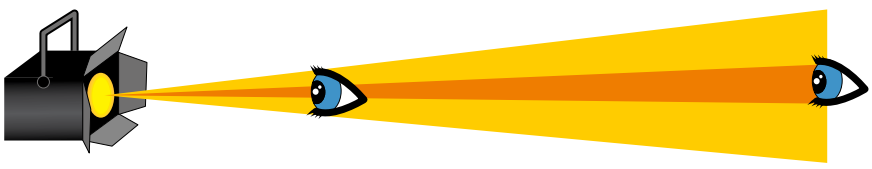
Lorsque le confinement ne peut pas être réalisé au niveau de l'équipement ou du poste de travail, certaines sources très dangereuses peuvent nécessiter d'être situées dans des locaux spécifiques, fermés, dont l'accès est contrôlé et n'est autorisé qu'au personnel habilité. Cela peut être le cas, par exemple, pour certaines installations utilisant des lasers. L'entrée dans ces locaux peut être conditionnée à la mise hors tension de la source, à l'aide de systèmes de verrouillage ou d'inter-verrouillage installés sur les portes d'accès.

Pour des risques moindres, il est possible de limiter les zones à l'aide de cloisons ou d'écrans en s'assurant qu'ils absorbent suffisamment les rayonnements nocifs. Par exemple, pour isoler les postes de soudage, il est possible d'utiliser des écrans ou des rideaux conformes à la norme EN ISO 25980 [4].

L'utilisation de surfaces réfléchissantes doit être évitée : les couleurs et les matériaux des murs et les équipements de l'environnement de travail doivent être choisis de façon qu'ils ne renvoient pas par réflexion les rayonnements à l'intérieur et l'extérieur de cette zone.

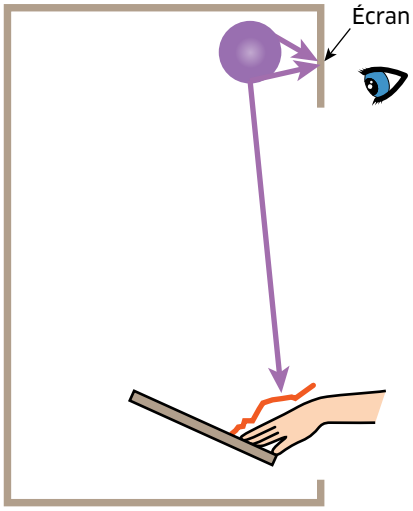
Maintenance des lieux et des équipements de travail

Les équipements de travail doivent être maintenus en état afin de garantir leur niveau de sécurité.

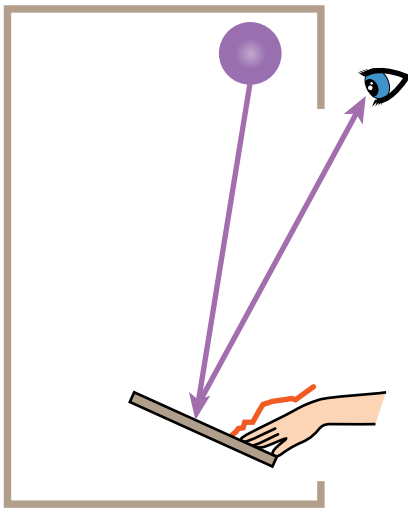


↑FIGURE 4
Influence de la distance source/œil.

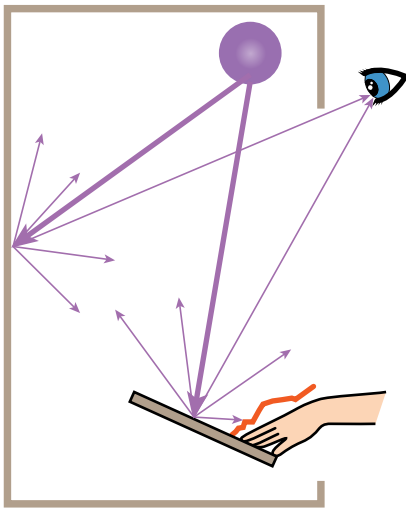
↓FIGURE 5
Différents modes de propagation des rayonnements optiques.



Propagation directe



Réflexion spéculaire



Réflexion diffuse

Ils doivent être inspectés afin de détecter toute fuite optique au niveau des capots et écrans du fait de l'usure, de la détérioration ou d'une mauvaise remise en place. Il est nécessaire de s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs de verrouillage ou d'inter-verrouillage, des temporisations d'ouverture.

Pendant les interventions, les sources de rayonnement doivent être éteintes et, si nécessaire, il faudra mettre en œuvre tout dispositif de consignation empêchant la remise accidentelle sous énergie pendant l'intervention.

Lors du remplacement d'une source de rayonnement, il faut vérifier que la nouvelle source approvisionnée a la même référence ou des caractéristiques identiques en termes de puissance émise et de gamme de longueurs d'onde émises. On se reportera aux informations fournies par le fabricant de l'équipement de travail. Par exemple, on a pu constater que parfois des lampes actiniques pour désinsectiseurs sont remplacées par erreur par des lampes germicides émettant des rayonnements UVC très dangereux.

Les capots et les écrans doivent être remis en place après intervention, ceux qui sont détériorés doivent être changés. On voit quelquefois des systèmes d'éclairage à lampes halogène ou à décharge, sur lesquels le filtre de protection en verre, destiné à filtrer les UV et à protéger de l'explosion de la lampe, est absent car cassé ou non remis en place.

Information et formation – signalisation

Les travailleurs susceptibles d'être exposés à des ROA dépassant les VLE doivent recevoir l'information et/ou la formation adaptée au niveau de risque, portant sur les points suivants :

- les sources situées sur les lieux de travail ;
- les risques pour la santé résultant d'une exposition excessive ;
- les résultats de l'évaluation des risques ;
- les précautions pour assurer sa propre protection et celle des autres ;
- la bonne utilisation des équipements de travail et de protection individuelle ;
- la conduite à tenir en cas d'accident ;
- la détection des effets nocifs d'une exposition ;
- les conditions de surveillance médicale.

Ces éléments doivent, le cas échéant, figurer sur une notice de poste établie par l'employeur.

En outre, il convient d'informer du danger par une signalisation permanente et, si nécessaire, par tout système lumineux ou sonore indiquant une source en fonctionnement.

Équipements de protection individuelle

Lorsque toutes les solutions de prévention des risques et de protection collective ont été épuisées et que des risques résiduels persistent, les travailleurs doivent se protéger des rayonnements en utilisant, en dernier recours, des équipements de protection individuelle (EPI). Ces équipements doivent être choisis en fonction de la source de rayonnement, en tenant compte de la gamme de longueur d'onde et de l'intensité des rayonnements émis.

Concernant la protection des yeux, dans la grande majorité des situations, il est possible de s'appuyer sur une classification normalisée pour choisir l'EPI approprié. La norme EN 166 [5] donne des spécifications générales pour les équipements de protection individuelle de l'œil. Ce sont les lunettes à branches ou les lunettes masques, utilisables lorsque seule la zone oculaire doit être protégée, et les écrans faciaux pour une protection complète du visage. L'EN 166 s'appuie sur cinq autres normes concernant les caractéristiques de filtration des oculaires (Cf. Tableau) :

- EN 169 [6] pour les oculaires de soudage ou EN 379 [7] pour les écrans de soudages commutables ;
- EN 170 [8] pour les oculaires contre les rayonnements ultraviolets ;
- EN 171 [9] pour les écrans contre les rayonnements infrarouges ;

	NORME	N° ÉCHELON	GAMME DE LONGUEURS D'ONDE
FILTRES DE SOUDAGE	EN 169 EN 379	1,2 à 16	210 nm – 1400 nm
FILTRES UV	EN 170	2-1,2 à 2-5	210 nm - 780 nm
FILTRES IR	EN 171	4-1,2 à 4-10	380 nm – 2000 nm
FILTRES SOLAIRES (USAGE INDUSTRIEL)	EN 172	5-1,1 à 5-4,1 ou 6-1,1 à 6-4,1	280 nm – 780 nm ou 280 nm – 2000 nm

↑TABLEAU

Normes des filtres de protection de l'œil.

• EN 172 [10] pour les oculaires solaires à usage professionnel.

Ces normes spécifient des classes de protection, données par des numéros d'échelon : plus celui-ci est élevé, plus le pouvoir de filtration de l'écran est important. Selon les situations, il convient de choisir un écran conforme à la norme correspondant à la source de rayonnement et ayant un numéro d'échelon approprié à l'intensité de cette source. Le guide ED 798 [11] de l'INRS peut aider à ce choix.

Par ailleurs, il existe deux normes pour les lunettes de protection contre les rayonnements laser :

• EN 207 [12] : elle s'applique aux protecteurs de l'œil utilisés contre l'exposition accidentelle aux rayonnements laser dans le domaine spectral compris entre 180 nm (0,18 µm) et 1 000 µm ;

• EN 208 [13] : elle s'applique aux filtres et aux lunettes utilisés pour les travaux de réglage des lasers et des systèmes laser dont le rayonnement dangereux se produit dans le domaine spectral visible compris entre 400 nm et 700 nm.

Concernant la protection de la peau, elle est en grande partie assurée par les vêtements de travail. Les parties les plus exposées restent le visage, la tête, le cou et les mains. Certains gants permettent de protéger les mains contre les ROA, comme les gants pour soudeurs. Le visage et le cou peuvent être protégés par des écrans faciaux et la tête par un casque (Cf. Figure 6). ●

↓FIGURE 6

Un soudeur équipé d'un masque de protection et de gants.

© Vincent Nguyen pour l'INRS

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 89/391/CEE du Conseil, du 12 juin 1989, concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail. JO L 183 du 29.6.1989, pp. 1-8.

[2] Parlement européen 2006 Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). *J. Off.*, pp. 38–59.

[3] EN 62471 : 2008 - Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2008, 46 p.

[4] NF EN ISO 25980 : Hygiène et sécurité en soudage et techniques connexes - Rideaux, lanières et écrans transparents pour les procédés de soudage à l'arc. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2014, 8 p.

[5] NF EN 166 : 2002 - Protection individuelle de l'œil - Spécifications. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2002, 16 p.

[6] NF EN 169 : 2003 - Protection individuelle de l'œil - Filtres pour le soudage et les techniques connexes - Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2003, 16 p.

[7] NF EN 379 : 2004 - Protection individuelle de l'œil – Filtres de soudage automatique. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2004, 25 p.

[8] NF EN 170 : 2003 - Protection individuelle de l'œil – Filtres pour l'ultraviolet - Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2003, 13 p.

[9] NF EN 171 : 2002 - Protection individuelle de l'œil – Filtres pour l'infrarouge - Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2002, 12 p.

[10] NF EN 172 : 1995 - Protection individuelle de l'œil – Filtre de protection solaire pour usage industriel. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 1995, 15 p.

[11] Les équipements de protection individuelle des yeux et du visage – Choix et utilisation. INRS, ED 798, 2009, 40 p., disponible sur www.inrs.fr

[12] NF EN 207 : 1995 - Protection individuelle de l'œil – Filtre de protection solaire pour usage industriel. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 1995, 15 p.

[13] NF EN 208 : 1995 - Protection individuelle de l'œil – Filtre de protection solaire pour usage industriel. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 1995, 15 p.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Équipements de protection contre les risques dus aux LED d'éclairage

Patrice Marchal INRS, département Ingénierie des équipements de travail

La vérification de la fabrication et la maintenance des LED d'éclairage nécessitent un contrôle visuel pendant que celles-ci sont en fonctionnement. Leur luminance étant très élevée, les opérateurs doivent se protéger lors de cette observation. L'INRS a mené une étude portant sur l'adéquation des protecteurs de l'œil à l'exposition aux LED d'éclairage, afin d'indiquer aux utilisateurs et aux entreprises les moyens de protection les mieux adaptés.

La vérification de la fabrication et la maintenance des LED d'éclairage nécessitent un contrôle visuel pendant que celles-ci sont en fonctionnement. Leur luminance lumineuse étant très élevée, les opérateurs doivent se protéger lors de cette observation [1-3] et aucune norme ni spécification en lien direct avec les LED d'éclairage ne permet de garantir l'efficacité des protecteurs. Le danger principal des émissions lumineuses des LED réside dans la lumière bleue.

Existe-t-il des protecteurs permettant de se protéger contre le rayonnement nocif bleu des LED ? Pour répondre à cette question, 40 filtres ont été mesurés et évalués par rapport à trois sources de LED aux températures de couleurs différentes. L'objectif de cette étude était de pouvoir établir quel protecteur protège de quelle source de LED d'éclairage et de fournir quelques préconisations qui pourront être transmises au comité de normalisation des équipements de protection de l'œil.

LES SPECTRES D'ÉMISSION DES LED

Pour cette étude, trois LED d'éclairage ont été utilisées. La figure 1 montre les trois spectres d'émission avec les trois températures de couleur chaude, froide et intermédiaire, représentant la majorité des LED d'éclairage commercialisées. La bande de longueur d'onde qui nous préoccupe est encadrée en gris. C'est la zone d'émission spectrale nocive des LED pour l'œil aussi appelée lumière bleue.

LES SPECTRES DE TRANSMISSION DE DIFFÉRENTS PROTECTEURS

Les 40 filtres de protection ont été mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre. Ces échantillons sont des

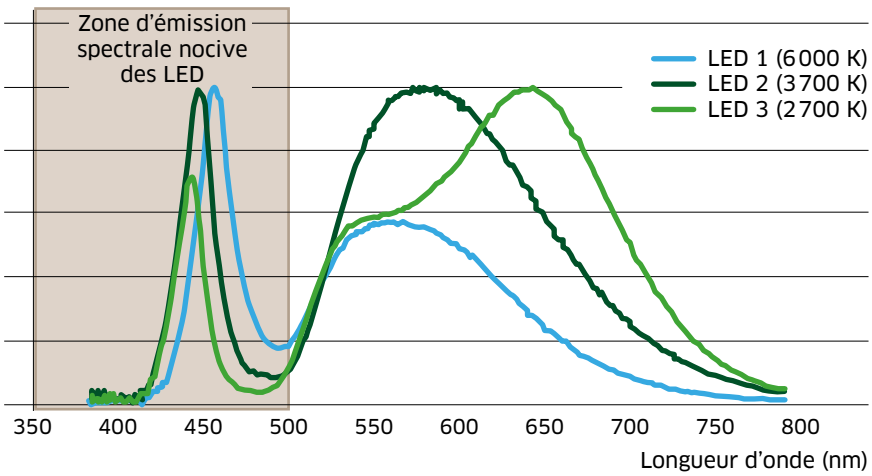


FIGURE 1→
Spectres d'émission des LED.

oculaires orange, jaunes, gris, de soudage, de protection laser, des filtres UV et des filtres « bleu coupé » vendus spécifiquement pour couper la lumière bleue. Ce sont également des rideaux de soudage de différentes teintes et transparents et des filtres à poser sur les vitres.

La figure 2 montre quelques exemples de courbes de transmission spectrale des filtres évalués.

Graphiquement, nous constatons que les caractéristiques des filtres évalués sont hétérogènes, en particulier vis-à-vis de la lumière bleue nocive pour l'œil mise en exergue par la zone grise. Un rideau de soudage teinté représenté par la courbe bleu foncé coupe la lumière bleue, de même qu'un filtre orange représenté par la courbe orange. En revanche, un filtre gris représenté par la courbe verte ne coupe pas toute la lumière bleue.

MÉTHODOLOGIE

L'objectif de la méthode est d'évaluer l'efficacité des filtres en fonction de la LED d'éclairage à observer afin de déterminer quel protecteur est adapté à quelle LED. Pour y parvenir, nous cherchons la luminance lumineuse maximale $L_{vis(Led\ limite)}$ qu'il est possible d'observer sans danger au travers du filtre (Cf. Figure 3).

La méthode schématisée à la figure 3 est la suivante :

a. le spectre d'émission L_λ de la LED considérée est multiplié par la fonction de pondération de la lumière bleue $B(\lambda)$ pour donner la luminance énergétique efficace bleue L_B :

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda . B(\lambda) . \Delta\lambda$$

b. la luminance énergétique efficace bleue $L_{B(filtré)}$ de la LED observée, au travers du filtre avec un facteur de transmission spectral $T(\lambda)$, est obtenue par :

$$L_{B\,(filtré)} = \sum_{300}^{700} L_\lambda . B(\lambda) . T(\lambda) . \Delta\lambda$$

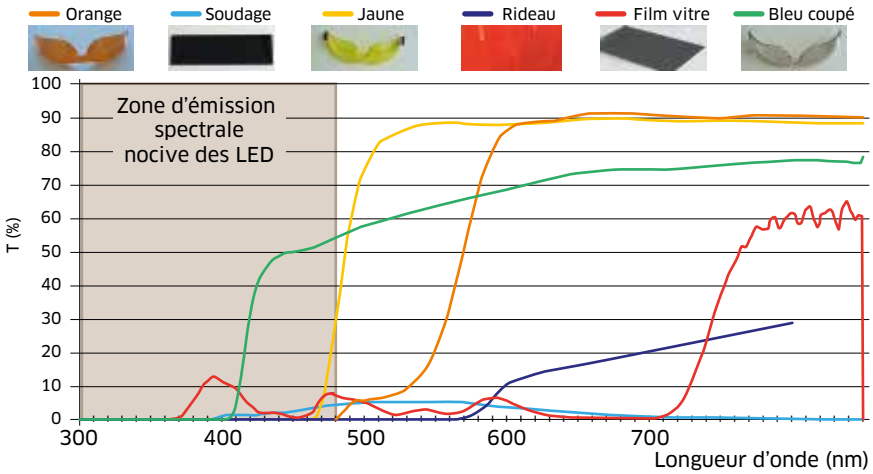
Le facteur spectral de transmission $\tau(\lambda)$ d'un filtre est le rapport, pour chaque longueur d'onde λ, du flux énergétique efficace transmis au flux énergétique efficace incident ;

c. selon la norme EN 62471 [4], la valeur limite d'exposition (VLE) correspondant au groupe de risque 0 (sans risque) est fixée à 100 $W.m^{-2}.sr^{-1}$;

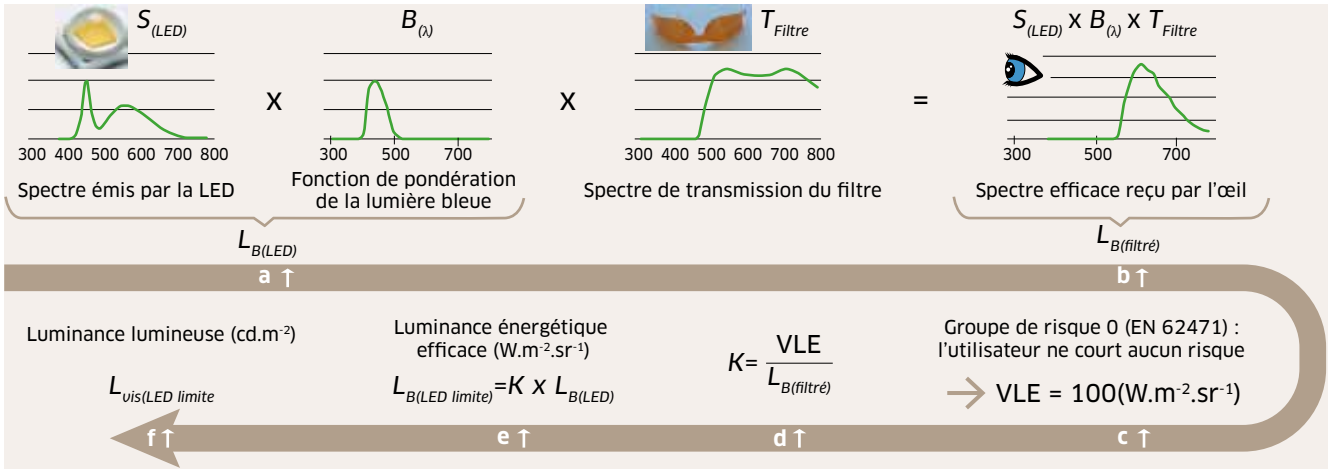
d. il s'agit donc de la valeur maximale que peut atteindre $L_{B(filtré)}$ si on veut observer la LED sans risque. Cette VLE divisée par $L_{B(filtré)}$ permet de déterminer un cœfficient K :

$$K = \frac{VLE}{L_{B(filtré)}}.$$

e. ce cœfficient K multiplié par la luminance énergétique efficace



↑FIGURE 2
Exemples de spectres de transmission de filtres.



↑FIGURE 3
Schéma du principe de détermination de la luminance lumineuse maximale $L_{vis(Led\ limite)}$ qu'il est possible d'observer sans danger au travers d'un filtre.

bleue L_B de la LED permet de déterminer la luminance énergétique efficace bleue maximale $L_{B\ (LED,\ Limite)}$ de la LED qu'il est possible d'observer au travers du filtre considéré ;
f. cette luminance énergétique efficace bleue maximale $L_{B\ (LED,\ Limite)}$ permet de déduire la luminance lumineuse maximale de la LED ($L_{vis\ (LED,\ Limite)}$), information disponible chez les fabricants de LED.

RÉSULTATS

L'analyse de la luminance lumineuse maximale d'une LED, qu'il est possible d'observer au travers des filtres considérés, a montré que l'influence de la température de couleur de la LED était négligeable (< 5 %). Par conséquent, seule la LED avec une température de couleur de 3 700 K est représentée sur la figure 4.
La LED type chips, représentée dans le cadre rouge, se rencontre en phase de fabrication. Ces types de LED, représentées dans le cadre vert, sont intégrés dans un luminaire qui limite leur luminance.
La figure 4 est décomposée en deux parties :

- à gauche, les équipements de protection collective qu'il faut privilégier lors du déverminage des LED en fabrication ;
- à droite, les équipements de protection individuelle, utilisés sur site par exemple ou quand les protecteurs collectifs ne peuvent être employés.

La ligne verte représente la luminance d'une LED installée dans un luminaire tertiaire, de luminance égale à 10^6 cd/m² et la ligne rouge une LED type chips avec une luminance égale à 10^8 cd/m².
Nous constatons que, quel que soit le type de LED étudiée, il existe des protecteurs adaptés. La protection obtenue avec les rideaux de soudage teintés est adaptée au déverminage des LED en fabrication : la luminance énergétique efficace variant de 10^8 à 10^{10} cd/m². En revanche, pour les rideaux transparents ou les films à coller sur les vitres, le niveau de protection doit être analysé avant utilisation en tant que protection.
Les oculaires de couleur orange, souvent employés pour observer les LED d'éclairage, ont des niveaux de protection variant dans un rapport de 1 à 1 000. Il en va de même pour les écrans de soudage : selon la teinte, c'est-à-dire le numéro d'échelon, leur efficacité varie dans ces mêmes proportions. Par exemple, un filtre de soudage avec un numéro d'échelon 11 protège de la lumière bleue émise par une LED d'éclairage qui a une luminance maximale de 10^9 cd/m². De même, les écrans « bleu coupé » conviennent pour se protéger de la lumière bleue émise par les écrans de type console de jeu ou moniteur comme défini par les fabricants mais ne sont pas suffisamment efficaces pour éliminer tout risque lors de l'observation des LED d'éclairage. L'oculaire de protection contre la lumière émise par les lasers rouges peut protéger contre la lumière bleue émise par les LED installées dans des luminaires du secteur tertiaire, jusqu'à une luminance lumineuse maximale de 10^7 cd/m². Les oculaires jaunes et gris présentent un même niveau de protection, qu'il sera nécessaire d'évaluer en fonction de la LED à observer.

COMPARAISON DU FACTEUR GLOBAL DE TRANSMISSION DANS LE VISIBLE AVEC LE FACTEUR DE TRANSMISSION DANS LE BLEU

Pour choisir un équipement de protection individuel (EPI) efficace contre les rayonnements optiques, l'utilisateur dispose du numéro d'échelon, inscrit sur cet EPI. Le numéro d'échelon est déterminé à partir du facteur global de transmission

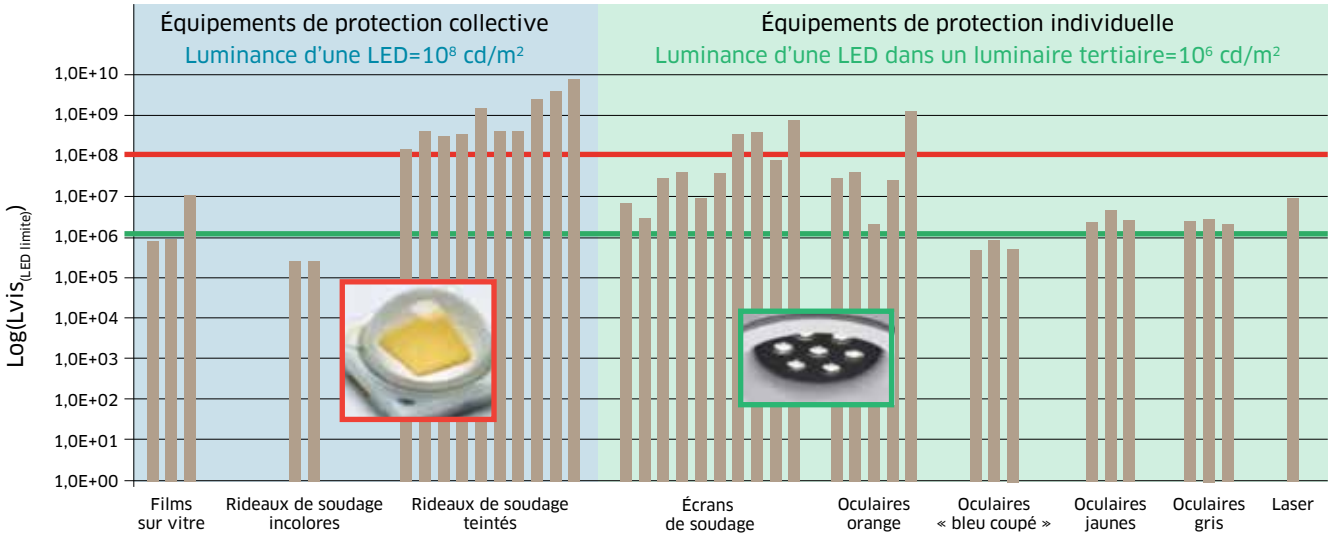


FIGURE 4
Luminance lumineuse maximale d'une LED de température de couleur 3 700 K, qu'il est possible d'observer au travers des filtres considérés.

du filtre dans le visible τ_v, selon EN 165 [4].
L'objectif de cette comparaison est donc de vérifier si ce facteur de transmission global dans le visible est un critère suffisant et pertinent pour choisir l'EPI adapté à l'observation d'une LED d'éclairage à la place du facteur global de transmission dans le bleu.
Le facteur global de transmission dans le visible τ_v est défini par :

$$\tau_v = \frac{\int_{380nm}^{780nm} \phi_e(\lambda).\tau(\lambda).V(\lambda).d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} \phi_e(\lambda).V(\lambda).d\lambda}$$

Avec $\phi_e(\lambda)$ le flux énergétique spectrique incident, d'un illuminant normalisé :
- D 65 pour EN 172 [5] et EN 1836[6] : lumière naturelle,
- A pour EN 166 [7], EN 169 [8] et EN 170 [9] : lampe halogène.

En s'inspirant du facteur global de transmission efficace de la lumière bleue solaire défini dans la norme EN 1836, nous avons calculé un facteur global de transmission efficace dans le bleu τ_b :

$$\tau_b = \frac{\int_{300nm}^{500nm} D_{65}(\lambda).\tau(\lambda).B(\lambda).d\lambda}{\int_{300nm}^{500nm} D_{65}(\lambda).B(\lambda).d\lambda}$$

En remplaçant l'illuminant normalisé D65 par le spectre de la LED de notre étude, le facteur global de transmission efficace dans le bleu devient :

$$\tau_b = \frac{\int_{300nm}^{500nm} L_\lambda(\lambda).\tau(\lambda).B(\lambda).d\lambda}{\int_{300nm}^{500nm} L_\lambda(\lambda).B(\lambda).d\lambda}$$

La comparaison entre le facteur global de transmission dans le visible τ_v et le facteur de transmission dans le bleu τ_b pour chacun des filtres utilisés lors de notre étude est représentée à la figure 5. Elle semble montrer qu'il n'existe pas de corrélation linéaire entre ces deux facteurs. Les cœfficients R^2 indiquent que les équations de droite de régression déterminent seulement 45 % et 38 % des distributions selon l'illuminant et donc que les modèles mathématiques linéaires n'expliquent pas la distribution de points. Ce qui signifie qu'il n'existe pas de corrélation linéaire.
En conclusion, le facteur global de transmission dans le visible ne peut être utilisé directement pour choisir l'EPI adapté à l'observation d'une LED d'éclairage.

COMPARAISON DE τ_b CALCULÉ AVEC DIFFÉRENTS ILLUMINANTS

La gestion d'un illuminant est très contraignante pour la normalisation et pour les organismes certificateurs. Nous avons donc évalué la possibilité de calculer le facteur de transmission efficace dans le bleu en utilisant un illuminant déjà normalisé, c'est-à-dire l'illuminant A ou D65, à la place de la source d'émission de la LED d'éclairage utilisée.
Nous comparons :
- $\tau_{b\ «\ illuminant\ spectre\ LED,\ B(\lambda)\ »}$: le facteur global de transmission dans le bleu calculé avec la source d'émission spécifique de la LED et la fonction de pondération dans le bleu, avec
- $\tau_{b\ «\ illuminant\ normalisé,\ B(\lambda)\ »}$: les facteurs de transmission dans le bleu calculés avec les illuminants A et D65 normalisés et la fonction de pondération dans le bleu.

La figure 6 semble montrer une bonne corrélation linéaire quel que soit l'illuminant. Les cœfficients R^2

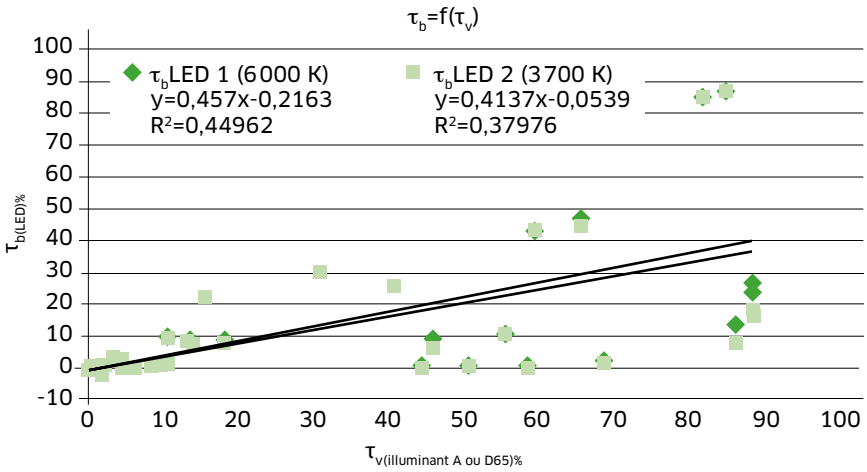


FIGURE 5
Facteur global de transmission dans le bleu en fonction du facteur global de transmission dans le visible.

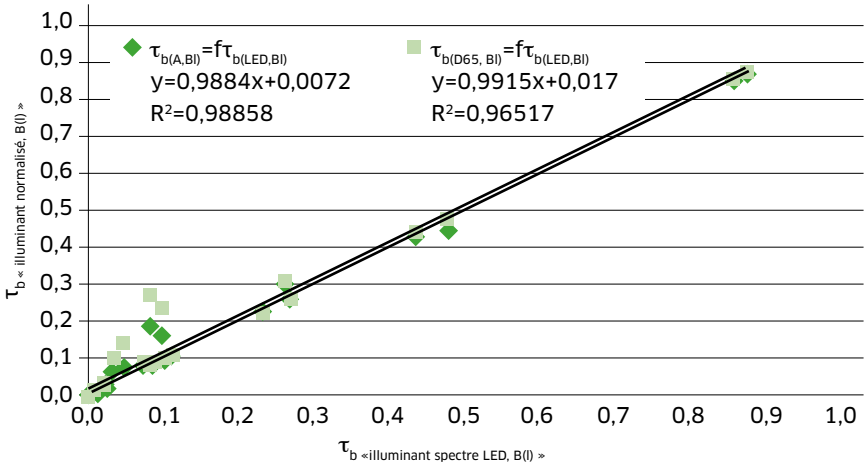


FIGURE 6
$\tau_{b\ «\ illuminant\ normalisé,\ B(l)\ »}$ en fonction de $\tau_{b\ «\ illuminant\ spectre\ LED,\ B(l)\ »}$.

indiquent que les équations de droite de régression déterminent 98% et 99% des distributions. Les paramètres a et b des équations de droite calculés sont ceux qui déterminent les distributions des points. De plus, ces paramètres a et b sont respectivement proches de 1 et 0.
Au niveau de confiance de 95%, il y a identité entre $\tau_{b\ «\text{illuminant spectre LED, B(l)}»}$ et $\tau_{b\ «\text{illuminant normalisé, B(l)}»}$: il est donc envisageable d'utiliser un illuminant déjà normalisé pour le calcul du facteur de transmission efficace de la lumière bleue des LED.
À la suite de ce constat, les organismes de contrôle ainsi que les fabricants pourraient rapidement obtenir, à l'aide d'un simple calcul supplémentaire, le facteur global de transmission dans le bleu. Sachant que le risque «lumière bleue» ne concerne pas que les LED, le calcul de τ_b pourrait être étendu à toutes les normes de protection [4, 6-10] contre les rayonnements optiques. Le comité de normalisation pourrait alors envisager la création d'un numéro d'échelon spécifique à la lumière bleue calculé à partir d'un illuminant déjà normalisé.

CONCLUSION

À la suite de l'analyse de 40 filtres protection, nous pouvons affirmer qu'il existe des protecteurs adaptés à la vision des LED d'éclairage. La démarche de prévention privilégie les équipements de protection collective lors du déverminage des LED en fabrication, par exemple les rideaux de soudage teintés ou les films à coller sur les vitres. Pour la maintenance des LED d'éclairage sur site, les EPI tels que les filtres orange, jaunes ou de protection Laser peuvent convenir: il est nécessaire de s'assurer que le niveau de protection est adapté à la luminance lumineuse de la LED d'éclairage.
Cette étude a montré que le facteur global de transmission dans le visible «τ_v» ne permet pas de choisir le protecteur efficace contre la lumière émise par la LED observée. Il est nécessaire de calculer un facteur global de transmission de la lumière bleue «τ_b» pour caractériser le protecteur adapté contre la lumière bleue émise par la LED considérée.
Une comparaison du facteur global de transmission efficace de la lumière bleue, calculé avec les illuminants «A» et «D65», avec le facteur de transmission efficace de la lumière bleue, calculé avec la source d'émission de la LED en tant qu'illuminant, a montré une corrélation significative. Il est donc possible d'utiliser des illuminants déjà normalisés pour le calcul de «τ_b», et ainsi éviter de créer un nouvel illuminant, toujours difficile à gérer.
Enfin, si vous ne connaissez ni la luminance énergétique efficace bleue de votre LED, ni la luminance visible, ni le facteur global de transmission de la lumière bleue du protecteur, il vous reste un moyen simple et pratique pour choisir le protecteur qui vous protégera de la LED d'éclairage blanche à observer: si vous n'êtes pas ébloui lorsque vous observez la LED, alors vous pouvez considérer qu'il n'y a pas de risque lié à la lumière bleue émise par celle-ci. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Parlement européen. Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). *Journal Officiel.* 27 avril 2006, pp. 38-59.

[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, texte 11.

[3] Anses, Saisine n° « 2008-SA-0408 », Rapport d'expertise collective « Comité d'experts spécialisés (CES): agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED), octobre 2010, 282 p.

[4] NF EN 165: 1995. Protection individuelle de l'œil – Vocabulaire. Afnor, 37 p.

[5] NF EN 62471: 2008. Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. Afnor, 46 p.

[6] NF EN 172: 1995. Protection individuelle de l'œil – Filtre de protection solaire pour usage industriel. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 1995, 15 p.

[7] NF EN 1836: 2006. Protection individuelle de l'œil – Lunettes solaires et filtres de protection contre les rayonnements solaires pour usage général et filtres pour observation directe du soleil. Afnor, 45 p.

[8] NF EN 166: 2002. Protection individuelle de l'œil – Spécifications. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2002, 16 p.

[9] NF EN 169: 2003. Protection individuelle de l'œil – Filtres pour le soudage et les techniques connexes – Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. La Plaine- Saint-Denis, Afnor, 2003, 16 p.

[10] NF EN 170: 2003. Protection individuelle de l'œil – Filtres pour l'ultraviolet – Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. La Plaine-Saint-Denis, Afnor, 2003, 13 p.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

L'organisation de la prévention du risque laser au CNRS

Yann Auger Chargé de mission Prévention des risques ROA, CNRS (aujourd'hui, ingénieur-sécurité au Centre français de la recherche aéronautique, spatiale et de défense - Onera)

Dans les laboratoires de recherche du CNRS, les rayonnements lasers sont utilisés de multiples manières et créent autant de situations à risques pour les utilisateurs. Ainsi, il s'est avéré nécessaire de renforcer l'organisation de la prévention tant techniquement qu'administrativement afin d'y intégrer les spécificités de ce type de risque.

Comme tout établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), le CNRS entre dans le champ d'application du décret 82-453 du 28 mai 1982 [1] modifié relatif à l'hygiène et la sécurité ainsi qu'à la prévention médicale dans la fonction publique. À ce titre, la quatrième partie du Code du travail traitant de la santé et de la sécurité au travail s'applique.

En complément des dispositions prévues par le Code du travail [2], un des principes de l'organisation de la prévention des risques mis en œuvre au CNRS est de placer auprès de toute fonction de décision au sein de l'établissement, une fonction d'assistance et de conseil en matière de prévention des risques professionnels (assistant ou conseiller de prévention).

Au CNRS, ce principe est repris depuis 1974 dans les instructions internes relatives à l'hygiène et la sécurité et à la médecine de prévention [1], avec le tableau 1.

En complément, des chargés de mission sur certaines thématiques (biologie, nanoparticules, chimie, rayonnements optiques artificiels [ROA], logiciel « document unique », rayonnements ionisants) sont désignés parmi les ingénieurs régionaux de prévention et de sécurité (IRPS), du fait de leurs compétences spécifiques.

LE CONTEXTE D'INTERVENTION DU CHARGÉ DE MISSION ROA FACE AU RISQUE LASER

Sur les plus de 1 100 unités de recherche rattachées au CNRS, environ 350 sont particulièrement concernées par le risque laser.

Au vu de ce nombre important, toutes les conditions d'utilisation envisageables sont rencontrées, allant de la « simple » utilisation du laser comme outil pour un programme de recherche (microscopie, scanning 3D, télécommunication…) au développement d'appareils laser d'exception (Apollon [3] par exemple).

Cette réalité implique donc une multitude de situations d'exposition des agents au risque laser et occasionne une dizaine d'évènements (accident ou incident) significatifs par an.

Afin d'accompagner au mieux les laboratoires, et dans le cadre des évolutions réglementaires (décret 2010-750 [2]), le CNRS a décidé, en 2012, de nommer un chargé de mission à la prévention des risques liés aux rayonnements optiques artificiels. Sa principale mission est d'apporter une expertise et des compétences dans la prévention de l'exposition des personnels aux rayonnements optiques artificiels :

- au niveau national, en contribuant à l'élaboration de la politique de prévention et de sécurité dans ce domaine et en proposant la mise en œuvre d'actions de formation, la rédaction de procédures et la

	NATIONAL	RÉGIONAL	LOCAL
Décision	Président Directeur général délégué aux ressources Directeurs d'Institut	Délégué régional	Directeur d'unité
Conseil	Coordonnateur national de prévention et de sécurité	Ingénieur régional de prévention et de sécurité	Assistant de prévention
Médecine	Coordonnateur national de médecine de prévention	Médecin animateur régional Médecin de prévention	
Contrôle		Inspection santé et sécurité au travail	
Dialogue social	Comité technique Comité central d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail	Comité régional d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail	Instance locale de concertation en hygiène, sécurité et conditions de travail Conseil d'unité

↑TABLEAU 1
L'organisation de la prévention des risques au CNRS.

production de documents à l'usage des unités ;
- au niveau régional, en apportant une assistance aux délégations :
  - sur les questions relatives à ce risque, concernant aussi bien les installations techniques que les protocoles expérimentaux,
  - en participant aux actions de formation,
  - en intervenant directement au sein des unités de recherche, à la demande des délégués régionaux et/ou des IRPS, en appui aux IRPS.

Il doit également participer à l'analyse de la réglementation et assurer la liaison entre le CNRS (en collaboration avec les structures internes impliquées dans ce sujet) et les organismes extérieurs concernés.

LA STRUCTURATION DE L'UNITÉ

Le référent sécurité laser (RSL)

Dans le cadre de l'application de l'article R 4452-21 du Code du travail demandant à l'employeur qu'il dispose par lui-même ou parmi ses salariés de la compétence pour procéder à la gestion du risque laser, le CNRS recommande aux directeurs d'unité concernés de s'adjoindre les conseils d'un référent sécurité laser (RSL).

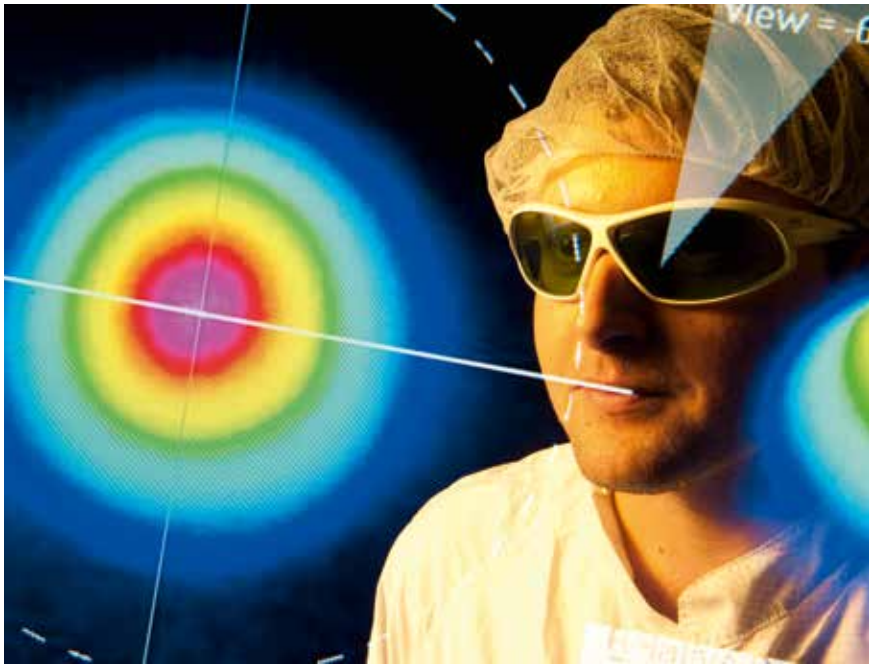
Le RSL est la fonction de base indispensable au bon déroulement de l'organisation de la prévention du risque laser au sein de l'unité. Son rôle est assimilable à celui d'un assistant de prévention (AP), spécifiquement dédié à la gestion du risque laser. Le RSL exerce donc ses missions de conseil sous l'autorité du directeur d'unité à qui il rend compte. Il ne dispose pas de pouvoir décisionnel sur l'organisation de la sécurité des activités scientifiques. L'identification d'un RSL ne modifie en rien les responsabilités de la chaîne hiérarchique.

Ses missions sont au nombre de six :

1. procéder à l'identification et à l'évaluation des risques laser en lien avec les responsables des manipulations ;
2. proposer les mesures de prévention dont la mise en place relèvera du responsable de la manipulation ;
3. mettre en place les notices de poste en lien avec les responsables des manipulations ;
4. coordonner l'accueil des nouveaux entrants qui devra être mis en œuvre par l'encadrant direct du

© Cyril Fresillon/CNRS

Banc optique générant le laser infrarouge initial de l'interféromètre Virgo, au laboratoire CNRS de Physique des particules d'Annecy-le-vieux. ➔



© Kaksonen/CNRS

↑ Mesure de la qualité spatiale d'un faisceau laser fondé sur une technologie cobrevetée par le CNRS.

nouvel arrivant, dans le domaine de la sécurité laser ;

5. animer, en relation avec les préventeurs de l'unité (AP, PCR…), la sensibilisation sur la sécurité laser au moins une fois par an ;
6. procéder à l'analyse des accidents mettant en cause un laser, en lien avec l'AP.

Pour assurer ce rôle, le CNRS conseille aux directeurs d'unité d'identifier une personne volontaire qui remplisse les conditions suivantes :

- faire partie du personnel « permanent » du laboratoire ;
- être aguerrie aux techniques lasers (profil d'opticien, laseriste…) ;
- disposer d'une formation spécifique initiale en matière de sécurité laser. Cette formation peut varier en fonction du profil du RSL.

Le suivi des agents

En complément des missions du RSL, le CNRS demande aux directeurs d'unité de garantir le suivi des agents susceptibles d'être exposés au risque laser en mettant en place des systèmes de type « habilitation » fondés, d'une part, sur la formation au risque délivrée par le RSL en interne et, d'autre part, sur la mise en place d'un suivi médical adapté.

LES OUTILS MIS À DISPOSITION

Afin de faciliter la mise en place de l'ensemble de ces démarches, le CNRS diffuse dans ses unités un « kit » de prévention du risque laser constitué de :

- une grille d'auto-audit de prévention du risque ;
- un modèle de lettre de mission pour le RSL ;
- une trame de documents de suivi des sources et des agents susceptibles d'être exposés ;
- un modèle de notice de poste et de fiche individuelle d'exposition aux ROA-laser ;
- un support de formation pour les nouveaux entrants susceptibles d'être exposés (également en anglais).

Enfin, le calcul des grandeurs de sécurité laser (valeur limite d'exposition [VLE], dimensionnement des écrans et des lunettes de sécurité) étant une tâche complexe et rarement réalisée dans les unités, il s'est avéré nécessaire de sécuriser cette phase importante dans la gestion du risque laser. Pour cela, le CNRS met à disposition de ses unités une application de calcul permettant de déterminer, entre autres, pour tout type de rayonnement optique artificiel, la VLE, la classe de risque et l'échelon des lunettes de sécurité.

En complément, afin de simplifier et d'uniformiser les pratiques et de s'adapter au mieux aux réalités d'un laboratoire de recherche, des formations de RSL sont délivrées en interne au niveau national.

Ces formations spécifiques accompagnent les actions de sensibilisation des utilisateurs dispensées dans les régions en collaboration avec les établissements partenaires du CNRS.

L'ensemble de cette organisation interne de la prévention du risque laser sera traduite, courant 2016, dans un cahier de prévention. ●

1. La dernière version de ces instructions date de 2012.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Décret 82-453 du 28 mai 1982 modifié relatif à l'hygiène et la sécurité ainsi qu'à la prévention médicale dans la fonction publique.

[2] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. J. Off. 4 Juillet 2010.: Texte 11.

[3] Koppe M. Apollon, un laser au zénith. CNRS. https://lejournal.cnrs.fr/articles/apollon-un-laser-au-zenith

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Comment mesurer un champ électromagnétique et évaluer l'incertitude de mesure ?

Emmanuel Nicolas Coordinateur technique en rayonnements ionisants et non ionisants, Bureau Veritas

La mesure des champs électromagnétiques permet de cartographier une zone de travail. Elle fournit des données qui, confrontées aux valeurs déclenchant l'action, permettent de déclarer la conformité d'un poste de travail. Comment ces mesures sont-elles réalisées ? Comment évaluer les incertitudes liées à ces mesures et comment les prendre en compte dans la déclaration de conformité ?

La directive 2013/35/UE couvre la gamme des fréquences de 0 Hz à 300 GHz, soit jusqu'à des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre. La mesure des champs magnétique, électrique et électromagnétique couvre un spectre relativement large de cette directive, puisque les moyens de mesures classiques de type « champmètre » permettent de prendre en compte les champs électromagnétiques jusqu'à environ 60 GHz en fonction de la sonde utilisée. Au-delà de cette fréquence, les sources industrielles et les émetteurs intentionnels sont très peu présents dans l'environnement professionnel.
Les trois types de sources de champs électromagnétiques que l'on peut rencontrer dans un environnement professionnel sont les sources intentionnelles produites par des antennes de télécommunications au sens large, les sources intentionnelles produites par des machines industrielles qui utilisent l'énergie des ondes électromagnétiques pour transformer la matière et, enfin, les sources non-intentionnelles produites par les machines en général.
La plupart du temps, les mesures des champs électromagnétiques permettent d'évaluer l'environnement d'un poste de travail et de confronter les résultats aux valeurs déclenchant l'action (VA) mentionnées dans la directive. Le respect de ces valeurs permet de prononcer la conformité d'un poste de travail. De façon inévitable, la question de l'évaluation des incertitudes associées aux mesures et leur prise en compte dans la déclaration de la conformité devient un sujet majeur pour la sécurité des travailleurs.

CHAMPS ÉLECTRIQUE, MAGNÉTIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique et, plus particulièrement, un champ électromagnétique ? Derrière cette notion, qui semble familière, intervient une physique qui se réfère à l'invisible, mais qui a été étudiée il y a plus d'un siècle par des physiciens comme Faraday, Maxwell et Hertz. Avant de parler des champs électrique, magnétique et électromagnétique, c'est avant tout la notion de champ dans l'espace qu'il faut définir. En physique, derrière un champ, se cachent des forces avec une intensité et une orientation définies. Un champ ne peut se matérialiser et se rendre « visible » que s'il agit sur de la matière. Concrètement, on peut observer les lignes de champs d'un aimant lorsqu'il est proche d'une feuille de papier recouverte de limaille de fer : le champ est présent mais invisible.

Comme dans le cas de l'aimant, un champ magnétique ou électrique induit des forces sur les particules, avec une intensité et une direction qui vont dépendre de leurs charges électriques et de leurs déplacements. Les équations de Maxwell nous disent que, si ces champs sont variables dans le temps, alors ils se couplent. Un champ magnétique variable ne peut exister sans un champ électrique variable associé. Le champ électromagnétique résulte de cette association et engendre une onde électromagnétique, appelée aussi rayonnement électromagnétique, qui va se propager dans l'espace à la vitesse de la lumière. Cette définition du champ électromagnétique montre que, pour détecter puis mesurer un champ, il est nécessaire de le rendre « visible » en utilisant un transducteur champ-courant ou champ-tension. La variation temporelle du champ constitue, dans le domaine fréquentiel, sa fréquence d'oscillation fondamentale. Cette fréquence peut être modulée pour transmettre de l'information (cas des ondes de radiodiffusion, télédiffusion et télécommunication). Elle peut être pulsée sous la forme d'un train d'impulsions de courte durée et répétitive (cas des ondes radar). Elle peut être émise de façon discontinue dans le temps par une machine qui utilise l'énergie radiofréquence pour transformer la matière (cas des soudeuses à haute fréquence HF). Plus largement, un champ électromagnétique variable couvre un spectre en fréquences plus ou moins étendu.

© Fabrice Dimier pour l'INRS

↑ Les rayonnements électromagnétiques émis durant une opération de soudage sont mesurés à l'aide d'un champmètre placé à proximité de l'axe.

Ainsi, les équipements industriels engendrent des champs électromagnétiques dans le domaine des basses fréquences, des fréquences intermédiaires et des hautes fréquences en fonction de leur mode de fonctionnement. L'appareil de mesure doit donc être adapté aux fréquences à mesurer.

MESURE DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La mesure permet de déterminer ou d'évaluer l'exposition des travailleurs soumis à des champs électromagnétiques. Elle doit être adaptée à chaque type de source en fonction de la nature du champ rayonné, de la ou des fréquences émises et de l'intensité du rayonnement. De ce fait, les champmètres large bande sont très utilisés en milieu professionnel. Ils sont constitués d'une sonde de mesure isotropique (omnidirectionnelle), adaptée à une gamme de fréquences (bande passante) et à l'intensité du champ électromagnétique (dynamique de mesure). L'évaluation consiste alors à cartographier une zone de travail par un ensemble de points de mesures représentatifs de l'emplacement du travailleur. En fonction de l'environnement à mesurer, il est possible d'utiliser une méthode de balayage en tenant la sonde à bout de bras ou une méthode point par point en utilisant un trépied. Dans la pratique, le champ diminuant avec la distance, on commencera toujours par une mesure loin de la source pour s'en rapprocher au fur et à mesure.

Les sources intentionnelles, comme les antennes de télécommunication, ont des caractéristiques de rayonnements connues et maîtrisées pour atteindre un objectif de couverture géographique d'un service (radio, télévision ou téléphonie mobile). Pour ce type de source, les mesures aux postes de travail sont généralement réalisées à l'aide d'un champmètre large bande équipé d'une sonde de champ électrique adaptée à la plage des fréquences à mesurer. Les résultats peuvent être approfondis par des mesures sélectives en fréquence à l'aide d'un analyseur de spectre compatible avec des champs électriques élevés (afin d'éviter tout problème d'incompatibilité électromagnétique). Certaines applications liées aux faisceaux hertziens nécessitent des mesures jusqu'à 60 GHz. Les mesures à proximité des radars sont très délicates car les signaux sont de type impulsionnel et la plupart des sondes à diode des champmètres ne sont généralement pas adaptées et restent « aveugles » à ces signaux, compte tenu des impulsions de très courte durée. Il est préférable de prendre une sonde à thermocouple qui permet une mesure de la « valeur efficace vraie » du champ électrique.

Les sources industrielles intentionnelles comme les fours à induction, les presses à haute fréquence (HF) et les fours à micro-ondes utilisent l'énergie radioélectrique pour transformer la matière, par exemple pour la faire fondre (cas du soudage par perte diélectrique). Généralement, seuls la fréquence et le courant sont connus. Les caractéristiques du rayonnement autour de la machine restent difficiles à appréhender. Les mesures à proximité sont réalisées à l'aide d'un champmètre auquel une sonde de champ adaptée est connectée. Pour les sources industrielles intentionnelles, il est nécessaire de procéder au mesurage des deux composantes, électrique et magnétique, des champs émis.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une source médicale intentionnelle de champ magnétique continu (ou statique) très intense (de un à plusieurs Tesla selon les modèles d'IRM) associé à un champ radiofréquence modulé. Le champ magnétique continu est mesurable à l'aide d'un gaussmètre.

Les sources industrielles non intentionnelles utilisent de l'énergie électrique et peuvent *a priori* générer des champs électromagnétiques,

comme tous les appareils électrodomestiques de notre environnement quotidien, mais avec des intensités beaucoup plus élevées compte tenu des puissances électriques absorbées. Ces sources émettent généralement des champs aux fréquences de fonctionnement interne de la machine. Une sonde de mesure large bande permet de prendre en compte toutes les émissions rayonnées. Généralement, sans indication de fréquence de fonctionnement particulière, la fréquence haute à prendre en considération est de 6 GHz. Les lignes électriques et les transformateurs électriques sont des sources non intentionnelles qui émettent des champs magnétique et électrique à la fréquence du réseau électrique 50 Hz avec potentiellement quelques harmoniques. Les sondes de champ dédiées à ce type d'installation permettent, en général, des mesures des champs électrique et magnétique de 5 Hz à 400 kHz pour des intensités jusqu'à quelques millitesla et plusieurs milliers de volts par mètre.

ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE MESURE

Dès lors qu'il s'agit de mesures, dans quelque domaine que ce soit, la question des incertitudes est soulevée. D'autant que l'environnement professionnel dans lequel exercent les salariés, et plus particulièrement leur poste de travail, doit faire l'objet d'une évaluation des risques par l'employeur (chapitre II de la directive).

L'évaluation des incertitudes de mesure peut être réalisée grâce à la technique des « 5 M » qui prend en compte la méthode, le milieu, la matière, le matériel et la main-d'œuvre. Cette analyse permet d'identifier tous les paramètres constituants l'incertitude globale qui sera calculée puis associée à la mesure. L'incertitude attribuée à chaque paramètre fait l'objet d'une évaluation particulière soit à partir de documents fiables (certificats d'étalonnage des sondes), soit à partir de l'expérience des spécialistes (main-d'œuvre), soit à partir de l'état de l'art dans le domaine des mesures (méthode).

Les paramètres à prendre en compte sont nombreux, ce qui conduit généralement à des incertitudes calculées relativement élevées et pouvant dépasser 50% dans le cas des mesures avec un champmètre large bande.

MARGES DE SÉCURITÉ DANS LES VALEURS LIMITES

Les valeurs limites d'exposition (VLE) intègrent un facteur de sécurité pour éviter tout effet nocif pour la santé. Ce facteur est généralement suffisant pour garantir l'absence d'effet par rapport aux études expérimentales qui mettent en évidence un effet avéré. Les VLE se rapportent à des grandeurs physiques internes au corps humain, elles sont difficiles à évaluer par la mesure. Par conséquent, il est nécessaire de recourir à l'utilisation des VA qui sont des niveaux opérationnels plus accessibles. Le respect des VA permet de garantir le respect des VLE. Ces VA intègrent par conséquent un facteur de sécurité supplémentaire fondé sur une hypothèse de type « pire cas », relative au couplage maximum du champ électromagnétique avec le corps humain.

QUELLE APPROCHE POUR DÉCLARER LA CONFORMITÉ D'UN POSTE DE TRAVAIL ?

Compte tenu des marges de sécurité introduites dans les VLE et VA, quelle approche faut-il avoir pour le traitement des incertitudes ?

Il existe plusieurs approches qui tiennent compte des incertitudes. La première consiste à déclarer la conformité d'un poste de travail à partir de la valeur du champ électromagnétique mesurée puis augmentée de l'incertitude de mesure associée. Cette approche permet de garantir le non-dépassement des VA mais peut s'avérer très contraignante pour des installations où les valeurs mesurées sont proches des VA. Cependant, comme l'incertitude de mesure a un poids important pour déclarer la conformité, elle devra être maîtrisée et réduite au maximum afin de garantir le non-dépassement des VA dans de nombreuses situations. Un des moyens pour réduire cette incertitude consiste, par exemple, à multiplier le nombre de points de mesure afin d'obtenir une évaluation plus précise de l'environnement de travail.

Une deuxième approche consiste à comparer directement le résultat de la mesure à la VA. Cette approche nécessite de fixer une incertitude de référence comme incertitude maximale acceptable. Celle-ci est bornée et implique indirectement des exigences sur la rigueur de la méthode et la qualité de la métrologie des moyens de mesures. En cas de dépassement de l'incertitude de référence, et comme dans l'approche mentionnée ci-dessus, l'incertitude associée à la mesure est ajoutée. Dans les deux cas, l'objectif reste le respect des VA et, par conséquent, de la VLE.

Une troisième approche, consiste à coupler les deux approches précédentes, c'est-à-dire à borner l'incertitude et à la rajouter aux mesures avant de les comparer aux VA. Cette approche induit indirectement, dans la pratique, une nouvelle valeur limite, correspondant à la VA à laquelle l'incertitude de référence serait retranchée. Elle est donc plus contraignante que la VA de la directive.

CONCLUSION

Les champmètres permettent de réaliser une évaluation de l'environnement professionnel et de confronter directement les mesures aux VA. Il faut veiller à utiliser un champmètre adapté aux caractéristiques de la source d'émission. Un calcul de l'incertitude globale doit être associé aux mesures des champs électrique et/ou magnétique. Différentes approches sont possibles pour comparer une mesure et son incertitude associée à la VA correspondante. Le traitement des incertitudes de mesure n'est pas précisé par la directive. Un guide d'application donne des recommandations sur la prise en compte des incertitudes associées aux mesures de champs électromagnétiques en vue d'établir la conformité d'un poste de travail. ●

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Métrologie des champs impulsionnels basses fréquences

Guy Le Berre Ingénieur – conseil, responsable du Centre interrégional de mesures physiques de l'Ouest, Carsat Bretagne

Certaines applications industrielles telles que le soudage par résistance ou le soudage à l'arc émettent des champs magnétiques basses fréquences à caractère impulsionnel. Les équipements de mesure présents sur le marché ont un temps de réponse souvent trop élevé pour caractériser le niveau d'émission de la machine ou le niveau d'exposition de l'opérateur tel qu'exigé par la directive européenne. Cet article décrit une chaîne de mesure dédiée et donne quelques résultats de mesure.

Les champs électromagnétiques générés lors des opérations de soudage à l'arc ou par résistance (Cf. Focus, page 85) sont problématiques pour la santé des salariés exposés. L'un des outils actuellement utilisé pour évaluer ces risques est le mesureur de champ magnétique (Cf. Encadré 1). Problème : le temps de réponse des dispositifs actuellement commercialisés est variable selon l'équipement et selon son paramétrage. De plus, cette caractéristique n'est pas précisée dans la documentation technique de l'équipement. En conséquence, en fonction des caractéristiques de l'appareil de mesure et du champ magnétique produit (durée/fréquence), la valeur affichée peut être bien inférieure à la valeur réelle au point de mesure. De plus, un signal impulsionnel se traduit, dans le domaine spectral, par une multitude de fréquences. Or, les fréquences émises seront d'autant plus élevées que l'impulsion sera courte. Sachant que les valeurs d'action sont plus contraignantes lorsque la fréquence augmente, il est essentiel, pour l'évaluation de l'exposition, de prendre en compte les harmoniques.

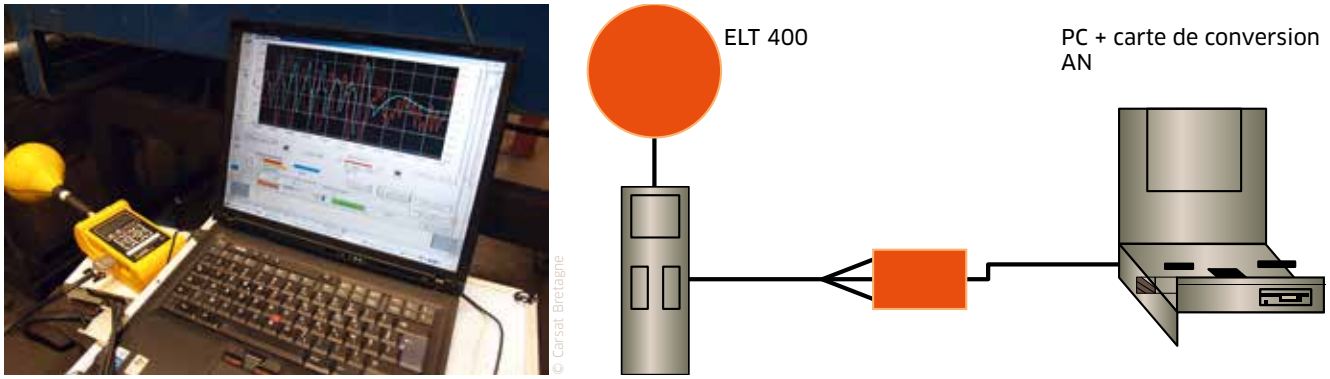
CHAÎNE DE MESURE DÉDIÉE

Face à ces difficultés, le Centre de mesures physiques de la Carsat Bretagne (CIMPO) a mis au point une

ENCADRÉ 1

Principe de fonctionnement d'un mesureur de champ magnétique

Un mesureur est classiquement constitué d'un transducteur de mesure (sonde) composé de trois solénoïdes (bobines) de 100 cm² disposées orthogonalement les unes par rapport aux autres de manière à effectuer une mesure isotrope (indépendamment de l'orientation de la sonde) du champ magnétique. Les signaux électriques en sortie des bobines peuvent être exploités, car accessibles sur certains modèles de champmètre.
Les signaux électriques issus des bobines sont échantillonnés et numérisés à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique de telle sorte que les opérations de filtrage/moyennage/analyse spectrale/pondération/mesure large bande ou mesure sélective/retenue de la valeur maximale et de crête et affichage des valeurs mesurées soient entièrement réalisées par des circuits numériques (microprocesseur).



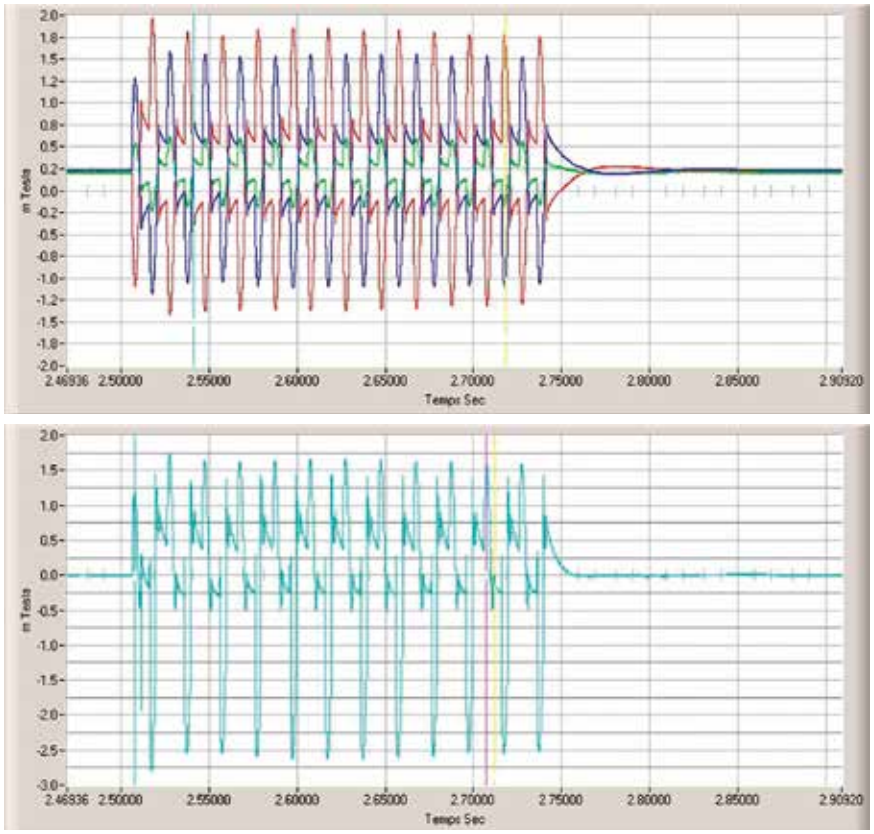
↑FIGURE 1
Chaîne de mesure Macem.

chaîne de mesure dédiée répondant aux spécifications de la norme européenne NF EN 50505 (2008). Celle-ci définit une méthode d'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques émanant du matériel de soudage par résistance et des techniques connexes. Elle a ainsi guidé la conception d'une chaîne de mesure exploitant les signaux analogiques en sortie des bobines de la sonde de champ magnétique raccordée au champmètre ELT 400 commercialisé par Narda.

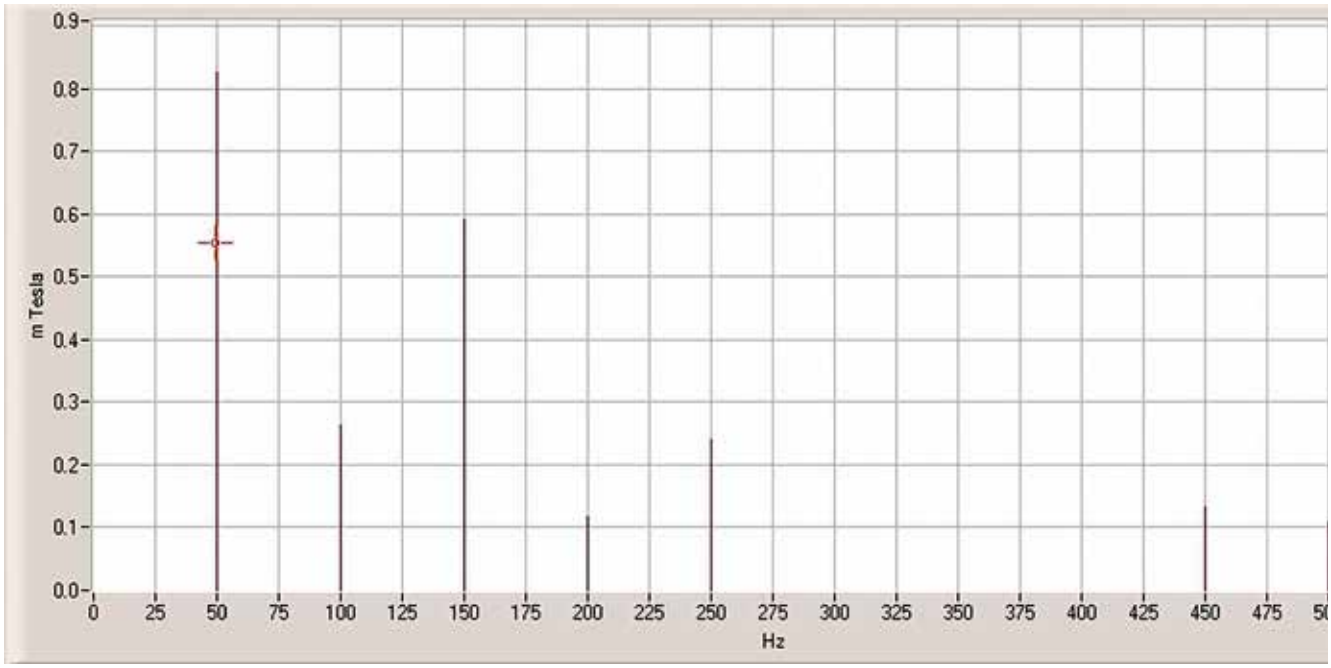
Le signal issu des bobines est numérisé à la fréquence de 100 kHz de manière à permettre de caractériser des impulsions très courtes et d'évaluer des situations de travail où sont mis en œuvre des champs de fréquence allant jusqu'à 40 kHz. La carte de conversion analogique numérique est pour sa part connectée à un PC qui héberge une application développée sous environnement LAB WINDOWS CVI. Les différents éléments de la chaîne de mesure sont représentés sur la figure 1.

Une application (baptisée Macem) a été développée spécifiquement pour cette chaîne de mesure et réalise chronologiquement les fonctions suivantes :

- affichage de l'évolution temporelle des signaux issus des trois bobines du transducteur de mesure ;
- sélection par l'utilisateur de la zone d'intérêt (impulsion représentative) ;
- calcul et affichage de la moyenne quadratique sur la zone sélectionnée (Cf. Figure 2) ;
- réalisation et affichage de l'analyse spectrale (FFT) du signal sur la zone sélectionnée ;
- sélection par l'opérateur des composantes fréquentielles (nombre de raies dont le rapport de la valeur mesurée à la fréquence i à la valeur déclenchant l'action à cette même fréquence est significatif) ;
- édition d'un tableau de synthèse des données pour les différentes fréquences retenues ;
- calcul de la phase de chaque composante fréquentielle ;
- construction du signal pondéré en tenant compte des valeurs déclenchant l'action ;



↑FIGURE 2
Évolution temporelle des trois signaux et de la moyenne quadratique calculée.



↑FIGURE 3
Analyse fréquentielle du signal.

- affichage de l'indice d'exposition (valeur maximale du signal construit) au point de mesure.

Les figures 2 à 5 montrent les éléments affichés par l'application et intégrées à un rapport (fichier Word).
Les performances métrologiques de cet équipement ont été validées par des mesures en laboratoire à l'aide de signaux simples produits par un générateur basse fréquence.
En complément, une comparaison inter-laboratoires a été conduite. Un laboratoire spécialisé dans la métrologie des champs électromagnétiques a accepté de confronter nos deux équipements sachant que la chaîne de mesure du laboratoire est de conception différente puisque composée d'un champmètre ELT400 raccordé à un oscilloscope numérique trois voies.
L'inter-comparaison a été effectuée par lecture de signaux réels. Autrement dit, les signaux issus des trois bobines du champmètre placé dans l'environnement proche de différentes machines exploitées par des sites industriels ont été enregistrés simultanément à l'aide d'un enregistreur numérique (DAT).

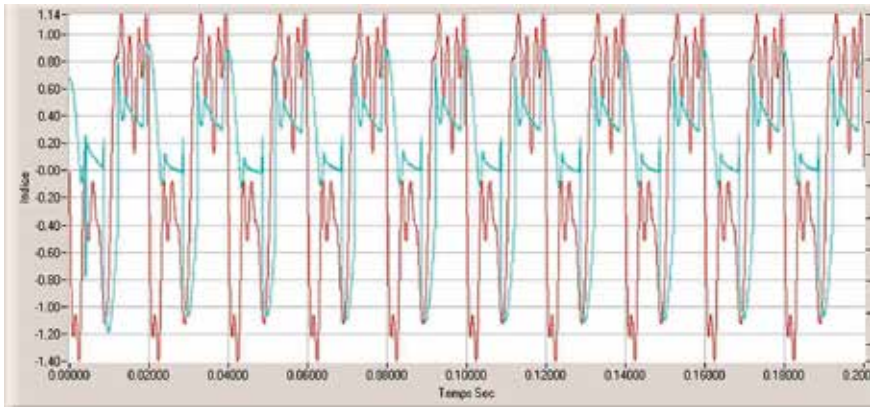
RÉSULTATS DES MESURES EFFECTUÉES

Les Centres de mesures physiques des Carsat et l'INRS ont renseigné une base de données compilant l'ensemble des mesures de champ électromagnétique effectuées sur les sites industriels. Dans le cas des soudeuses par résistance, les mesures ont été effectuées à l'aide d'une des deux chaînes de mesures identiques et mutualisées à l'échelle du territoire.
Plus de 125 machines ont ainsi été caractérisées.
Une synthèse des résultats des mesures de l'indice d'exposition est présentée figure 6. Un indice d'exposition supérieur à 1 signifie que l'exposition de l'opérateur à l'emplacement de la mesure excède la valeur déclenchant l'action basse (valeur la plus contraignante) fixée par la directive européenne.
Nos mesures montrent que l'exposition de l'opérateur conduisant une machine fixe est moins élevée que celle des opérateurs manœuvrant des pinces mobiles. Toutefois, 40 % des situations de travail surexposent

FIGURE 4→
Tableau de synthèse de l'analyse fréquentielle.

	FRÉQUENCE (Hz)	Bi (mT)	PHASE (rad/s)	BLI (mT)	Bi/BLi
F0	50	4,27	-1,087	1,00	4,274
2	150	0,42	1,902	1,00	0,416
3	250	0,23	1,547	1,00	0,229
4	350	0,16	1,375	0,86	0,187
5	450	0,10	1,241	0,67	0,155
6	550	0,05	1,098	0,55	0,098
7	1 150	0,02	-2,703	0,26	0,078
8	650	0,03	0,622	0,46	0,065
9	1 250	0,01	-2,542	0,24	0,061

Bi : valeur efficace de l'induction mesurée pour la fréquence donnée.
BLi : valeur déclenchant l'action basse pour la fréquence donnée.



$$\sum_i \frac{B_i}{BL_i} \cos\left(2\pi\ f_i + \theta_i + \phi_i\right)$$

avec $\phi\ (f) = \frac{\pi}{2}$ pour $f_i \leq 820\,Hz$

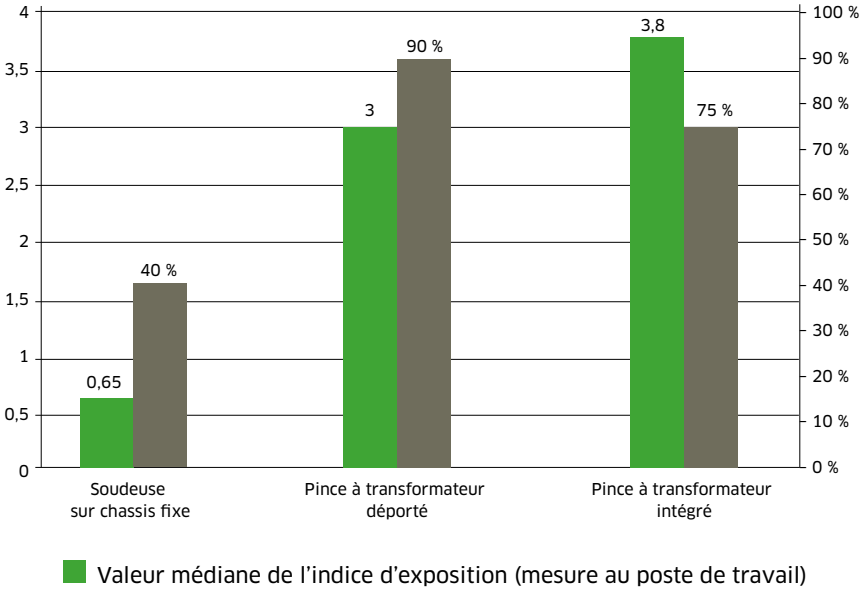
et $\phi\ (f) = 0$ pour $f_i > 820\,Hz$

←FIGURE 5
Calcul de l'indice d'exposition.

l'opérateur. En outre, les indices médians d'exposition des opérateurs utilisant des pinces à souder sont supérieurs à 3, ce qui montre que l'utilisation de ces équipements de travail est problématique.
Dans le cas du soudage à l'arc, les mesures effectuées ne sont pas en nombre suffisant pour en faire une exploitation statistique fiable notamment pour le soudage TIG. En soudage MIG-MAG, les résultats obtenus (Cf. Figure 7) montrent que l'utilisation du mode pulsé expose le soudeur à un niveau généralement supérieur à celui obtenu en mode lisse. L'indice d'exposition demeure inférieur à 1 dans la grande majorité des résultats.

MOYENS DE PRÉVENTION

Les moyens de réduction de l'exposition des conducteurs de machines fixes sont peu nombreux du fait de la proximité souvent nécessaire de l'opérateur du point de soudage. Le champ décroissant très rapidement (généralement suivant le carré de la distance), cette mesure de prévention s'avère très efficace. Lorsque c'est possible, par exemple avec la mise en place d'un système de navette ou de montage coulissant, il convient de chercher à éloigner l'opérateur du point de soudage. Il faut organiser la production et implanter le poste de travail de manière à ce que l'opérateur soit toujours placé dans le prolongement de la boucle et jamais perpendiculairement à celle-ci, tel que montré sur la figure 8.
Dans le cas des pinces mobiles, les générateurs utilisant des alimentations à découpage sont plus légers et moins encombrants que les générateurs classiques fonctionnant avec un transformateur à 50 Hz. Ainsi, il est possible d'intégrer le générateur à la pince mobile, ce qui permet d'éviter l'exposition au champ magnétique rayonné par les câbles entre le générateur et la pince à souder.
Le fonctionnement à 1 kHz des générateurs de dernière technologie permet de réduire le niveau d'exposition puisque le courant produit pour le soudage est continu (valeur déclenchant l'action très peu contraignante). L'exposition de l'opérateur est essentiellement due à l'ondulation résiduelle (à 2 kHz) et à ses harmoniques. La qualité de la filtration (après redressage) est déterminante pour limiter l'amplitude de l'ondulation résiduelle car à ces fréquences la valeur d'action est contraignante.
Pour le soudage à l'arc, l'éloignement étant la seule mesure de prévention applicable, il convient d'éviter le contact entre le câble d'alimentation de la torche et le corps humain. Certaines pratiques qui consistent à enrouler le câble autour du bras, ou à faire passer le câble sur l'épaule ou



←FIGURE 6
Synthèse des expositions en soudage par résistance.

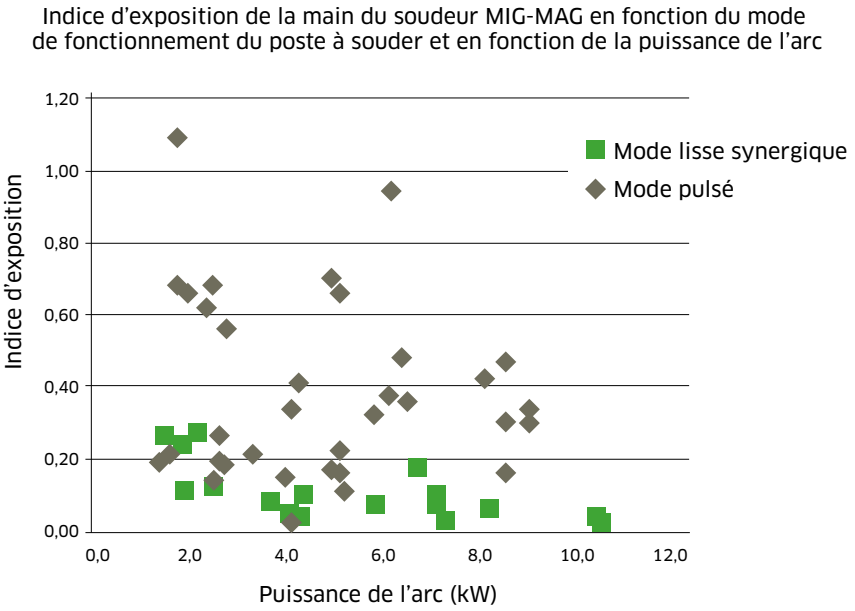


FIGURE 7

Synthèse des expositions en soudage MIG-MAG.

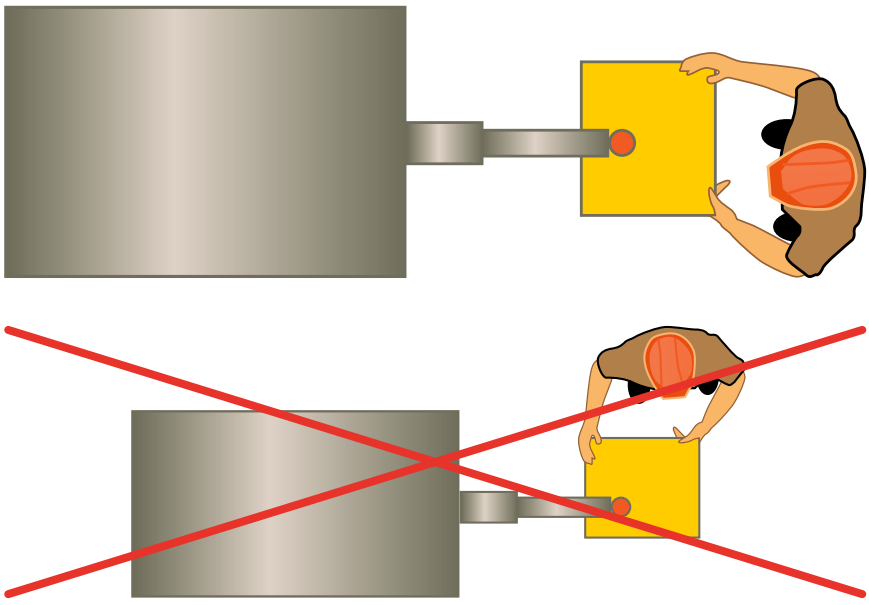


FIGURE 8

Position à retenir pour un opérateur sur soudeuse à châssis fixe.

entre les jambes sont à proscrire ou, en tout cas, à éviter au maximum.
Compte tenu du caractère impulsionnel du champ émis, les équipements de mesure disponibles sur le marché ne permettent pas de garantir une mesure fiable de l'exposition de l'opérateur. Cette chaîne d'acquisition et de calcul de l'exposition développée spécifiquement permet de répondre à l'exigence de la directive européenne relative à l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques. Et cela conformément aux prescriptions de la norme d'évaluation des champs magnétiques émanant des machines de soudage par résistance.

L'utilisation des postes de soudage à l'arc fonctionnant en mode pulsé présente de réels intérêts en termes de qualité de l'assemblage et de réduction des risques liées aux fumées (réduction des fumées émises d'un facteur compris entre 2 et 5) et aux vibrations (réductions des opérations de parachèvement). Il est aussi légitime de se poser la question de l'influence de ces développements technologiques sur l'exposition aux champs magnétiques émis. Les mesures effectuées traduisent une augmentation sensible de l'exposition au champ magnétique mais qui reste contenue. Dans tous les cas, la formation des opérateurs et une information sur les risques liés à l'utilisation de ces équipements de travail restent incontournables.

Pour en savoir

- Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).
- Demaret P., Donati P. Intégrer le risque « rayonnements électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels. INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 225, ND 2350, 2011.
- EN 50505 (01/04/2008). Norme de base destinée à l'évaluation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques émanant du matériel de soudage par résistance et des techniques connexes.
- *Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques.* Guide d'évaluation des risques, INERIS et INRS, Éditions INRS, ED 6136, 2013.

FOCUS SUR…

Le principe de fonctionnement du soudage par résistance

Les machines de soudage par résistance, également appelées machines à souder par point, ont la particularité de générer un courant intense (voisin de 10 000 A) durant une courte durée typiquement comprise entre 1 et 200 ms. Ces machines, qu'elles soient fixes sur châssis (Cf. Figure 9) ou à pince mobile (Cf. Figure 10), sont constituées d'un générateur électrique, de câbles d'alimentation et d'une pince constituées de deux électrodes dont l'une est actionnée par un puissant vérin de manière à chauffer localement par effet Joule les éléments métalliques à souder.

Hormis le soudage robotisé, l'opérateur est positionné généralement à moins d'un mètre du point de soudage. Lors de l'utilisation d'une machine fixe, l'opérateur manipule les pièces métalliques à souder tandis que dans le cas d'une pince mobile, la machine est déplacée vers les pièces à souder (assistance mécanique pour faciliter la manipulation). L'opérateur actionne ensuite la fermeture de la pince soit avec une pédale soit avec une gâchette. Le soudage s'effectue alors suivant les paramètres prédéfinis (courbe intensité du courant de soudage, durée de maintien de l'effort de serrage des pièces après interruption du passage du courant électrique…). Le nombre de machines à souder par résistance utilisées en France est évalué entre 50 000 et 100 000.

Les machines les plus anciennes fonctionnent à 50 Hz et sont principalement composées d'un gros transformateur et d'une gestion électrique simple. De ce fait, un nombre important de vieilles machines sont encore en fonctionnement dans les ateliers. Les machines les plus récentes utilisent une alimentation à découpage et comportent une gestion numérique des paramètres de soudage. Cette technologie permet de réduire l'encombrement et le poids des générateurs.

Le soudage à l'arc, qu'il soit à l'électrode enrobée, MIG-MAG ou TIG, émet des champs électromagnétiques à caractère impulsionnel. Les générateurs les plus récents que sont les postes synergiques et pulsés permettent une meilleure maîtrise du dépôt de métal ce qui se traduit par une réduction de l'émission de fumée et des projections de métal. L'utilisation de ces générateurs est particulièrement intéressante en termes de qualité de l'assemblage mais également en termes de réduction des risques professionnels liés à l'inhalation de fumées de soudage et liés aux vibrations transmises aux mains et aux bras. En effet, la durée d'utilisation des meuleuses portatives est plus courte lors des travaux de parachèvement.

Bien que l'intensité du courant mis en œuvre lors du soudage à l'arc soit inférieure à celle utilisée en soudage par résistance, la gestion électronique des paramètres de soudage et le découpage haute fréquence de l'alimentation électrique conduisent le professionnel de la prévention à s'interroger sur les risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques produits par ces équipements de travail dont le nombre est en forte augmentation. ●

© Carsat Bretagne

↑FIGURE 9
Soudeuse sur châssis fixe.

© Carsat Bretagne

↑FIGURE 10
Pince à souder mobile.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Évaluation de l'exposition des travailleurs d'EDF : synthèse des mesures

Isabelle Magne EDF, Recherche & développement

Cet article présente la méthode d'évaluation de l'exposition au champ magnétique et électrique 50 Hz pour l'ensemble des sites de production d'électricité d'EDF. Une campagne de mesures au poste de travail a été réalisée dans différents sites dans lesquels des zones ou sources présentaient des niveaux de champs électrique et magnétique importants.

L'échantillon de situations étudiées par des mesures est aujourd'hui suffisamment représentatif pour per-mettre de répondre à la plupart des questions sur les expositions. La connaissance de la position exacte du travailleur est une information importante, car le champ magnétique est très variable en fonction de la distance à la source.

Selon l'article 4.1 de la directive européenne 2013/35/UE, « *l'employeur évalue tous les risques pour les travailleurs dus aux champs électromagnétiques sur le lieu de travail et, si nécessaire, mesure ou calcule les niveaux des champs électromagnétiques auxquels les travailleurs sont exposés.* » Cela signifie donc que, s'il est possible de faire des mesures pour évaluer l'exposition, il n'est pas nécessaire de faire des mesures partout.

L'article 4.3 précise que « *s'il s'avère impossible d'établir de manière fiable, en fonction d'informations facilement accessibles, que les valeurs limites d'exposition (VLE) sont respectées, l'évaluation de l'exposition est effectuée sur la base de mesures ou de calculs…* »

Dans les installations de production d'électricité, l'exposition est principalement liée aux courants et tensions de fréquence 50 Hz. Mais ces installations sont des sites complexes du fait de la multiplicité des sources de champ électrique et magnétique 50 Hz. C'est pourquoi, dans le cas des sites de production d'EDF, la mesure du champ électrique et magnétique au poste de travail est la solution la plus simple et la plus précise. Il est important de noter que la mesure permet également de dialoguer plus facilement avec les travailleurs.

MÉTHODOLOGIE

Le niveau de champ électrique ou magnétique 50 Hz dépend de paramètres physiques tels que la géométrie des conducteurs, le niveau de tension, l'intensité du courant, etc. C'est pourquoi le niveau de champ sera le même dans des installations identiques (ou similaires). Il est donc possible d'évaluer l'exposition dans l'ensemble du parc EDF à partir de sites représentatifs.

Des sites ont été sélectionnés pour y organiser des campagnes de mesure. Cette démarche a été initiée dès 2005 dans le cadre de l'application de la directive 2004/40/CE. Pour les sites de production nucléaire, un site a été sélectionné pour chacun des paliers CP0, CP1, CP2 (900 MW), P4, P'4 (1300 MW) et N4 (1400 MW). Pour les sites de production thermique, un site a été sélectionné pour chacun des paliers charbon (250 MW, 600 MW, 600 MW + installation de désulfuration), fuel (600 MW, 700 MW), CCG (Cycle combiné gaz) (430 MW) et TAC (Turbine à combustion) (85 MW, 125 MW, 185 MW, 210 MW). Pour les sites hydrauliques, il n'existe pas de notion de palier, c'est pourquoi les sites ont été sélectionnés pour représenter la diversité du parc (site avec quatre groupes de 157 MW chacun plus huit groupes réversibles [turbine ou pompage] de 149 MW chacun, site avec deux groupes de 236 MW chacun, site avec quatre groupes verticaux dits « Kaplan » de 38 MW, plusieurs sites avec groupes de puissance environ 10 MW, 30 MW, 54 MW).

Le protocole de mesure est conforme à la norme IEC 61786-2:2014 [1]. En particulier, les mesures de champ électrique ont été réalisées dans de bonnes conditions (hygrométrie < 70 %). Les mesures de champ magnétique ont été réalisées avec un

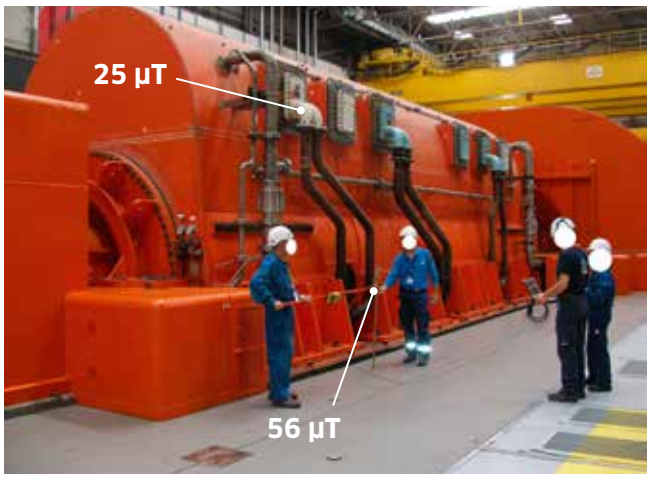


FIGURE 1
Autour de l'alternateur CNPE900 MW.

FIGURE 2
Autour de l'alternateur hydraulique 12 MVA.

FIGURE 3
Jeux de barre sous alternateur CNPE 1400 MW.

FIGURE 4
Jeux de barre sous alternateur charbon 600 MW.

courant dans les installations proche de la charge maximale. Enfin, les mesures ont été réalisées au poste de travail, dans des situations représentatives de la position réelle de travail. Le mesureur utilisé est conforme à la norme IEC 61786-1:2013 [2]. Il s'agit d'un mesureur EFA-300 (Narda). Sa bande passante (5 Hz à 32 kHz) et sa gamme de mesure (20 nT à 31,6 mT pour le champ magnétique, 0,1 V/m à 100 kV/m pour le champ électrique) permettent de couvrir les types et les niveaux de champ attendus *a priori*. Les sondes de mesure sont triaxiales et l'incertitude de mesure est comprise entre 6% (champ magnétique) et 10% (champ électrique). De plus, les opérateurs ont porté sur eux des mesureurs EMDEX II High Field (Enertech USA), réglés pour enregistrer le champ magnétique toutes les trois secondes, afin de vérifier les mesures réalisées avec l'EFA-300.

RÉSULTATS

Cet article ne présente pas tous les résultats de mesure de manière exhaustive, mais liste les principaux lieux à étudier dans un site de production d'électricité. En premier lieu, ce sont les zones ou les sources avec des niveaux de champ importants, c'est-à-dire comparables aux valeurs déclenchant l'action (VA). Elles peuvent être relativement étendues (exposition corps entier) ou très localisées (exposition d'une partie du corps). Ensuite, ce sont les zones ou les sources pour lesquelles les travailleurs posent des questions. Il s'agit généralement de sources visibles, n'émettant pas forcément des niveaux importants de champ.

Autour de l'alternateur

Dans la salle des machines, le niveau de champ magnétique autour (au même niveau) de l'alternateur est de l'ordre de quelques dizaines de µT. On retrouve le même ordre de grandeur quelle que soit la puissance de l'alternateur (Cf. Figures 1 et 2).

Jeux de barre en sortie de l'alternateur

La proximité des jeux de barre évacuant l'énergie de l'alternateur est l'endroit où les travailleurs sont le plus exposés au champ magnétique. Des zones dépassant la VA basse (1000 µT), dans lesquelles des

FIGURE 5
Jeux de barre - hydraulique 38 MW.

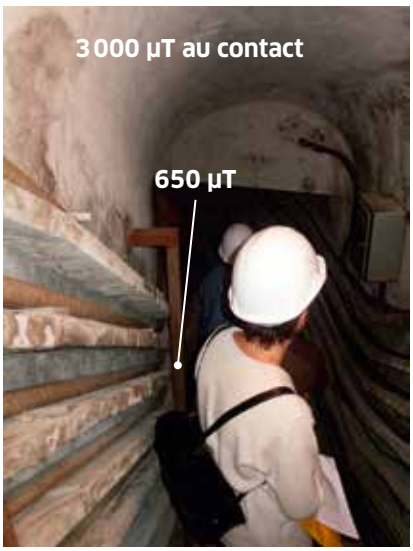


FIGURE 6
Galerie des câbles – hydraulique 2,5 MW.

FIGURE 7
Un des chauffe-roulements les plus puissants.

travailleurs peuvent circuler, ont été relevées, en particulier dans les sites nucléaires et thermiques (Cf. Figures 3 et 4). Les mesures au contact de ces barres dépassent la VA basse (tout type d'alternateur, cf. Figure 5) et peuvent dépasser la VA haute (6 000 µT) dans les sites nucléaires. Il faut cependant noter que le champ magnétique décroît rapidement avec la distance à ces barres et que les mesures au contact ne sont pas représentatives de la position de travail.

Galeries de câbles de puissance

Il s'agit de câbles évacuant l'énergie produite par l'alternateur dans certaines centrales hydrauliques ou de câbles alimentant certains équipements. La VA basse (1 000 µT) peut être dépassée au contact de ces câbles, mais le champ magnétique décroît très vite avec la distance et est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de µT pour une personne qui passe à proximité (Cf. Figure 6).

Transformateurs

Les transformateurs qui évacuent l'énergie vers le réseau haute tension ont un circuit magnétique optimisé de manière à avoir le meilleur rendement possible et sont, de plus, contenus dans une enceinte métallique. De ce fait, ils ne constituent pas une source majeure de champ magnétique. Le champ magnétique qu'on mesure à proximité provient plutôt de leurs connexions. Il est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de µT.

Postes d'évacuation d'énergie

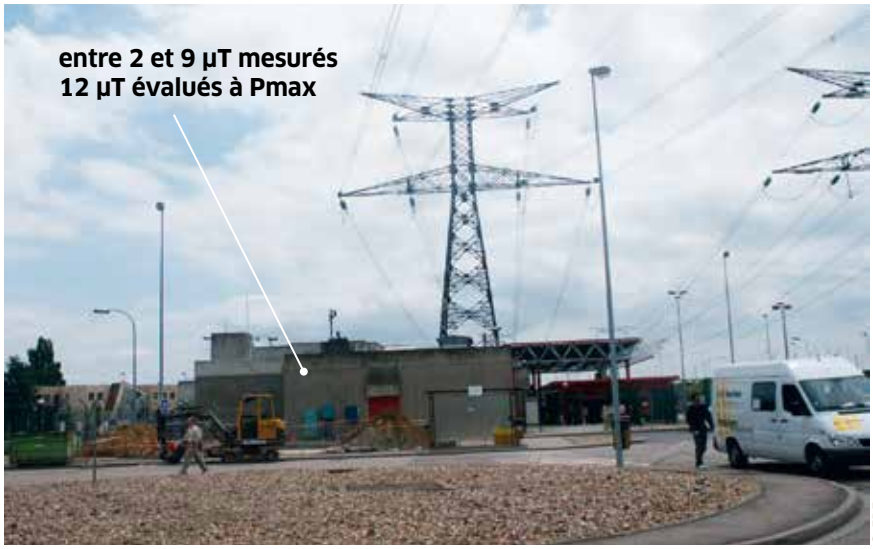
Ce sont aux postes d'évacuation d'énergie que le champ électrique est maximal. Il peut s'agir d'un poste au niveau du sol ou sur une plateforme dans certaines centrales nucléaires de production d'électricité. Les niveaux de champ électrique sont localement, pour un travailleur au niveau du sol, de l'ordre de 10 kV/m (VA basse pour le champ électrique). Le champ magnétique est de l'ordre de quelques dizaines à 100 µT. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs trouvées dans les postes de transport 63 à 400 kV.

Locaux électriques

Le niveau de champ magnétique dépend du type d'équipement électrique contenu dans ces locaux.
S'il s'agit d'équipements pour piloter les installations (par exemple, salle de relayage ou salle contenant du matériel informatique), ces équipements fonctionnement avec des signaux de faible puissance: le champ magnétique est inférieur à 1 µT.
S'il s'agit de cellules HTA (par exemple, 6,6 kV), de transformateurs, de redresseurs, le courant est plus important et le champ magnétique est de l'ordre de la dizaine de µT (le plus souvent) à la centaine de µT (parfois) dans les couloirs autour des armoires. Il est possible de mesurer plus au contact de câbles HTA (quelques centaines de µT, voire de l'ordre de 1 000 µT) si ces câbles sont accessibles au pied des armoires. Cependant, ceci n'est pas représentatif de l'exposition de la tête d'un travailleur.

Moteurs

Les moteurs de forte puissance (par exemple, pompes, moteurs de ventilateur) sont alimentés par des câbles de puissance. Les résultats sont similaires au cas des galeries de câble de puissance : le champ magnétique peut être supérieur à 1 000 µT au contact du câble, mais décroît rapidement avec la distance et est inférieur à 100 µT au niveau du poste de travail.



© EDF

FIGURE 8
Sous une ligne d'évacuation d'énergie – CNPE 1300 MW.

© EDF

FIGURE 9
Bâtiment à proximité des lignes de réalimentation des tranches – CNPE 1 300 MW.

Chauffe-roulements

Les chauffe-roulements ne sont pas spécifiques aux sites de production d'électricité. Ils sont utilisés dans les ateliers et nous les mentionnons ici car il s'agit d'une source de champ magnétique localement très élevée. Le principe est de chauffer le roulement par induction de champ magnétique en enfilant le roulement sur un barreau métallique pour fermer le circuit. Les gros modèles fonctionnent à 50 Hz, mais il en existe de plus petits à 26 kHz. Le champ magnétique décroît avec la distance au circuit magnétique, mais dans le cas des modèles les plus puissants, l'opérateur qui appuie sur les commandes se trouve dans une zone entre 100 et 1000 µT (Cf. Figure 7). C'est pourquoi ces chauffe-roulements sont marqués d'un macaron « Interdit aux porteurs d'implants cardiaques ».

Bâtiments près des lignes

La proximité de lignes près des bureaux suscite parfois des questionnements de la part des travailleurs. Ce questionnement n'est pas spécifique aux sites de production d'électricité, mais rejoint les questions posées par le public au sujet du voisinage des lignes aériennes à haute tension. Les niveaux de champ magnétique mesurés sont d'ailleurs similaires et toujours inférieurs à 100 µT (niveau de référence de la recommandation européenne 1999/519/CE pour le public). Les travailleurs posent des questions aussi bien sur les lignes qui évacuent la production des sites vers le réseau (Cf. Figure 8) où le courant est plus élevé, que sur des lignes avec d'autres fonctions (Cf. Figure 9) où le courant est faible (et, dans ce cas, la source du faible niveau de champ magnétique mesuré n'est pas forcément la ligne en question).

En conclusion, dans le cadre de l'analyse de risque demandée par la directive 2013/35/UE, l'exposition des travailleurs à EDF a été évaluée à partir d'une série de mesures de champ électrique et magnétique sur des postes de travail représentatifs de l'ensemble des installations. La principale zone de dépassement de la VA basse en champ magnétique concerne le voisinage des sorties d'alternateur. Le seul lieu de dépassement de la VA basse en champ électrique concerne la proximité des jeux de barre dans les postes d'évacuation d'énergie 225 ou 400 kV.

Des zones de dépassement de la VA basse en champ magnétique avec une exposition localisée (décroissance rapide du champ magnétique avec la distance) ont été identifiées à proximité des câbles de puissance et à proximité des chauffe-roulements dans les ateliers.

Le champ magnétique et le champ électrique dans les locaux à proximité des lignes aériennes sont inférieurs à la recommandation européenne 1999/519/CE pour l'exposition du public.

Pour les cas de dépassement des VA, la démonstration de la conformité aux VLE et la mise en place d'une signalisation sont en cours.

Il est possible de travailler sans risques sur les installations d'EDF en se tenant à distance des sources de champs (quelques dizaines de cm tout au plus pour les sources de champ magnétique). ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] IEC 61786-2. Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine – Partie 2: Norme de base pour les mesures. 2014.

[2] IEC 61786-1. Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine – Partie 1: Exigences applicables aux instruments de mesure. 2013.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Un protocole d'intervention en entreprise pour l'évaluation simplifiée des risques liés aux rayonnements électromagnétiques

Stéphanie Enderlin, Sébastien Freis, Hoang Ngo, Rémi Petitfour, Allal Sabri
Association interprofessionnelle des centres médicaux et sociaux (ACMS) de Suresnes

L'ACMS est un service de santé au travail qui accompagne ses adhérents dans leurs démarches de prévention et d'amélioration des conditions de travail et dans la préservation de la santé des salariés. Pour cela, elle a élaboré un outil d'évaluation simplifiée afin d'aider les employeurs vis-à-vis des nouvelles exigences réglementaires de la directive européenne 2013/35/UE qui vont être mises en place le 1er janvier 2017.

L'évaluation des risques professionnels s'impose, depuis le 5 novembre 2001, à toutes les entreprises ayant au moins un salarié. Cette évaluation permet d'engager une démarche de prévention afin d'éviter toute altération de la santé des travailleurs du fait de leur activité professionnelle. Force est de constater qu'un grand nombre d'entreprises n'a pas intégré, dans son évaluation, les risques liés aux rayonnements électromagnétiques. Le décret n°2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques qui transpose la directive européenne 2013/35/UE du 26 juin 2013 imposera à tous les employeurs, dès janvier 2017, de procéder à l'évaluation de l'exposition des salariés aux rayonnements électromagnétiques.
Afin d'accompagner ses adhérents pour prendre en compte ces risques, l'ACMS a réalisé des outils pratiques d'aide à l'évaluation simplifiée.

Le cas des salariés à risques particuliers (porteurs de dispositifs médicaux implantés ou placés à même le corps, femmes enceintes) est à traiter spécifiquement, en collaboration avec le médecin du travail.

MÉTHODE EMPLOYÉE POUR LE DÉVELOPPEMENT DES OUTILS

Différents membres de l'équipe pluridisciplinaire de notre service ont échangé sur ces risques, sur leurs pratiques professionnelles et sur les évolutions attendues de la réglementation. Plusieurs actions ont été retenues:

- une recherche documentaire afin de connaître la réglementation s'appliquant au public et aux salariés, les équipements et leurs procédés d'utilisation pouvant exposer les salariés à ces risques [1,2], la problématique des salariés à risques particuliers (porteur d'implants…);
- la rencontre des différents acteurs du domaine: médecins du travail, spécialistes de l'INRS et de la Cramif, laboratoires de métrologie des rayonnements électromagnétiques

Fiche de repérage pour l'aide à l'évaluation des risques liés aux rayonnements électromagnétiques

Entreprise : .....

Adresse : .....

Contact : .....

Téléphone/E-mail : .....

1°/ Activité(s) de l'entreprise

2°/ Appareils, applications ou procédés utilisés émettant des rayonnements électromagnétiques

Appareils, applications ou procédés	Procédés Industriels
Appareils électriques et électroniques	Soudage par résistance
Distribution électrique (ligne haute et basse tension, transformateurs…)	Magnétiseurs démagnétiseurs
Éclairage	Induction (chauffage)
Identification par radiofréquence (RFID)	Magnétoscopie
IRM (Imagerie par résonance magnétique)	Chauffage, soudage par pertes diélectriques (presse haute fréquence)
Télécommunication et radiocommunication (téléphonie mobile, station de base, Wifi)	Électrolyse
	RMN (Rayonnement magnétique nucléaire)
	Fours micro-ondes (chauffage)

3°/Annexer le plan des locaux ou du chantier, ou un croquis avec l'implantation des équipements et des postes de travail

FIGURE 1

Fiche de repérage pour l'aide à l'évaluation des risques liés aux rayonnements électromagnétiques.

Fiche d'équipement N°

Application ou procédé concerné : .....

Désignation de l'appareil ou équipement : .....

Marque : .....

Références/type : ..... N° de série : .....

Marquage CE : ☐ oui ☐ non

1°/ Équipement disposant d'une fiche technique fournie par le constructeur : ☐ oui ☐ non

Référence de la fiche technique (titre, constructeur, année…) :	Gamme de fréquence du rayonnement à l'utilisation (en Hz) : Intensité de courant (en A) : Tension d'alimentation (en V) : Puissance (en W) :
Autres données utiles :	

2°/ Équipement évalué selon une des normes produits EMF harmonisées : ☐ oui ☐ non
N° norme :

3°/ Équipement utilisé selon les recommandations faites par le fabricant : ☐ oui ☐ non
Si oui, préciser la référence de la recommandation :

4°/ Équipement ayant subi des modifications sans accord préalable du fabricant : ☐ oui ☐ non
Si oui, préciser :

5°/ Moyens de prévention existants pour cet équipement : ☐ oui ☐ non
Si oui, préciser ces moyens techniques, organisationnels, humains (blindage, éloignement, signalisation, informations aux salariés à risques particuliers…) :

6°/ Équipement contrôlé, maintenu régulièrement : ☐ oui ☐ non
Si oui, préciser :

FIGURE 2

Fiche d'équipement.

accrédités Cofrac, formateurs spécialistes en champs électromagnétiques (CEM), entreprises spécialisées en contrôle non destructif par magnétoscopie ;
- l'information et la formation de nos équipes pluridisciplinaires dont les intervenants en prévention des risques professionnels (IPRP) et les techniciens HSE.

LES OUTILS DÉVELOPPÉS DANS LE CADRE DU PROTOCOLE D'INTERVENTION

Des fiches pratiques ont été créées pour sensibiliser les entreprises et pour faciliter la prise en compte de ces risques. Elles portent sur différents procédés et applications fréquemment rencontrés :
- équipements industriels les plus rayonnants ;
- lignes haute tension et transformateurs ;
- télécommunications et stations de base.

Elles contiennent des informations utiles : les valeurs déclenchant l'action (VA) pour les salariés et les niveaux de référence pour le public, des exemples de situations rencontrées, des mesures de prévention et des conseils.
Un modèle de fiche de repérage (Cf. Figure 1) a été élaboré afin de collecter les informations utiles à une évaluation simplifiée, spécifique à ce risque. Les publications INRS nous ont servi à établir une liste d'applications ou de procédés industriels à surveiller.
Un modèle de fiche d'équipement (Cf. Figure 2) permet de recenser certaines caractéristiques de l'appareil ou de l'équipement émettant des CEM, déclarées par le fabricant, et décrivant son implantation (locaux ou chantiers) et son utilisation selon le poste de travail.
Enfin, à l'intention des intervenants de notre service et des acteurs en prévention des entreprises, un arbre

© R. Petitfour

FIGURE 3
Cabine de magnétoscopie.

© R. Petitfour

FIGURE 4
Démagnétiseur.

© Christian Bissentex pour l'INRS

FIGURE 5
Pinces de magnétoscopie.

décisionnel a été établi afin de juger, pour un appareil ou équipement émettant des CEM, de:

- sa conformité par rapport à une norme « ElectroMagnetic Fields » (EMF) harmonisée conférant la présomption du respect des restrictions de base concernant l'exposition des personnes aux CEM;
- sa conformité dès lors qu'il a la mention « Non » pour les salariés sans risques particuliers dans le tableau 3.2 du guide CEM à l'intention des PME [1] qui indique qu'une évaluation spécifique des CEM n'est pas nécessaire.

  Remarque: Il est à noter que les appareils conformes à l'un des deux cas ci-dessus permettent de finaliser l'évaluation en jugeant l'exposition des salariés sans risques particuliers comme inférieure à la VA de la directive 2013/35/UE;
- sa probable non-conformité à l'exigence de ne pas dépasser la VA de la directive européenne 2013/35/UE pour les salariés exposés.

Dans le cas de non-conformité, l'entreprise devra procéder à une évaluation approfondie, soit en utilisant un outil d'estimation tel que le logiciel Wise, soit en effectuant des mesures de champs. Des mesures de prévention seront à prendre aux postes de travail.

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Des interventions dans plusieurs entreprises spécialisées en contrôle non destructif par magnétoscopie ont été menées. Ces équipements (cabine de magnétoscopie, démagnétiseur, métalloscope ou pinces de magnétoscopie, cf. Figures 3 à 5) font partie d'une des huit familles évaluées par l'INRS et des plus répandues en nombre. Ils émettent principalement un champ magnétique.

Force est de constater que les risques liés aux rayonnements électromagnétiques ne sont pas pris en compte dans le document unique de ces entreprises. En revanche, le risque électrique est maîtrisé pour ces équipements.

Les entreprises ne disposent pas des fiches techniques de ces appareils, ni d'indication sur l'exposition des utilisateurs. Ils sont en bon état de fonctionnement, contrôlés annuellement, mais ont plus de 20 ans pour certains.

Les opérateurs ont tous suivi une formation certifiante pour réaliser les contrôles non destructifs. L'observation de leurs activités indique qu'ils se situent à proximité des sources de champs.

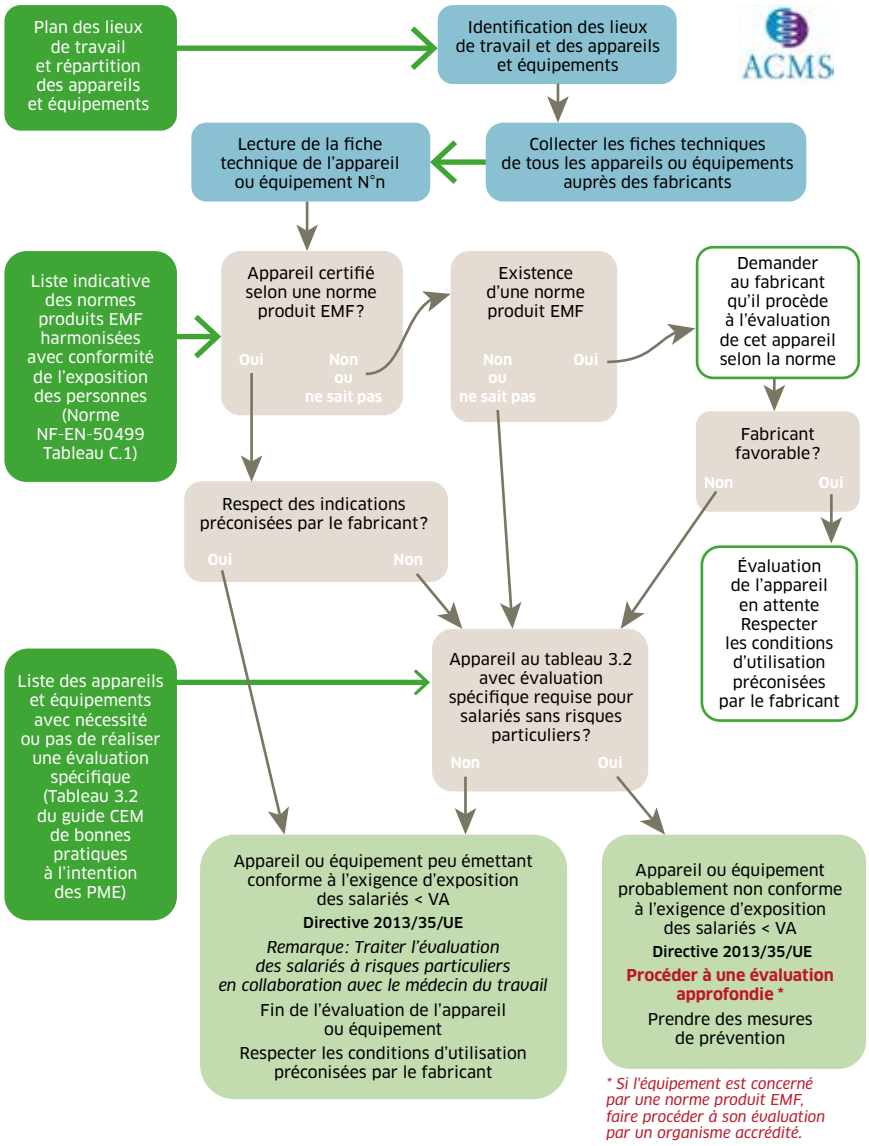
Ils sont sensibilisés à ce risque pour les interférences possibles avec les dispositifs médicaux type pacemaker ou stimulateur cardiaque. Les pictogrammes sont apposés près des zones à risque.

Un manque d'informations ne nous a pas permis de remplir complètement les fiches équipement, même après avoir sollicité les fabricants ou les distributeurs.

Selon l'arbre décisionnel établi (Cf. Figure 6), compte tenu du fait que les équipements utilisés en magnétoscopie ne font pas l'objet de norme EMF harmonisée et ont la mention « Oui » pour les salariés sans risques particuliers dans le tableau 3.2 du guide CEM à l'intention des PME [1], partie « Industrie légère », magnétiseurs/démagnétiseurs industriels, nous avons conseillé aux employeurs de procéder à une évaluation approfondie, avec l'utilisation des logiciels d'estimation ou des mesures de champs magnétiques, et d'envisager des mesures de prévention selon trois axes:

- réduire l'émission de la source;
- réduire par éloignement l'exposition de l'opérateur;
- mettre en place une signalisation adaptée (panneaux de danger, panneau d'interdiction aux porteurs d'implants, cf. Figures 7 et 8).

Un protocole d'intervention a été proposé pour intervenir auprès des



↑FIGURE 6
Arbre décisionnel pour l'aide à l'évaluation simplifiée des risques liés aux rayonnements électromagnétiques.

←FIGURE 7
Pictogrammes informant de la présence de RNI et de champs magnétique statique.

←FIGURE 8
Pictogramme informant les porteurs de DMIA.

adhérents de notre service de santé au travail. Les entreprises concernées par les risques liés aux rayonnements électromagnétiques peuvent être aidées efficacement dans leur évaluation.

Des retours d'expérience ont porté sur des équipements de magnétoscopie réputés comme ayant des effets potentiels directs et indirects sur la santé. Ils ont permis de constater qu'aucune information sur l'exposition des salariés n'est fournie par les fabricants. L'arbre décisionnel permet d'indiquer que, pour les équipements utilisés, des évaluations approfondies s'imposent aux entreprises, générant des coûts en temps et en métrologie.

Il est attendu des fabricants d'appareils ou d'équipements des informations précises sur le type de leur équipement et sur leurs conditions d'utilisation pour réduire l'exposition aux rayonnements électromagnétiques des opérateurs. Ces éléments faciliteront la lecture du tableau 3.2 du guide européen de bonnes pratiques à l'intention des PME [1]. Ce guide est un outil précieux de référence pour déterminer la nécessité ou non de réaliser une évaluation spécifique. Le cas des salariés à risques particuliers est à traiter spécifiquement en collaboration avec le médecin du travail. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Commission européenne « Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE Champs électromagnétiques Guide à l'intention des PME », KE-04-15-142-FR-N, 2015, 22 p.

[2] **Ouvrages INRS**

• Les champs électromagnétiques, *Travail et sécurité*, 765, 2015, 45 p.

• *La réglementation en milieu professionnel*, ED 4204, 2015, 4 p.

• *Contrôle par magnétoscopie démagnétiseurs*, ED 4218, 2014, 4 p.

• *Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques. Guide d'évaluation des risques*, ED 6136, 2013, 33 p.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Oseray, un outil simple pour une première estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques

Philippe Demaret INRS, département Ingénierie des équipements de travail

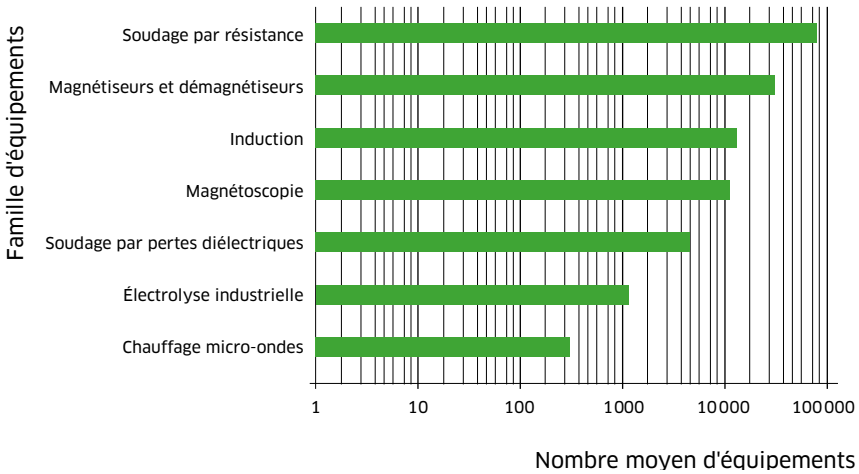
L'exposition aux champs électromagnétiques des opérateurs a été mesurée sur près de 1 000 postes de travail dans toute la France à proximité des principales machines industrielles rayonnantes. L'exploitation des résultats a permis de concevoir une application informatique simple permettant une première estimation du niveau d'exposition des opérateurs aux champs électromagnétiques, conformément à la directive 2013/35/UE.

Le développement de la téléphonie mobile (GSM, UMTS, etc.) et des techniques de communication (4G, WiFi, WImax, etc.) depuis les années 1990 a accentué la prise de conscience par le public de la présence de champs électromagnétiques dans l'environnement. Dans le milieu industriel, des sources similaires de rayonnements radioélectriques existent et les effets sont du même type que ceux produits par la téléphonie mobile et les techniques de communication citées précédemment. On y trouve également des sources différentes, liées aux équipements de production. Il s'agit des équipements de soudage par résistance, des magnétiseurs et démagnétiseurs, des équipements de chauffage par induction, des équipements de contrôle par magnétoscopie, des presses à souder par pertes diélectriques, des équipements d'électrolyse industrielle et des fours à micro-ondes industriels… Les opérateurs qui occupent des postes de travail à proximité de ces équipements ne sont pas toujours conscients des effets possibles des rayonnements électromagnétiques.

La directive européenne 2013/35/UE [1] du 26 juin 2013 sera applicable en France dès le 1er janvier 2017[1]. Elle fixe des valeurs limites d'exposition (VLE) et des valeurs

FIGURE 1

Estimation du parc français de machines industrielles rayonnantes.



FAMILLE D'ÉQUIPEMENTS	GRANDEUR MESURÉE
Soudage par résistance	Induction B (µT)
Magnétiseurs et démagnétiseurs	Induction B (µT)
Chauffage par induction	Induction B (µT)
Magnétoscopie	Induction B (µT)
Soudage par pertes diélectriques	Champ électrique E (V/m) Courant induit (mA)
Electrolyse industrielle	Induction magnétique B (µT)
Chauffage industriel par microondes	Champ électrique E (V/m)

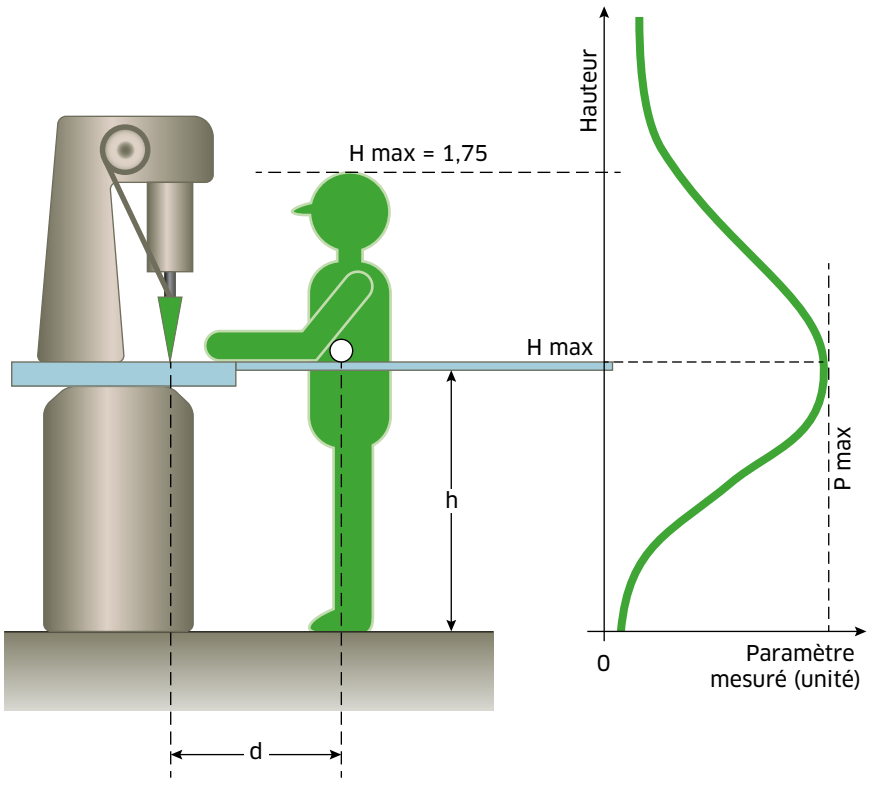
↑TABLEAU 1

Liste des familles d'équipements retenues et des grandeurs mesurées correspondantes.

GRANDEUR MESURÉE	CHAMP ÉLECTRIQUE E (V/m)	INDUCTION MAGNÉTIQUE B (µT)	COURANT INDUIT IINDUIT (A/m)
Appareil utilisé	Champmètre équipé d'une sonde « champ électrique » adaptée	Teslamètre équipé d'une sonde « induction magnétique » adaptée	Mesureur de courant induit

↑TABLEAU 2

Liste des matériels utilisés pour la mesure des différentes grandeurs.



↑FIGURE 2

Repérage du point de mesurage à un poste de travail.

déclenchant l'action (VA) qui sont fonction de la fréquence et de l'effet observé (effets non thermiques ou effet thermique). Notons que les VLE se comprennent pour certaines fréquences à l'intérieur du corps humain et ne sont donc ni aisément mesurables, ni calculables.

Dans les entreprises, la publication de la directive a suscité des questions et des demandes d'informations de plus en plus nombreuses ont été formulées auprès des experts, en particulier dans le cadre de l'évaluation des risques professionnels (document unique). L'évaluation du risque « champs électromagnétiques » aux postes de travail n'est pas simple. Les paramètres représentatifs de l'exposition aux champs électromagnétiques sont en effet variables suivant la source considérée.

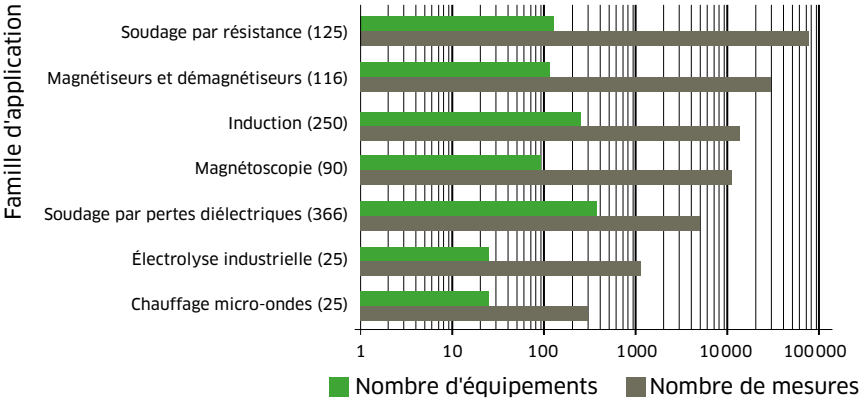
Cet article présente les résultats d'une étude systématique ayant pour objectifs de :

- réaliser un bilan des valeurs d'exposition aux champs électromagnétiques ;
- développer une application simple d'estimation de l'exposition aux postes de travail à ces champs électromagnétiques.

Cette étude s'est déroulée en parallèle et en cohérence avec une campagne, lancée par la CNAMTS, visant à quantifier les champs électromagnétiques avec l'assistance des centres de mesures physiques des Carsat et de la Cramif.

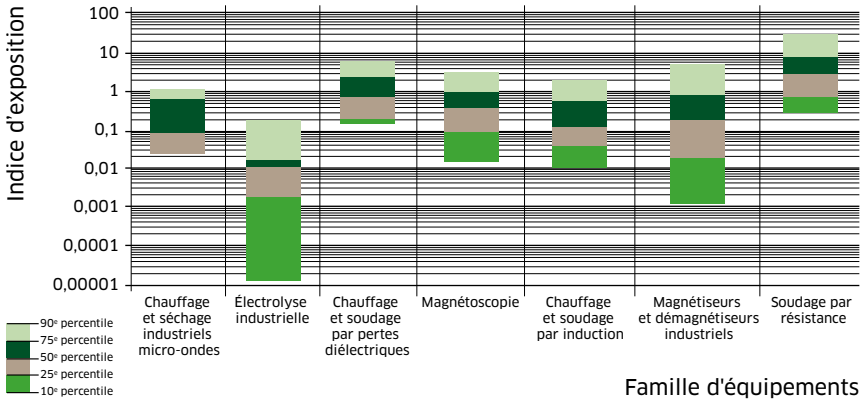
LES ÉQUIPEMENTS INDUSTRIELS RAYONNANTS

Les principales sources industrielles d'émission de champs électromagnétiques aux postes de travail ont été décrites par P. Demaret [2]. La figure 1 donne, sur une échelle logarithmique, l'effectif des machines pour sept familles d'équipements particulièrement rayonnants : soudage par résistance, magnétiseurs-démagnétiseurs, chauffage et soudage par induction, magnétoscopie, soudage par pertes diélectriques, électrolyse, chauffage par micro-ondes. En supposant qu'à chaque poste de travail est associé un opérateur, on peut



↑FIGURE 3

Répartition du parc français de machines (histogramme vert) et du nombre de fiches de relevés pour les sept familles (histogramme gris).



↑FIGURE 4

10e, 25e, 50e, 75e et 90e percentiles de l'indice d'exposition pour chaque famille d'équipements.

estimer qu'au moins 100 000 personnes travaillent à proximité de ces équipements.

MÉTHODES DE MESURE

Pour chaque famille, un mode opératoire de mesurage des champs électromagnétiques a été élaboré et des fiches de relevés rédigées. Le tableau 1 définit les grandeurs mesurées pour chacune des sept familles d'équipements. Le tableau 2 donne le type d'appareil utilisé pour la mesure de chaque grandeur.

L'exposition aux champs électromagnétiques aux postes de travail est évaluée selon la directive européenne 2013/35/UE, à partir de la valeur efficace la plus élevée des grandeurs mesurées pour les champs électrique et magnétique dont la fréquence est inférieure à 10 MHz. Pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 6 GHz, la grandeur est moyennée sur un intervalle de temps de 6 minutes.

Les mesurages des champs électriques et/ou magnétiques ont été effectués au niveau du poste de travail (Cf. Figure 2), à la hauteur correspondant à la valeur maximale de la grandeur mesurée par rapport à la taille d'un opérateur moyen (H = 1,75 m). Lorsque les mains des opérateurs pouvaient évoluer à proximité des éléments rayonnants (cas des soudeuses hautes fréquences, par exemple), des mesures complémentaires ont été faites en ces points particuliers.

Pour chacun des résultats, la valeur de la grandeur mesurée (intensité du champ électrique, du champ magnétique ou de l'induction magnétique, du courant induit) a été comparée à la VA définie par la directive européenne 2013/35/UE correspondante. Un indice d'exposition R a été calculé. Il est égal au rapport entre la valeur de cette grandeur et celle de la VA dans la même unité pour les basses fréquences (f ≤ 100 kHz) ou au carré de cette valeur pour les hautes fréquences (f > 100 kHz) :

$$R = \frac{VM}{VA} \text{ si } f \leq 100 \text{ kHz}$$

$$R = \frac{VM^2}{VA^2} \text{ si } f > 100 \text{ kHz}$$

avec VM : valeur mesurée au poste de travail et VA : valeur déclenchant l'action.

Pour les opérations de soudage par résistance, la méthode décrite dans la norme européenne EN 50505 (2008) a été appliquée [3, 4]. Le calcul de cet indice tient compte de l'aspect multifréquentiel du rayonnement émis et du déphasage qui existe entre les signaux de différentes fréquences.

L'exploitation statistique de la distribution des résultats des mesures retraduits en indice d'exposition permet, d'une part, d'estimer le pourcentage des opérateurs susceptibles d'être exposés à des intensités de champ électromagnétique ou de courant induit supérieures aux VA dans telle ou telle famille d'équipements (indice d'exposition R supérieur à 1) et, d'autre part, d'apprécier la sévérité de l'exposition au travers de la valeur médiane de l'indice d'exposition.

EXPOSITION AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

997 postes de travail à proximité de machines rayonnantes ont été mesurés dans toute la France. Pour diverses raisons (métrologiques, opportunités, priorités de prévention), la répartition du nombre de postes mesurés ne correspond pas à celle du nombre d'équipements (Cf. Figure 3).

Les 10e, 25e, 50e (valeur médiane), 75e et 90e percentiles des indices d'exposition, calculés pour chaque famille d'équipements, sur l'ensemble des fiches recueillies, sont présentés sur la figure 4 (en échelle logarithmique). Cette présentation permet de constater que la VA la plus sévère définie par la directive européenne 2013/35/UE et correspondant à la possibilité de stimulations des tissus nerveux et musculaires dans les bandes de fréquences inférieures à 100 kHz et d'effets thermiques au-delà, est susceptible (25 à 50% des mesures réalisées) d'être dépassée pour six des sept familles d'équipements mesurés. Seuls les résultats de mesurage concernant la famille « Électrolyse industrielle » sont toujours inférieurs à la VA pour les champs magnétiques statiques.

Un examen plus approfondi des conditions de fonctionnement des équipements a permis de discerner une ou plusieurs sous-familles au sein d'une même famille d'équipements. N'ont été prises en compte que les sous-familles contenant au minimum une vingtaine de fiches de relevés.

Pour chaque sous-famille, une analyse identique à celle réalisée par famille a été reproduite. Les résultats obtenus sont donnés sur la figure 5.

Les 10e, 25e, 50e (valeur médiane), 75e et 90e percentiles des indices d'exposition ont été recalculés pour chaque sous-famille d'équipements, sur l'ensemble des fiches recueillies (Cf. Figure 3). Cette fois, la VA est susceptible d'être dépassée pour 15 sous-familles sur les 19 définies.

APPLICATION OSERAY DÉDIÉE À L'ESTIMATION DE L'EXPOSITION

Une application informatique à l'intention des entreprises, intitulée Oseray[2], a été élaborée à partir de ces résultats. Pour chaque famille d'équipements, nous avons pu, en fonction des résultats, distinguer plusieurs sous-familles dépendant de la partie du corps exposée (mains, tête et tronc), de la distance entre le poste de travail et la source de rayonnement électromagnétique (magnétiseurs-démagnétiseurs, chauffage par micro-ondes), du type d'équipement utilisé (soudage par résistance, presse HF) ou du type de fabrication (presses HF).

L'application a été conçue pour être simple, conviviale, facile à utiliser sur tout type d'ordinateur disposant d'une connexion internet. Le choix de la famille d'équipements et éventuellement de la sous-famille se fait en cliquant sur des images ou des icônes et les résultats sont présentés sous la forme de documents téléchargeables et imprimables. L'application donne certaines explications et compléments essentiels à la compréhension des résultats et renvoie directement à plusieurs documents disponibles sur internet. ●

1. Décret n° 2016-1074 du 3 août 2016.

2. Téléchargeable sur www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/OSERAY

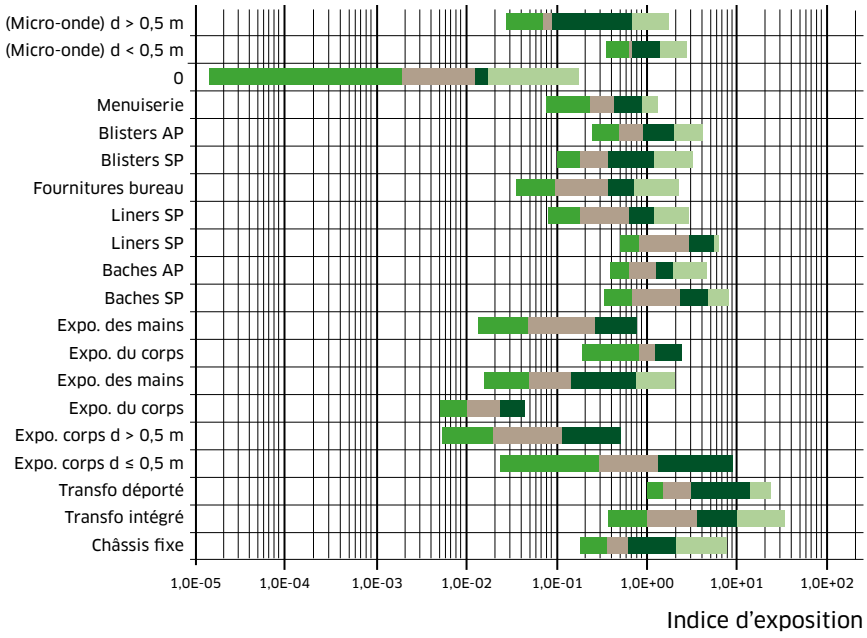


FIGURE 5

10e, 25e, 50e, 75e et 90e percentiles de l'indice d'exposition pour chaque sous-famille d'équipements.

Remerciements

Nous remercions les membres des Centres de mesures physiques des Carsat et de la Cramif pour leur collaboration à la réalisation des mesures en entreprises ayant permis l'aboutissement de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 2013/35/ue du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques). Journal Officiel du 26 juin 2013.

[2] DEMARET P. Intégrer le risque « rayonnements électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels, INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 225, ND 2350, 2011.

[3] Commission Européenne de Normalisation, Norme de base destinée à l'évaluation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques émanant du matériel de soudage par résistance et des techniques connexes, EN 50505, juin 2008.

[4] DEMARET P., LE BERRE G., HENOFF R. Comment mesurer le champ magnétique aux postes de travail des machines à souder par résistance, INRS, *Hygiène et sécurité du travail,* 233, 2013.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Wise, un outil d'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques

Davy Gaillot, Martine Lienard Université de Lille 1 – IEMN

Matthias Van Den Bossche, Leen Verloock, Emmeric Tanghe, Luc Martens, Joseph Wout, Kris Vanhecke Université de Gand – i Minds

Thierry Demol CITC-EuraRFID

André Gheysels Hôpital Alost Asz

Les entreprises disposent aujourd'hui d'un outil simple d'utilisation, baptisé Wise, pour évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques des employés en conditions normales de travail. Accessible sur le web, cette application permet se mettre en conformité avec la directive européenne 2013/35/UE.

Les employeurs de l'Union européenne feront prochainement face à de nouvelles contraintes législatives à fort impact économique quand la directive européenne 2013/35/UE concernant l'exposition aux champs électromagnétiques (EM) de tous leurs employés sera mise en application au 1er janvier 2017 [1]. Afin de les aider à évaluer leurs risques - les préventeurs en entreprise ont bien souvent une méconnaissance des effets liés aux champs EM et les mesures qui doivent être effectuées - un outil logiciel développé dans le cadre du programme INTERREG IV WISE (*Wireless Safety for Employees*) accessible sur le web leur est proposé (d'autres outils existent, cf. Encadré). Simple d'utilisation, cette application s'appuie sur une importante base de données de valeurs de champs EM. Elle permet aux entreprises, sans connaissance approfondie sur les champs EM, d'évaluer l'exposition des employés dans leur environnement de leurs machines et la conformité avec la directive. Celle-ci repose essentiellement sur les recommandations de l'ICNIRP (Commission internationale sur la radioprotection non ionisante) de 1998 [2] et 2010 [3].

Wise a plusieurs objectifs. Il permet de guider les préventeurs, de catégoriser les équipements et de donner les valeurs de champs électriques et magnétiques en fonction de la distance autour de ceux-ci. Il permet également de comparer les résultats avec les valeurs déclenchant l'action et les limites d'exposition de la directive européenne. Enfin, il sert à spécifier les actions qui doivent être menées par l'entreprise. L'ensemble de ces points est résumé dans un rapport de conformité.

Cette application ne remplace pas les mesures mais permet aux conseillers d'identifier rapidement et à moindre coût les problèmes éventuels et de prévoir toutes les mesures nécessaires. Son utilisation se justifie donc pour des raisons tout autant économiques que pragmatiques pour les préventeurs et les entreprises. L'outil est disponible sur ordinateur portable, tablette et téléphone mobile.

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL

L'outil Wise comprend les éléments suivants:

- un inventaire des sources de rayonnement dans la gamme de fréquence allant de 1 Hz à 300 GHz classées par secteur et par famille d'équipements;
- une évaluation de l'exposition autour de chaque source;
- une analyse de risque pour chaque source;
- une base de données et une interface pour évaluer l'exposition autour de chaque source pour un opérateur en fonction de la distance;
- les limites données par la directive européenne.

La base de données repose sur une large campagne de mesures effectuée dans le cadre du projet Wise, la littérature (articles de conférences et revues avec comité de lecture) ainsi que toutes les bases de données et les informations disponibles, comme la norme européenne EN 50499 [4].

ENCADRÉ

Les autres outils disponibles pour évaluer l'exposition aux rayons EM

Des alternatives à Wise existent. L'outil EMES (*Electromagnetic Fields Evaluation System,* www.eval.at/EMES) se veut un support des employeurs pour évaluer l'exposition des opérateurs sur le lieu de travail [5]. En revanche, EMES doit être installé sur les ordinateurs des utilisateurs et ne fonctionne pas comme une interface web. EMES, plus orienté pour les experts, n'est disponible qu'en allemand et ne contient que 2 450 sources. Il est à noter qu'une large proportion de ces sources n'est pas à caractère industriel. De son côté, l'étude INTERROC collecte des études de cas dans sept pays [6]. Elle évalue notamment l'association possible entre les expositions aux postes de travail aux champs EM et les tumeurs du cerveau et du système nerveux central en s'appuyant sur la littérature et les résultats de la base de données de mesures d'exposition au poste de travail (OEMD). L'outil EMFWELD (*Electromagnetic Fields in Welding*, www.emfweld.com) a, pour sa part, l'ambition d'accroître les connaissances et la compréhension des champs EM pour les techniques de soudage et d'inspection de particules magnétiques. Il vise la conception d'un outil logiciel pour l'évaluation de l'exposition d'un opérateur en utilisant des paramètres de soudage. Hamnerius *et al.* se sont ainsi focalisés sur l'évaluation de l'exposition au soudage dans le contexte de la directive EU [7]. On note également l'application Oseray (Outil simplifié d'évaluation des rayonnements électromagnétiques) développée par l'INRS qui concerne les familles de machines industrielles les plus rayonnantes. Elle incitera les employeurs, en cas de dépassement de VA, à prendre contact avec leur Carsat ou un laboratoire pour réaliser des mesures en situation [8]. Enfin, l'Union européenne a édité un guide d'application de la directive [9].

L'utilisateur n'a pas besoin d'installer de logiciels ni d'extensions dans l'explorateur web. Ainsi, l'outil ne dépend d'aucune plateforme mais nécessite seulement un explorateur compatible HTML5 et bien entendu une connexion Internet. L'outil génère un rapport de conformité pour les équipements et les machines présentes dans l'entreprise et ceci en fonction des conditions normales de travail pour les employés. La figure 1 résume la structure de l'outil Wise.

MÉTHODE

Comment est réalisé l'inventaire des équipements rayonnants ? Les secteurs suivants ont tout d'abord été choisis : secteurs industriel, électrique, radiodiffusion, télécommunications, radar, médical, commerce et services, transports publiques, bureaux et divers. Pour chaque secteur, différentes catégories ou familles d'équipements sont définies. Pour chaque catégorie, les sources disponibles sont déterminées ainsi que leur fréquence d'émission et toute autre spécification (courant maximum, tension, puissance, etc.). La figure 2 présente une copie d'écran de la sélection d'une source EM dans un secteur (industrie) et pour une catégorie (soudage électrique).

L'évaluation de l'exposition autour d'un équipement a été effectuée à partir de données issues de mesures sur site, de simulations, de la littérature (articles internationaux et études passées ou en cours) et de bases de données existantes de valeurs de champs. Les mesures sur site sont les sources de données les plus intéressantes, car les champs ont été mesurés en conditions opérationnelles. Néanmoins, les mesures ont été effectuées avec des protocoles et des appareils différents, dépendants de la technologie, de la fréquence… Dans le cadre de ce projet, des mesures complémentaires ont été réalisées en bande étroite et large bande sur un certain nombre de sources identifiées. De plus, des données de mesures ont été sélectionnées à partir de la littérature. Il est à noter qu'il existe souvent un nombre limité de mesures et de valeurs de champs et

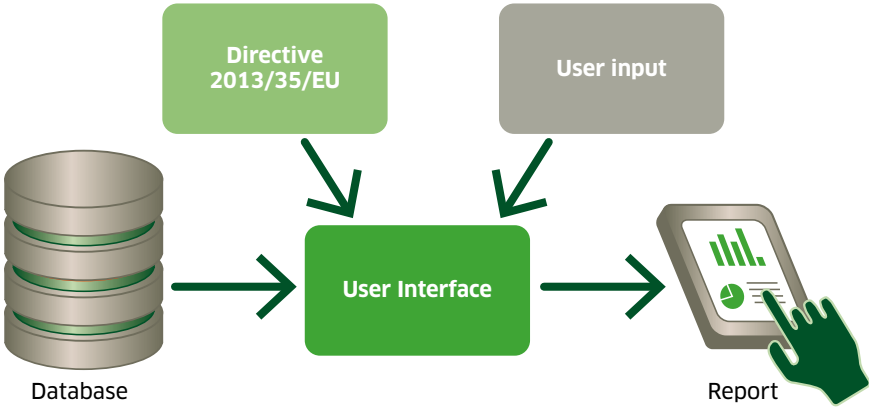
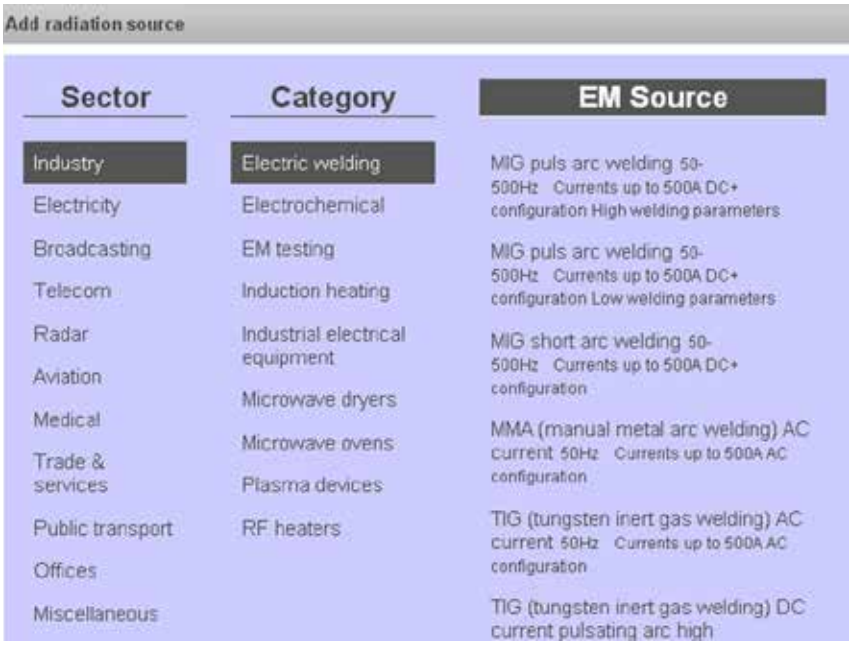


FIGURE 1

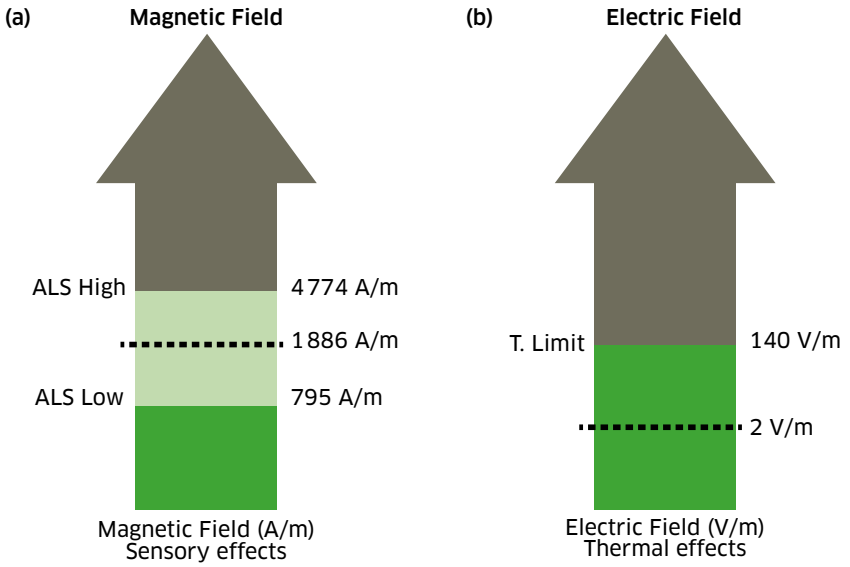
Structure de l'outil Wise (base de données, interface utilisateur, données d'entrées utilisateur et rapport de conformité).

La couche graphique de présentation de l'outil est implémentée comme toute application web à partir des technologies web standard : HTML, JavaScript, et CSS. Le choix s'est porté sur une application à page unique (SPA) qui offre à l'utilisateur une expérience similaire quel que soit l'explorateur ou la machine connectée (ordinateur, tablette, smartphone). Les données de mesures et de simulations sont stockées dans une base de données SQL sur un serveur à distance. Ce serveur gère les services web (API) qui encapsulent le domaine logique. La couche de présentation affiche les informations d'exposition en interrogeant le service web.



↑FIGURE 2

Sélection de la source EM dans un secteur et pour une catégorie.



↑FIGURE 3

Exemple d'évaluation de l'exposition en conditions de travail.
a) Champ magnétique pour une soudeuse par résistance à 50 Hz à une distance de 5 cm.
b) Champ électrique pour un point d'accès WiFi à 2,45 GHz à une distance de 1 m.

que les spécifications exactes des sources ne sont pas toujours disponibles. Toutes les informations disponibles pour la source considérée sont citées dans l'outil.

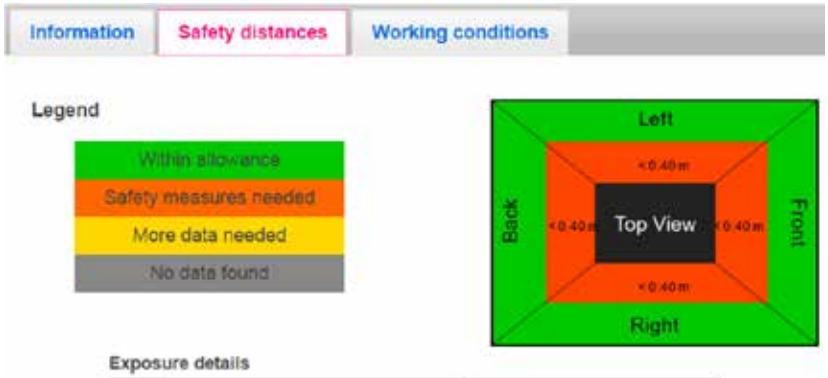
ANALYSE DES RISQUES

L'analyse des risques se décompose en deux étapes. Premièrement, une analyse des champs est effectuée en fonction de la distance pour des positions typiques de travail (Cf. Figure 3). Dans un second temps, ces valeurs sont comparées aux valeurs déclenchant l'action (VA) de la directive 2013/35/UE pour les effets sensoriels et les effets sur la santé (1 Hz – 10 MHz) ainsi que les effets thermiques (100 kHz – 300 GHz) [1]. À titre d'exemple, la figure 3 présente les résultats d'une telle analyse comparative pour une soudeuse par résistance dont la fréquence fondamentale est de 50 Hz et la distance opérateur-source de 5 cm, et pour un point d'accès WiFi à 2,45 GHz avec une distance opérateur/source de 1 m.

Le résultat de l'étude comparative montre que les VA pour les effets sensoriels dus au champ magnétique sont dépassées. En revanche, la VA concernant les effets thermiques pour le champ électrique n'est pas dépassée pour le WiFi. Pour l'analyse des risques, l'outil exploite la catégorisation de l'exposition développée par Bolte et Pruppers [10]. Dans cette approche, les environnements de travail et les équipements sont divisés en trois catégories. Pour la catégorie 1, les VA ne sont pas dépassées dans les conditions normales. Pour la catégorie 2, les VA peuvent être dépassées mais les valeurs limites d'exposition ne le sont pas dans les conditions normales. L'employeur doit alors prendre des dispositions qui sont divisées en deux sous-catégories: 2a et 2b. Seules des instructions d'usage sont requises pour la sous-catégorie 2a (déplacer la source ou l'opérateur, etc.) alors que des préconisations techniques sont demandées pour la sous-catégorie 2b (barrières, blindage, etc.). Enfin, les valeurs limites d'exposition peuvent être dépassées pour la catégorie 3.

À ce jour, 117 sources EM non ionisantes sont implémentées dans la base qui contient 16805 points de données en fonction de la distance (7811 mesures et 8994 simulations). Pour l'analyse des risques, il est également possible de modifier la puissance émise par la machine ou le gain d'antenne dans le logiciel sachant que les spécifications techniques d'un équipement peuvent varier d'une entreprise à une autre. En résumé, les spécifications du logiciel Wise sont les suivantes:

- interface de type web avec information générale et génération du rapport d'évaluation/conformité selon la directive 2013/35/UE;
- liste des sources divisée par secteur



	In excess			Within allowance		
Side	Distance [m]	E [V/m]	H [A/m]	Distance [m]	E [V/m]	H [A/m]
left	0.20		1010 low sensory	0.40		267
right	0.20		1010 low sensory	0.40		267
front	0.20		1010 low sensory	0.40		267
back	0.20		1010 low sensory	0.40		267

↑FIGURE 4

Distances de sécurité autour d'une soudeuse par résistance à 50 Hz.

et par catégorie ;
- information typique pour chaque source ;
- analyse des conditions de travail fondée sur la distance entre le poste de travail et la source incluant une représentation visuelle claire (Cf. Figure 3) ;
- liste des distances de conformité minimum en correspondance avec l'exposition maximale à la fréquence de fonctionnement nominal (Cf. Figure 4) ;
- information sur les mesures de prévention dans le cas où les VA ou les VLE sont dépassées ;
- données évolutives dans la mesure du possible (puissance) ;
- spécifications des équipements obtenues dans les manuels et notices techniques.

En pratique, les préventeurs peuvent rentrer les machines présentes dans leurs entreprises au moyen de l'interface web de l'outil qui génère un rapport de conformité par rapport à la directive européenne. L'outil Wise indique alors quelles sont les dispositions que devraient prendre l'employeur pour l'ensemble des cas où les VA ou les VLE sont dépassées (catégories 2 et 3).

Si l'outil Wise n'a pas vocation à se substituer aux mesures sur sites, il peut être utilisé pour aider les conseillers en prévention à identifier les problèmes éventuels et à prendre les dispositions nécessaires pour se conformer à la législation nationale. L'outil Wise est libre d'accès et peut être testé, après création d'un compte utilisateur, sur www.wica.intec.ugent.be/exposure-tool/prevention. ●

1. www.wica.intec.ugent.be/exposure-tool/prevention

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 2013/35/UE. *European Parliament and Council of the European Union DIRECTIVE 2013/35/UE of the European parliament and of the council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC.* Official Journal of the European Union L179. June 26, 2013.

[2] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP 1998). *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields* (up to 300 GHz). Health Phys. 74(4), 494–522, 1998.

[3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP 2010). *Guidelines for limiting exposure to time- varying electric and magnetic fields* (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 99(6), 818–836, 2010.

[4] NBN EN 50499 - *Assesment of workers' exposure to electric and magnetic fields of industrial induction heating equipment*. Belgique, 2008, 43 p.

[5] Molla-Djafari H. *Et al. Crowdtasking – A Solution to Evaluate Workers Combined Exposure due to Multiple Sources, BioEM2014 Joint Meeting of The Bioelectromagnetics Society (BEMS) and the European BioElectromagnetics Association (EBEA),* Cape Town, South Africa, 8-13 June 2014, paper B-116.

[6] Van Tongeren *Et al.* Interocc Study Group. *Assessing occupational exposure to chemicals in an international epidemiological study of brain tumours.* Ann. Occup. Hyg. 57(5), 610-626, 2013.

[7] Hamnerius Y., Nilsson T., Attback K. *Method for assessing magnetic fields from welding against the coming EU directive, BioEM2013 Joint Meeting of The Bioelectromagnetics Society (BEMS) and the European BioElectromagnetics Association* (EBEA), Thessaloniki, Greece, June 10-14, 2013, paper 06-4.

[8] Dossier *Travail et Sécurité* n°765 d'octobre 2015, www.travail-et-securite.fr

[9] Commission européenne. Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE. Champs électromagnétiques, novembre 2014.

[10] Bolte Jfb., Pruppers Mjm. *Electromagnetic fields in the working environment.* Hague: Ministry of Social Affairs and Employment, 2006.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Quelle surveillance médicale des travailleurs exposés aux champs électromagnétiques ?

Martine Souques, Jacques Lambrozo EDF, service des Études médicales

Isabelle Magne EDF, R&D

La directive européenne 2013/35/UE demande d'assurer une surveillance médicale des travailleurs exposés aux champs électromagnétiques (CEM), mais sans préciser à partir de quel niveau d'exposition. Après avoir expliqué les effets sur la santé d'une exposition aiguë, cet article présente une stratégie de surveillance médicale à proposer en cas de symptôme ou de surexposition ainsi que pour des travailleurs à risque particulier : les femmes enceintes et les porteurs de dispositifs médicaux.

La directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la diretive 2004/40/CE [1] couvre l'ensemble des effets biophysiques connus produits par des champs électromagnétiques de 0 à 300 GHz. Elle ne couvre pas les éventuels effets à long terme, *« y compris des effets cancérigènes potentiels, pouvant découler d'une exposition à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variant dans le temps, à propos desquels il n'existe actuellement pas d'éléments scientifiques probants qui permettent d'établir un lien de causalité »*. Elle définit des valeurs limites d'exposition (VLE) et des valeurs déclenchant l'action (VA) en fonction de la fréquence des champs électromagnétiques (CEM). Le respect des VA garantit que les VLE ne sont pas dépassées. Nous présentons ici notre analyse de la directive sans avoir connaissance du décret de transposition en droit français qui est encore en préparation lors de la rédaction de cet article et qui a été publié depuis (décret n° 2016-1074 du 3 août 2016). L'article 8 stipule qu'*« afin de prévenir et de détecter le plus rapidement possible tout effet nocif sur la santé résultant de l'exposition à des champs électromagnétiques (CEM), une surveillance appropriée de la santé des travailleurs est assurée conformément à l'article 14 de la directive 89/391/CEE »* :

- à partir de quel niveau d'exposition ? Cette surveillance s'impose si un travailleur signale *« tout effet indésirable ou inattendu sur la santé »* ou *« lorsqu'une exposition supérieure aux VLE est détectée »*. L'employeur veille alors à ce que le travailleur concerné puisse bénéficier d'examens médicaux ou d'une surveillance médicale appropriés ;
- que proposer comme surveillance médicale appropriée ? Les résultats de cette « surveillance » sont conservés pour permettre une consultation ultérieure si nécessaire et le travailleur peut accéder à son dossier personnel sur demande.

Dans les articles 4 et 5 figurent des références aux travailleurs à risque particulier. Ainsi, l'employeur :

- prête attention à *« toute incidence sur la santé et la sécurité des travailleurs à risque particulier, notamment les travailleurs portant des dispositifs médicaux implantés, actifs ou passifs tels que des stimulateurs cardiaques, les travailleurs portant à même le corps des dispositifs médicaux »* ;
- *« élabore et applique un plan d'action qui comprend des mesures techniques et/ou organisationnelles afin d'éviter tout risque pour les travailleurs à risques particuliers. »*

C'est l'article 5-4 qui définit le mieux les travailleurs à risque particulier qui sont *« les travailleurs ayant déclaré qu'ils portent un dispositif médical implanté actif ou passif tel qu'un stimulateur cardiaque, ou qu'ils portent à même le corps un dispositif médical annexe tel qu'une pompe à insuline, ou les travailleuses enceintes ayant informé leur employeur de leur état »*.
Comment doit s'effectuer cette évaluation particulière pour ces employés, dans la mesure où la directive ne précise pas de VLE, ni de VA particulière pour ces travailleurs ?

LES EFFETS SUR LA SANTÉ D'UNE EXPOSITION AIGUË AUX CEM

Les effets à court terme d'une exposition à un CEM découlent des mécanismes biophysiques d'action connus qui sont différents selon la gamme de fréquence considérée.
Pour les champs magnétiques statiques intenses, on peut observer des vertiges lors des mouvements brusques de la tête, dus aux interactions avec l'oreille interne, ou encore une sensation de goût métallique dans la bouche.
Pour les basses fréquences (1 Hz – 100 kHz), le champ externe induit un champ électrique à l'intérieur de l'organisme. C'est au niveau de l'œil que les premières manifestations ont été décrites, avec apparition de magnétophosphènes par excitation directe de la rétine.
Pour les radiofréquences (10 MHz – 10 GHz), la production de chaleur est le seul mécanisme d'action biologique démontré. Quand les capacités de thermorégulation mises en place par l'organisme sont dépassées au niveau d'un tissu, des brûlures peuvent apparaître. Au niveau de l'œil, c'est le cristallin qui est le plus sensible car peu vascularisé, avec formation possible de cataracte.
Pour les fréquences intermédiaires (100 kHz – 10 MHz), peu d'études ont été publiées. Dans cette gamme de fréquences, les deux mécanismes d'induction de champ électrique et de production de chaleur coexistent.

Sur la base de ces mécanismes d'action et de leurs effets, les organismes internationaux ont proposé des limites d'exposition tant pour le public que pour les travailleurs. Ces limites ont été calculées en tenant compte des incertitudes et de la variabilité de l'état de santé selon les catégories de population. Ainsi, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) a publié des valeurs guides pour le champ magnétique statique en 2009 [2], pour les basses fréquences en 2010 [3] et pour les radiofréquences en 1998 et 2009 [4, 5]. Ces valeurs guides ont été reprises dans la directive 2013/35/UE. Quelle que soit la gamme de fréquence, aucun symptôme, aucune pathologie n'est attendue quand les restrictions de base de l'ICNIRP sont respectées.

QUELLE SURVEILLANCE PROPOSER AUX TRAVAILLEURS EXPOSÉS ?

La directive 2013/35/UE demande d'assurer une surveillance médicale pour les travailleurs *« afin de prévenir et de détecter le plus rapidement possible tout effet nocif sur la santé résultant de l'exposition à des champs électromagnétiques. »* À partir de quel niveau d'exposition doit-on considérer qu'un travailleur est exposé ? Aucune information n'est donnée dans le texte, mais le guide pratique associé à la directive, publié fin 2015, indique qu' *« en l'absence de risques connus ou de symptômes liés à l'exposition à des champs électromagnétiques inférieurs aux VLE, il n'y a pas lieu de procéder à des examens médicaux réguliers. La surveillance doit être justifiée par d'autres raisons »* [6].
Les travailleurs à risque particulier tels que définis dans la directive sont à prendre en compte et une évaluation du risque doit être réalisée quelle que soit l'exposition rencontrée.

© Fabrice Dimier pour l'INRS

↓ Une signalétique de prévention avertissant du danger engendré par les champs électromagnétiques pour les porteurs de *pacemakers*.

En cas de symptôme ou de surexposition

Les symptômes éventuels liés à une exposition à un champ basse fréquence intense, par exemple des magnétophosphènes, sont transitoires et auront disparu lors de l'examen clinique. Un interrogatoire et un examen clinique soigneux semblent suffisants. Ils pourront être complétés par des examens complémentaires en fonction des signes d'appel, notamment en cas d'exposition supérieure aux VLE.

En cas de surexposition dans la gamme des radiofréquences, des sensations de chaleur voire des brûlures peuvent persister après l'exposition. Ces symptômes orienteront l'examen médical.

Les surexpositions entraînant une blessure ou tout autre préjudice doivent être traitées comme un accident du travail. Dans tous les cas, il est important de garder trace de cette consultation médicale, en cas de renouvellement des symptômes ou de contestation future.

Les symptômes reliés à l'électrohypersensibilité (EHS) qui pourraient être attribués à une exposition professionnelle aux CEM sont à aborder de façon particulière. Si le consensus scientifique est que les CEM ne sont pas en cause [7-9], il est nécessaire de prendre en charge la personne, de comprendre l'origine des troubles et de les traiter.

Les femmes enceintes

Les femmes enceintes représentent, selon la directive, une catégorie de travailleurs à risque particulier. Référence est faite à la directive 92/85/CE concernant *« la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleuses enceintes, accouchées ou allaitantes au travail (dixième directive particulière au sens de l'article 16 paragraphe 1 de la directive 89/391/CEE).»*

Celle-ci prend en compte les risques chimique, physique et biologique. L'article 4 indique que pour toute activité susceptible de présenter un risque spécifique d'exposition aux agents, procédés ou conditions de travail, dont une liste non exhaustive figure à l'annexe I (les rayonnements non ionisants y sont cités), la nature, le degré et la durée de l'exposition, dans l'entreprise et/ou l'établissement concernés devront être évalués par l'employeur, afin de pouvoir apprécier tout risque pour la sécurité ou la santé ainsi que toute répercussion sur la grossesse et déterminer les mesures à prendre.

À ce jour cependant, la littérature scientifique ne fait pas état d'effet sur la reproduction ni sur la grossesse, quand les expositions sont inférieures aux niveaux de référence de l'ICNIRP pour le public [2, 3, 5, 9, 10].

Aucune limite d'exposition particulière n'est fixée par la directive 2013/35/UE, hormis celles définies pour tout travailleur. Nous proposons, à titre de précaution dans le cas des femmes enceintes, d'appliquer les valeurs d'exposition du public définies dans la recommandation 1999/519/CE [11].

Les porteurs de dispositifs médicaux

Les travailleurs porteurs de dispositifs médicaux, implantables (par exemple, cardiaques, neurologiques, cochléaires, orthopédiques) ou non (par exemple, pompes à médicaments) représentent, selon la directive, une autre catégorie de travailleurs à risque particulier. Des dysfonctionnements de ces dispositifs peuvent apparaître en dessous des VA. La littérature scientifique et la normalisation sont plus fournies pour les porteurs d'implants actifs, en particulier dans le cas des implants cardiaques pour lesquels de nombreuses études de compatibilité ont été réalisées et publiées [12].

Tous les travailleurs porteurs d'un dispositif médical implantable actif (DMIA) reçoivent de leur médecin et avec les notices des appareils, des avertissements généraux destinés à éviter des situations dans lesquelles il peut se produire un risque d'interférence, comme par exemple une distance d'utilisation minimale (téléphone portable). Mais ces consignes sont parfois floues, comme par exemple « ne pas s'approcher d'une source de champ fort ». Que signifie s'approcher ? Que signifie un champ fort ? Les éléments ci-dessous permettent d'affiner l'évaluation du risque.

Les normes

La norme EN 50527-1 (2010) est générale à tous les DMIA [13] et la norme EN 50527-2-1 (2011) est spécifique aux stimulateurs cardiaques [14]. Ces normes ont été rédigées à la suite d'un mandat de la Commission européenne lié à la directive 2004/40/CE et sont en cours de mise à jour avec la directive 2013/35/UE. Elles donnent des indications sur les différentes méthodes d'évaluation du risque, clinique et non clinique. La norme EN 50527-2-2:20XX spécifique aux porteurs de défibrillateurs implantables est en cours d'élaboration.

La norme EN 50527-1 fournit un mode opératoire pour évaluer le risque pour les travailleurs portant un ou plusieurs dispositifs médicaux implantables actifs vis-à-vis de l'exposition aux CEM sur le lieu de travail. C'est la seule norme concernant le fonctionnement du dispositif *in situ*, c'est-à-dire implanté dans le corps humain, toutes les autres (série EN 45502) étant des normes de compatibilité électromagnétique. Elle spécifie comment effectuer une évaluation générale des risques et comment déterminer s'il est nécessaire de réaliser une évaluation détaillée, aux moyens de méthodes cliniques ou non cliniques décrites dans la norme. Elle couvre toute la gamme des fréquences de 0 à 300 GHz et les conditions normales de travail (fonctionnement normal, maintenance, nettoyage et autres situations faisant partie du travail usuel).

La procédure d'évaluation commence par l'identification des travailleurs porteurs de DMIA. Le travailleur doit coopérer avec l'employeur pour identifier les risques d'interférence du DMIA avec les CEM sur le lieu de travail. Il est de la responsabilité de l'employeur de mettre

© Guillaume J. Plisson pour l'INRS

↑ La surveillance médicale s'impose notamment si un travailleur exposé à des champs EM signale tout effet indésirable ou inattendu sur sa santé.

à disposition du travailleur porteur de DMIA les informations correctes pour chaque lieu de travail qu'il fréquente.
L'évaluation des risques est fondée sur le fait que :

- les DMIA fonctionnent normalement si les niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE ne sont pas dépassés, sauf dans un champ magnétique statique ou quasi statique (0-1 Hz) où l'exposition ne doit pas dépasser 1 mT ;
- le DMIA a été implanté et programmé conformément aux bonnes pratiques médicales ;
- le matériel présent sur les lieux de travail a été vérifié.

Un tableau donne une liste de matériels respectant les niveaux de référence de la recommandation pour le public (1999/519/CE). Si le matériel utilisé est dans la liste, le médecin doit vérifier que le travailleur porteur du DMIA a reçu les avertissements généraux indiqués ci-dessus. Si le matériel n'est pas dans cette liste, une évaluation spécifique doit être réalisée, sauf si le travailleur a déjà travaillé avec ce matériel sans effet sur le fonctionnement de son DMIA.
L'évaluation des risques doit donc être documentée, gardée dans le dossier médical et communiquée au travailleur concerné. De plus, elle doit être mise à jour si la situation évolue, comme la pose d'un nouveau DMIA, l'évolution de l'état clinique, le changement de lieu de travail, etc.
Si le travailleur est porteur de plusieurs DMIA, l'évaluation des risques est réalisée pour chaque DMIA séparément et les recommandations doivent être faites sur la base du résultat le plus restrictif.
La norme EN 50527-2-1 est spécifique aux travailleurs porteurs d'un stimulateur cardiaque (SC). Elle propose également différentes approches pour l'analyse des risques de façon à permettre à l'employeur et au médecin de choisir celle qui convient le mieux. Par rapport à la norme générique citée plus haut, la procédure est adaptée aux SC pour lesquels il existe un risque vital en cas de dysfonctionnement. Les éléments de choix de la méthode d'évaluation sont plus précis et les méthodes décrites plus en détail.

Dans le cas des dispositifs médicaux implantables neurologiques ou cochléaires, ou des dispositifs annexes tels que les pompes à médicaments, il y a un besoin de normes équivalentes définissant une ou plusieurs méthodes d'analyse de risque.

Procédure d'évaluation : méthode non clinique

Cette méthode consiste, dans un premier temps, à caractériser les champs présents au poste de travail par mesure, calcul ou notice des fournisseurs, en termes de fréquence, d'intensité maximale, de durée transitoire, de modulation, etc.
Dans un second temps, c'est l'immunité de l'implant qui est évaluée. Différents moyens sont à la disposition du médecin, que ce soit la notice du fabricant, l'expertise du médecin qui a posé l'implant, la bibliographie, etc.
La synthèse de ces deux étapes permet de réaliser une évaluation de la compatibilité en comparant les données d'immunité du DMIA à l'intensité du champ auquel le travailleur est exposé. Si, à tous les emplacements de travail possibles, l'immunité est supérieure à l'exposition, le travailleur porteur du DMIA peut travailler sur ce lieu de travail.
Dans le cas contraire, il faut déterminer les risques liés à une interférence électromagnétique :

- aux endroits où l'exposition est supérieure à l'immunité, il faut déterminer si les effets de l'interférence électromagnétique sur le DMIA sont cliniquement significatifs pour une exposition à long terme. Si tel n'est pas le cas, le travailleur porteur du DMIA peut accéder à ces zones et y travailler ;
- si l'effet de l'interférence électromagnétique est cliniquement acceptable pendant de courtes durées (exposition transitoire) mais pas lors de durées plus longues, le travailleur porteur du DMIA peut alors transiter par ces zones mais pas y travailler, ni y rester ;
- si les effets de l'interférence électromagnétique ne sont pas cliniquement acceptables, le travailleur

porteur du DMIA ne doit pas être autorisé à pénétrer dans ces zones.

Procédure d'évaluation : méthode clinique

Le travailleur porteur de DMIA est exposé à une surveillance clinique pendant une durée significative, sur son lieu de travail, dans les situations d'exposition prévisibles (situations normales de travail) ou dans un laboratoire simulant l'exposition sur le lieu de travail.

Le comportement du DMIA est contrôlé par un personnel compétent pendant et après l'exposition.

Cette approche peut ne pas identifier une marge de sécurité, c'est-à-dire identifier la marge entre l'exposition au poste de travail et l'exposition à laquelle le DMIA serait perturbé, sauf si un essai de provocation est effectué (en laboratoire). Les détails d'une telle étude clinique ne peuvent pas être normalisés et le niveau d'investigation requis doit être déterminé avec le médecin du travail et un médecin supervisant les essais.

CONCLUSION

Dans le cadre de la directive 2013/35/UE, les travailleurs exposés aux CEM doivent bénéficier d'une surveillance médicale en cas de symptôme inhabituel attribué à l'exposition ou d'exposition supérieure aux valeurs limites d'exposition. En dehors des travailleurs à risque particulier, aucune surveillance médicale particulière n'est nécessaire.

Les travailleurs à risque particulier doivent bénéficier d'une évaluation de risque particulière dans laquelle le médecin du travail est impliqué. Dans le cas des femmes enceintes, aucune pathologie particulière n'a été liée à l'exposition aux CEM quand les expositions sont inférieures aux niveaux de référence de l'ICNIRP pour le public retranscrits dans la recommandation européenne 1999/519/CE. Dans le cas des implants médicaux actifs, des normes ont été publiées en 2010 et 2011, en particulier pour les stimulateurs cardiaques, et sont en cours de révision. Elles seront à compléter pour d'autres dispositifs médicaux actifs (défibrillateur implantable, neurostimulateur, implant cochléaire, etc.). ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Conseil des communautés européennes. Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE. *Journal officiel de l'Union européenne,* L179, 29 juin 2013, 2013, pp. 1-21.

[2] International commission on non-ionizing radiation protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics,* 96, 4, 2009, pp. 504-14.

[3] International commission on non-ionizing radiation protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varing electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics,* 99, 6, 2010, pp. 818-36.

[4] International commission on non-ionizing radiation protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics,* 74, 4, 1998, pp. 494-522.

[5] International commission on non-ionizing radiation protection. ICNIRP statement on the "Guidelines for limiting exposure to time-vaying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics,* 97, 3, 2009, pp. 257-8.

[6] Commission européenne, editor. Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en oeuvre de la directive 2013/35/UE « Champs électromagnétiques ». Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne ; 2015.

[7] Health protection agency. *Report of the Independent Advisory Group on Non-Ionizing Radiation (AGNIR) – Health effects from radiofrequency electromagnetic fields.* Chilton (UK), Health Protection Agency, 2012.

[8] Oftedal G., Rubin G. J., Hillert L., Van Rongen E. Are some people hypersensitive to electromagnetic fields ? Systematic reviews of scientific studies. *EMF spectrum,* 1, 2012, pp. 3-7.

[9] SCENIHR. *Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)* Bruxelles, European Commission, 2015, 27 janvier 2015.

[10] SCENIHR. *Health Effects of Exposure to EMF.* Bruxelles, European Commission, 2009, 19 janvier 2009.

[11] Conseil des communautés européennes. Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). *Journal officiel des Communautés européennes,* L199, 30 juillet 1999, 1999, pp. 59-70.

[12] Souques M., Magne I., Lambrozo J. Exposition aux champs électromagnétiques et porteurs d'implants médicaux actifs. *Hygiène et Sécurité au Travail.*

[13] Procédure pour l'évaluation de l'exposition des travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs aux champs électromagnétiques. Partie 1 : Généralités, EN 50527-1 (2010).

[14] Procédure pour l'évaluation de l'exposition des travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs aux champs électromagnétiques. Partie 2-1 : Spécification d'évaluation pour les travailleurs avec un stimulateur cardiaque, EN 50527-2-1 (2011).

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Les moyens de prévention contre les champs électromagnétiques

Stéphane Tirlemont Contrôleur de sécurité, Centre interrégional de mesures physiques Nord-Picardie, Carsat Nord-Picardie

La réglementation européenne précise le cadre de l'évaluation des risques liée à l'exposition des salariés aux champs électromagnétiques. Cette évaluation sert de base à la mise en place des moyens de prévention permettant de réduire les expositions professionnelles.

L'évaluation du risque lié à l'exposition de salariés aux champs électromagnétiques est le point de départ de la démarche de prévention. Cette évaluation passe par :

- la recherche et l'identification des sources susceptibles d'exposer les opérateurs ;
- la collecte de données techniques concernant l'équipement et le procédé (fréquence, principe de fonctionnement, puissance, temps d'émission…) ;
- la caractérisation de l'exposition (organisation du poste de travail, occurrence du risque, mesurages…).

L'obligation de résultat en matière de sécurité pour l'employeur est reprise dans l'article 5 de la directive 2013/35/UE. Ainsi, la mise en place d'un plan d'action visant à supprimer ou réduire les risques aura pour objectif de ramener ou de maintenir les expositions sous les seuils décrits dans la directive, de se prémunir des effets indirects et de prendre en compte le cas de l'exposition des opérateurs à risques particuliers (cas des porteurs d'implants, des femmes enceintes…). Enfin, l'exposition doit être réduite au niveau le plus faible possible compte tenu de l'état des techniques. Pour cela, la recherche et la mise en place de solutions techniques et organisationnelles efficaces doivent être menées.

Le choix d'un moyen de prévention à mettre en œuvre est à déterminer en fonction de son efficacité, des caractéristiques de la source, des contraintes et des caractéristiques du procédé et du poste de travail en s'appuyant sur les principes généraux de prévention. La réduction à la source doit être la solution de prévention à privilégier. La mise en place de moyens de prévention collective est aussi possible. Ces solutions sont souvent spécifiques à une application ou un procédé.

LA RÉDUCTION DU RISQUE À LA SOURCE

La réduction du risque à la source consiste à supprimer ou à diminuer l'intensité des champs émis. En fonction du type de source et du procédé, plusieurs pistes sont souvent envisageables comme :

- le remplacement de l'équipement par un autre qui génère peu ou pas de champs électromagnétiques (procédé de chauffage, changement de fréquences…) ;
- l'optimisation des réglages (durée, réduction des puissances…) ;
- l'arrêt ou la diminution de l'émission quand les travailleurs interviennent à proximité des machines. C'est le cas, par exemple, pour un opérateur chargé de la conduite d'un four à induction qui intervient régulièrement à proximité immédiate du creuset ;
- la maintenance préventive, telle que le suivi de l'état des équipements et le remplacement des éléments défectueux. Cela concerne les conducteurs, la continuité électrique, la mise à la terre, les carters de protection…

MOYENS DE PRÉVENTION COLLECTIVE

Le blindage

Le blindage électromagnétique consiste à réduire le champ électromagnétique au voisinage d'un opérateur en interposant un écran (feuille ou grille métallique) entre la source du champ et le poste de travail.

Un blindage est réalisé en matériau électriquement conducteur.

Sa conception nécessite une étude précise ainsi qu'une mise en œuvre soignée.

Attention, un blindage mal conçu peut augmenter l'exposition. Le blindage du champ magnétique basse fréquence est plus complexe et nécessite l'utilisation de matériaux spécifiques. La modification de machines peut être complexe voire impossible et elle est dans tous les cas une affaire de spécialistes.
Le blindage des creusets de fours à induction, par exemple, est difficilement réalisable sur des installations existantes pour des raisons techniques et de coût. L'achat de machines intégrant des dispositifs de protection dès la conception, conformément aux préconisations de la directive « Machines », doit donc être privilégié.

La cage de Faraday

Une cage de Faraday est une enceinte ou cage métallique qui permet d'isoler une portion d'espace de l'influence des champs électromagnétiques. Elle peut être installée pour protéger une zone de travail ou, à l'inverse, confiner un espace contenant une source. Son efficacité est fonction de sa conception au regard du champ à atténuer (basse fréquence, haute fréquence, électrique, magnétique).

Le patin de masse

Pour certaines applications, telles que le soudage par pertes diélectriques de matériaux de grandes dimensions (soudage de bâches), la mise en place d'un blindage n'est pas compatible avec l'activité. Dans ce cas, l'installation d'un patin de masse peut être une solution efficace.

L'éloignement

Les champs électromagnétiques décroissent rapidement avec la distance par rapport à la source. Une solution pour diminuer l'exposition de l'opérateur est donc de l'éloigner des sources d'émission. D'une manière générale, lors de la conception d'une installation, on veillera à implanter les machines émettrices de façon à éviter leur proximité avec les postes de travail et les zones de circulation. Une attention particulière sera portée aux positions des câbles véhiculant des courants de forte intensité.

Il est parfois nécessaire de combiner plusieurs solutions afin d'atteindre les objectifs visés et de ramener l'exposition à un niveau compatible avec la santé. Les Centres de mesures physiques des Carsat/Cramif et l'INRS ont pu apprécier l'efficacité de ces solutions à travers des situations d'exposition au sein des entreprises.

ORGANISATION DU POSTE DE TRAVAIL

D'autres mesures complémentaires peuvent être mises en œuvre comme :

- éviter d'installer les équipements susceptibles d'émettre des champs électriques importants à proximité de parois métalliques qui pourraient réfléchir les champs électriques émis ;
- éviter la présence d'objets métalliques non reliés à la masse ou à la terre à proximité de sources de champs électromagnétiques. Ils peuvent se charger électriquement et occasionner des décharges électriques avec ou sans génération d'étincelles vers une personne ou un objet. Les objets métalliques portés (outils, bijoux, boucles de ceinture, fermetures à glissière…) peuvent aussi s'échauffer et occasionner des brûlures ;
- pour les rayonnements « hautes fréquences » (presse HF) : isoler la personne du sol et des surfaces métalliques soumises au champ permet de réduire l'exposition aux courants induits ;
- pour des valeurs de champ électrique supérieures à 10 V/m : le champ peut perturber le fonctionnement d'appareils électroniques. Il convient donc de s'assurer que les équipements susceptibles de générer un risque du fait de leur dysfonctionnement (automates ou robots, chariots automoteurs ou nacelles, organes de détection incendie ou de sécurité…) ne sont pas perturbés aux valeurs de champ ambiant. En ce qui concerne les personnes porteuses d'implants actifs (stimulateurs cardiaques, pompes à insuline, prothèses auditives…), une vigilance particulière est de rigueur. Les champs électromagnétiques ambiants peuvent perturber leur fonctionnement. Cela concerne les salariés de l'entreprise mais aussi les visiteurs et les interventions d'entreprises extérieures (signalétique, plan de prévention) ;

© Fabrice Dimier pour l'INRS

Pour déclencher une opération de chauffage par induction, émettant des champs électromagnétiques, l'opérateur appuie sur une pédale située derrière le marquage rouge au sol.

© Gaël Kerbaol/INRS

↑ Les réglages d'une presse à haute fréquence ont été modifiés afin de réduire le rayonnement et d'obtenir une baisse significative des émissions électromagnétiques.

- dans le cas de salariés de l'entreprise, il convient de s'assurer, avec l'aide du fabricant et du médecin du travail, de la compatibilité de ces équipements avec les niveaux de champs rencontrés. Dans l'attente de cette confirmation, et lorsque le champ excède les valeurs limites fixées pour le public dans un périmètre, il est recommandé, par précaution, d'éloigner les porteurs d'implants de cette zone ;
- une formation et une information des salariés sur les risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques sont à dispenser à l'ensemble des opérateurs utilisant ces équipements. Celles-ci leur permettront d'avoir connaissance du risque et des effets sur la santé et d'être conscients de la nécessité d'adapter le réglage de la machine afin de réduire l'exposition et d'éviter de se surexposer en restant inutilement à proximité des sources. Aux fréquences très basses (< 400 Hz), des effets sensoriels passagers peuvent être ressentis. Il importe d'en informer les travailleurs et de s'assurer que ces effets ne peuvent conduire à un risque pour la sécurité.

PROTECTION INDIVIDUELLE

Le recours aux équipements de protection individuelle (EPI) est envisageable. Toutefois, les seuls EPI disponibles sur le marché atténuent le champ électrique entre 10 MHz et 2 GHz. En dehors des interventions sur pylônes, leur usage dans le milieu du travail est limité.

CONCLUSION

L'efficacité et la diversité des moyens de prévention possibles pour réduire l'exposition des salariés peuvent permettre aux entreprises de construire un plan d'action et d'opter pour des moyens qui lui sont adaptés.
Une vigilance particulière doit être cependant portée sur les moyens de prévention collective techniques qui, mal conçus, peuvent contribuer à accroître l'exposition. Outre la réduction de l'exposition des salariés sous les valeurs d'action (VA), la prévention collective est aussi un moyen de pouvoir répondre aux inquiétudes des personnes à risques particuliers et, notamment, des porteurs d'implant.
L'étude présentée dans l'article « Oseray, un outil simple pour une première estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques » (page 94) a montré que sur les sept familles d'équipements industriels repérés comme particulièrement émettants dans le domaine des champs électromagnétiques par les spécialistes des Carsat-Cramif-INRS, six étaient susceptibles d'exposer les opérateurs à des valeurs supérieures aux VA définies par la directive européenne 2013/35/UE. Une étude plus approfondie a permis d'affiner les résultats qui permettront prochainement de mettre à disposition sur www.inrs.fr un outil d'évaluation simplifiée du risque présenté par l'exposition aux rayonnements électromagnétiques (Oseray). ●

Pour en savoir +

- Dossier « Champs électromagnétiques », consultable sur www.inrs.fr
- *Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques. Guide d'évaluation des risques,* INRS, ED 6136.
- Fiches de la collection « Champs électromagnétiques », INRS, ED 4200 et suivantes, notamment la fiche ED 4214 « Les moyens de prévention ».
- Intégrer le risque « rayonnements électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels, INRS, *Hygiène & sécurité du travail,* ND 2350, 2011.
- Réduction du rayonnement électromagnétique des soudeuses haute fréquence de conception ancienne, à l'aide de patin de masse, INRS, *Hygiène & sécurité du travail*, ND 2360, 2012.
- Directive européenne 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de sante relatives à l'exposition des travailleurs aux risques physiques (champs électromagnétiques).

Études de cas

Évaluer les risques liés aux rayonnements optiques émis par les projecteurs de scène
P. 112

Systèmes radiants de séchage par infrarouge
P. 117

Contrôle qualité par rayonnement UVA ou « lumière noire »
P. 120

Évaluation des risques liés aux rayonnements optiques artificiels émis par des fours de fonderie
P. 123

Analyse des pratiques en sécurité laser dans le milieu médical
P. 126

Le contrôle par magnétoscopie
P. 129

Évaluation des différentes procédures de magnétoscopie dans l'hydraulique
P. 133

Exposition aux champs électromagnétiques émis par une presse de soudage à haute fréquence
P. 137

Les systèmes de télécommunication : mesurage des champs électriques et actions de prévention
P. 141

Exposition des porteurs d'implants médicaux actifs aux champs électromagnétiques 50 Hz
P. 146

Exposition du travailleur en environnement IRM
P. 152

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Évaluer les risques liés aux rayonnements optiques émis par les projecteurs de scène

Annick Barlier-Salsi INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Inhérents aux spectacles vivants, les projecteurs de scène émettent des rayonnements potentiellement nocifs pour la santé des personnes exposées. Afin d'aider les professionnels du spectacle à évaluer ces risques, une étude a été réalisée par l'INRS. Elle propose une classification des risques en fonction des situations rencontrées.

Dans tout spectacle vivant ou enregistré, l'éclairage joue un rôle important qui ne se limite pas à rendre la scène visible. La diversité des jeux de lumière utilisés et les puissances lumineuses mises en jeu en font un élément à part entière de la mise en scène. Les effets scéniques sont obtenus en mettant en œuvre une grande diversité de projecteurs équipés de lampes couvrant toute la gamme des températures de couleur et des puissances allant de quelques watts à plusieurs dizaines de milliers de watts. Or, à des niveaux élevés, le rayonnement visible émis peut présenter des risques pour les yeux des personnes exposées (artistes, personnels techniques). De plus, les lampes les plus utilisées à ce jour, comme les lampes tungstène halogène et les lampes aux halogénures métalliques (HMI), émettent également des rayonnements ultraviolet et infrarouge dangereux pour la peau (Cf. article « Les effets des rayonnements UV visibles et infrarouges sur la peau », page 13) et les yeux (Cf. article « Ultraviolets, lumière bleue et photo-toxicité », page 16).

Indispensable, l'évaluation de ces risques est imposée par le décret 2010-750 [1]. Celui-ci ne donne toutefois aucune méthode pour la mettre en place. Autre difficulté: les « plans de lumière », soit l'ensemble des données constituées par le nombre, les types et les puissances des projecteurs, leur implantation ainsi que les séquences d'extinction/allumage, varient d'un spectacle à un autre. C'est pourquoi il est apparu nécessaire de fournir aux professionnels du spectacle des informations relatives aux risques associés aux projecteurs scéniques, indépendantes de leurs conditions d'utilisation, de manière à les aider à évaluer les risques *a priori* d'un plan lumière. La norme NF EN 62471 [2] permet de répondre à cette problématique. Elle s'applique aux sources de rayonnement optique artificiel (ROA)

↓TABLEAU 1

Classification en groupes de risque selon la norme NF EN 62 471.

DOMAINE SPECTRAL	GRANDEUR	GROUPE DE RISQUE (GR)			
		0	1	2	3
200 – 400 nm	Es	$t_{max} \geq 8$ h	10 000 s ≤ t_{max} < 8 h	1 000 s ≤ t_{max} < 10 000 s	t_{max} < 1 000 s
315 – 400 nm	E_{UVA}	$t_{max} \geq 1\,000$ s	300 s ≤ t_{max} < 1 000 s	100 s ≤ t_{max} < 300 s	t_{max} < 100 s
300 – 700 nm	L_b	$t_{max} \geq 10\,000$ s	100 s ≤ t_{max} < 10 000 s	0.25 s ≤ t_{max} < 100 s	t_{max} < 0.25 s
770 – 3 000 nm	E_{IR}	$t_{max} \geq 1\,000$ s	100 s ≤ t_{max} < 1 000 s	10 s ≤ t_{max} < 100 s	t_{max} < 10 s

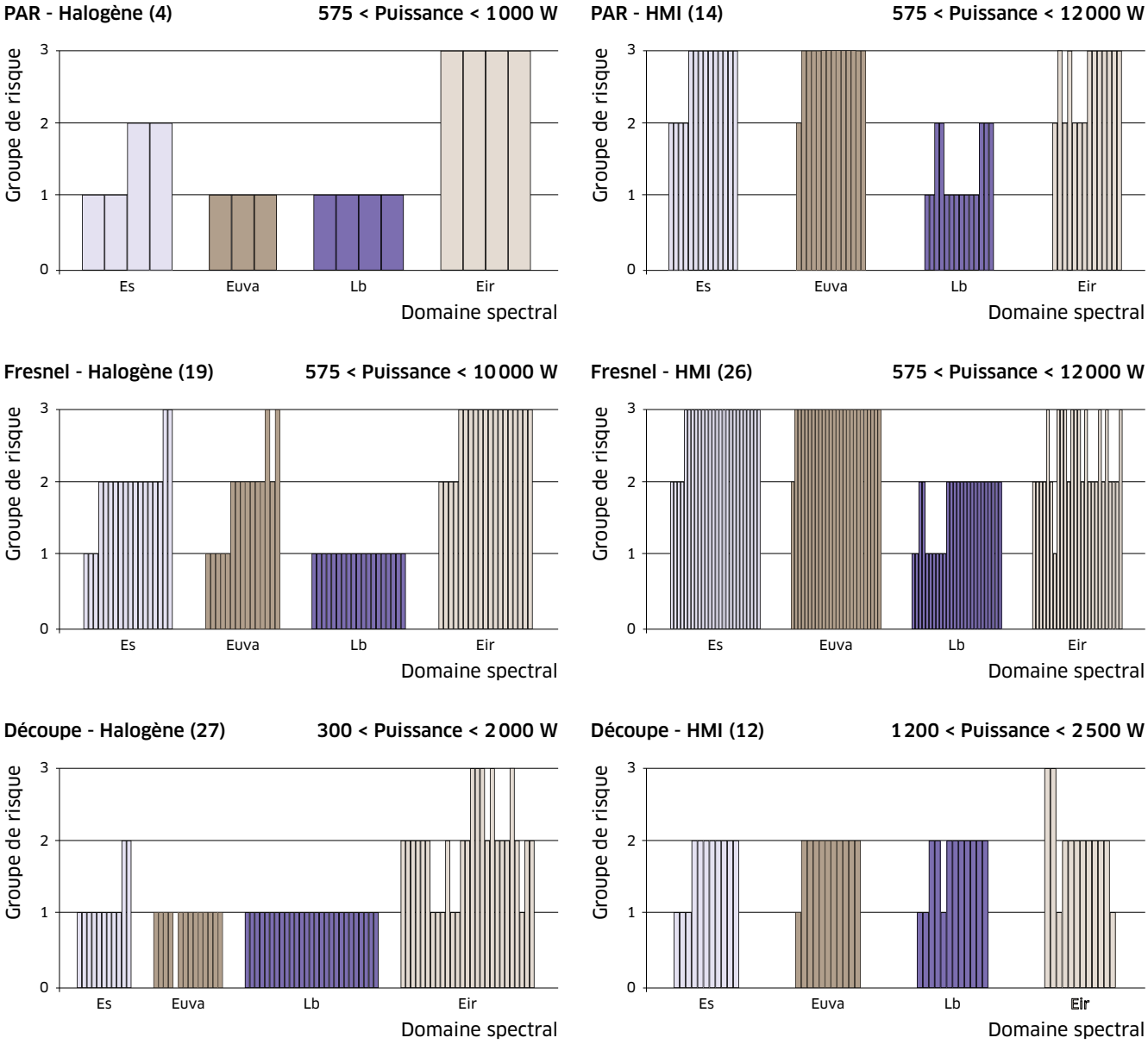


FIGURE 1

Classification en groupes de risque (NF EN 62 471) dans les différents domaines spectraux d'une sélection de projecteurs. PAR, Fresnel et Découpe - équipés de lampes tungstène halogène ou de lampes HMI.

incohérent, alimentées électriquement. Cette norme classe les sources de ROA en quatre groupes de risque, traduisant les niveaux de risques photobiologiques produits dans le domaine de longueurs d'onde comprises entre 200 et 3000 nm. Toutefois, selon le domaine spectral à l'origine des risques, la classe de risque, qui se rapporte à un seul projecteur, peut se révéler insuffisante pour évaluer l'exposition à plusieurs projecteurs. La détermination des distances d'exposition minimales admissibles, selon les VLE fixées par le décret 2010-750, en fonction du nombre de projecteurs de même type, permet alors de compléter l'information fournie par la norme.

Ces deux points constituent les objectifs principaux de l'étude présentée ici. Cette dernière a été menée en collaboration avec les professionnels du spectacle qui, au sein du groupe de travail [1], ont apporté leur expérience et ont été des vecteurs importants pour sensibiliser la profession aux risques présentés par les projecteurs. Ils ont ainsi sélectionné et mis à notre disposition les projecteurs les plus utilisés: projecteurs à réflecteurs paraboliques (PAR), à lentille de Fresnel (Fresnel), de poursuite, etc., de puissances comprises entre 25 W et 12 KW. Pas moins de 95 projecteurs ont été étudiés, pour un certain nombre avec une focalisation mini et une focalisation maxi, soit l'équivalent de 152 projecteurs mesurés. Les projecteurs étaient essentiellement équipés de

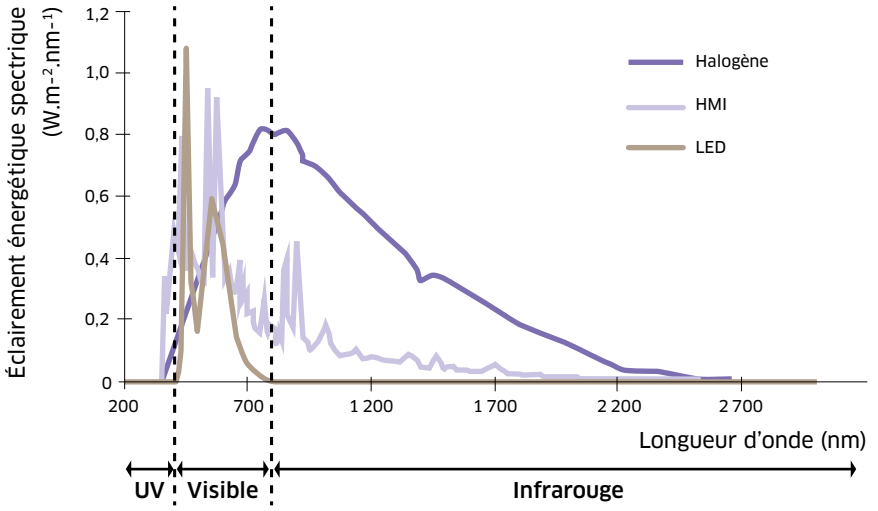


FIGURE 2

Répartition spectrale d'un projecteur Découpe équipé de lampes tungstène halogène, HMI et LED.

lampes tungstène halogène (73) et de lampes aux halogénures métalliques HMI (60), seulement 4 étaient équipés de LED et 15 de lampes diverses.

Les grandeurs énergétiques nécessaires à l'évaluation des risques, selon la norme NF EN 62 471 ou selon le décret 2010-750, ont été déterminées à partir des répartitions spectrales énergétiques en éclairement E_λ et en luminance L_λ. La grandeur E_λ a été mesurée entre 200 et 3000 nm à l'aide d'un spectroradiomètre (Optronic - OL750) à balayage et à double monochromateurs. La grandeur L_λ a été calculée à partir de E_λ et de la luminance lumineuse L_υ mesurée à l'aide d'un vidéophotomètre (Technoteam - LMK 98-2). Comme le prévoit la norme NF EN 62 471, les grandeurs en éclairement énergétique ($E_S{}^2$, E_{UVA}, E_{IR}) ont été déterminées à la distance de 0,2 m et celle en luminance énergétique (L_B) en respectant les angles de vision effectifs relatifs aux différentes durées d'exposition journalière. Les méthodes de mesure et de calcul sont détaillées dans l'article [3].

La classification des sources de rayonnement optique étudiées correspond à celle proposée par la norme NF EN 62 471 (Cf. Tableau 1). Elle repose sur quatre groupes de risque fondés sur la durée d'exposition journalière maximale admissible t_{max} dans chaque domaine spectral. t_{max} est obtenu en comparant les grandeurs E_S, E_{UVA}, E_{IR} et L_B aux VLE fixées par ladite norme. Le groupe de risque retenu pour classer la source est le groupe de risque maximal obtenu pour chacun des domaines spectraux.

PROJECTEURS ÉQUIPÉS DE LAMPES TUNGSTÈNE HALOGÈNE OU HMI

De l'analyse globale des résultats obtenus sur les 152 projecteurs, il ressort qu'aucun projecteur n'est classé sans risque (GR 0) et seulement 9% présentent un risque faible (GR 1). Les 91% restant (GR 2 et GR 3) se répartissent comme suit: 34% sont de risque modéré (GR 2) et 57%, soit plus de la moitié des projecteurs mesurés, présentent un risque élevé (GR 3).

Que peut-on déduire de ces résultats? La figure 1 relative à une sélection de 102 projecteurs de trois types – PAR, Fresnel et Découpe – équipés de lampes tungstène halogène ou de lampes HMI, fait apparaître que l'infrarouge est le domaine spectral qui détermine la classe de risque d'un projecteur si celui-ci est équipé d'une lampe halogène, alors que l'ultraviolet est majoritairement déterminant s'il est équipé d'une lampe HMI. Cette classification s'explique aisément en observant la répartition spectrale de ces deux types de lampes sur la figure 2, avec une forte proportion de l'émission dans le domaine infrarouge pour les lampes halogènes et une émission importante dans le domaine spectral ultraviolet pour les lampes HMI. On note également que le risque dû à la lumière bleue L_b, relatif à l'émission

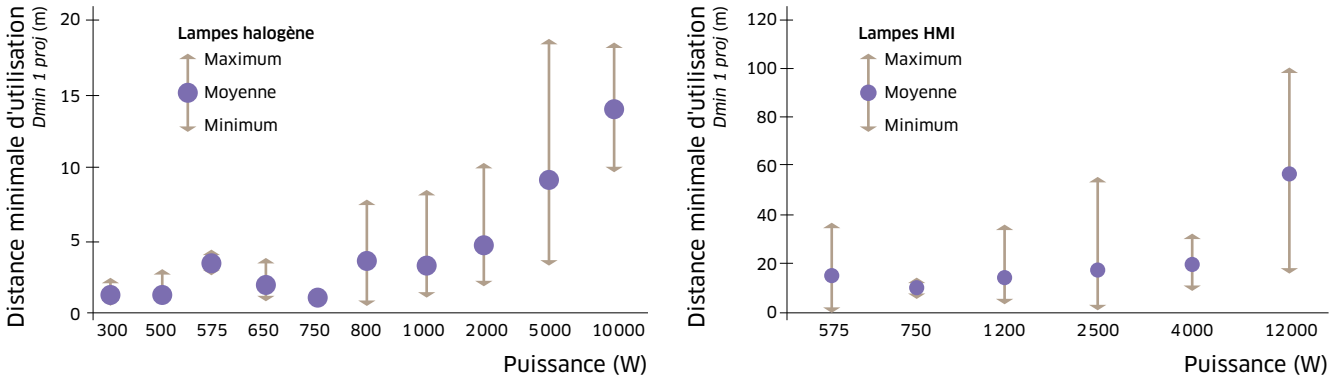
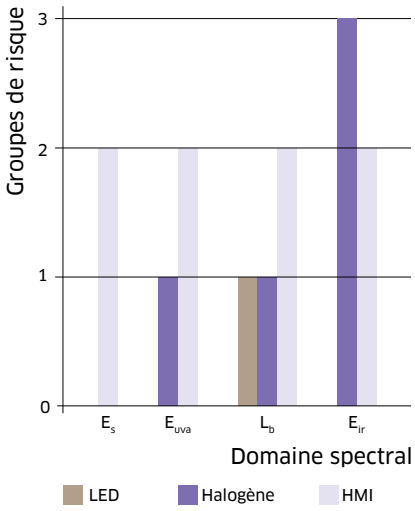


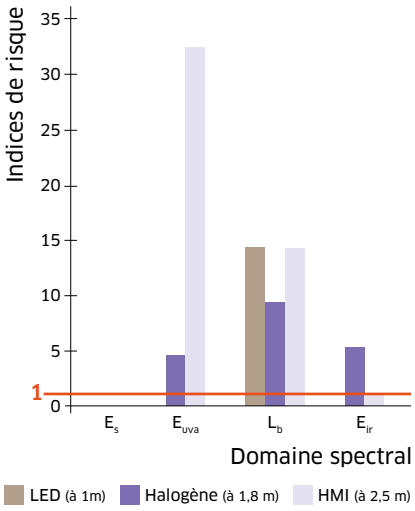
FIGURE 3

Distance minimale d'utilisation $D_{min\ 1proj}$ des projecteurs équipés de lampes halogène ou HMI en fonction de leur puissance et pour une durée d'exposition journalière de 8 heures.



↑FIGURE 4

Classification dans les différents domaines spectraux selon la norme NF EN 62 471 d'un projecteur type Découpe équipés de différentes lampes.



↑FIGURE 5

Indices de risque.calculés sur la base des VLE du décret 2010-750, à une distance qui produit le même éclairement lumineux (33000 lux) pour les 3 types de lampe équipant un projecteur de type découpe et pour une durée d'exposition journalière de 8 heures.

dans le domaine visible du spectre, est toujours classé GR 1 pour les lampes halogène et varie entre GR 1 et GR 2 pour les lampes HMI. Alors qu'en éclairage scénique l'effet recherché est la production de rayonnement visible, paradoxalement, ce domaine spectral n'est pas celui qui détermine la classe de risque pour les projecteurs équipés de lampes halogène ou HMI. Les risques proviennent essentiellement des rayonnements parasites émis tels que l'ultraviolet et l'infrarouge.

Dans les domaines spectraux ultraviolet et infrarouge, l'évaluation des risques est fondée sur la valeur de l'éclairement énergétique, pondéré ou non selon les domaines, produit par un projecteur. Or, lors de l'utilisation de N projecteurs, l'éclairement global reçu par la personne exposée est égal à la somme des éclairements produits par chacun des N projecteurs. De ce fait, la connaissance du groupe de risque est une donnée utile pour choisir un projecteur mais non suffisante pour évaluer les risques résultant de l'exposition à plusieurs projecteurs. En revanche, la connaissance de la distance minimale d'exposition admissible peut se révéler une donnée intéressante pour l'utilisateur afin de l'informer des conditions d'utilisation d'un projecteur ou de plusieurs projecteurs de caractéristiques identiques. En négligeant la taille de la source (de rayon R) par rapport à la distance d'exposition, l'éclairement énergétique E produit par un projecteur à la distance $D_{min\ 1proj}$ est déterminé de telle sorte que :

$$E \approx L_p . \frac{\pi R^2}{D^2_{min\ 1proj}} = VLE$$

avec :

- L_p : luminance énergétique du projecteur,
- VLE : valeur limite d'exposition fixée par le décret 2010-750 [1].

Sachant que $D_{min\ 1proj}$ représente la distance minimale d'exposition admissible, soit la distance minimale d'utilisation d'un projecteur, on cherche alors à déterminer la distance minimale d'utilisation $D_{min\ Nproj}$ de N projecteurs de caractéristiques identiques de telle sorte que :

$$E \approx N.L_p . \frac{\pi R^2}{D^2_{min\ Nproj}} = VLE$$

$D_{min\ Nproj}$ peut alors être représenté comme suit :

$$D_{min\ Nproj} \approx \sqrt{N}.D_{min\ 1proj}$$

Il est à noter que les distances minimales d'utilisation déterminées ci-après ne prennent en compte que les risques liés à l'ultraviolet et à l'infrarouge basés sur les valeurs d'éclairement énergétique. Elles ne tiennent pas compte du risque lumière bleue évalué à partir de la luminance énergétique.

$D_{min\ 1proj}$ a été déterminée pour tous les projecteurs équipés de lampes halogène ou HMI. Ces distances sont représentées en fonction de la puissance des projecteurs, sur la figure 3. En prenant en compte les valeurs minimales et maximales enregistrées, $D_{min\ 1proj}$ varie de 0,8 m à 18,5 m, dans le cas des lampes halogène, et de 2,3 m à 100 m pour les lampes HMI. Par conséquent, l'utilisation, par exemple, de 25 projecteurs de caractéristiques identiques conduit à appliquer un facteur 5 à ces distances d'utilisation, soit des valeurs maximales de 92 m pour les lampes halogène et 500 m pour les lampes HMI. Au-delà de l'information portée à l'utilisateur sur les conditions d'utilisation d'un ou plusieurs projecteurs, les résultats montrent que les distances minimales d'utilisation de certains projecteurs, notamment de fortes puissances, sont telles qu'elles ne peuvent être respectées et que ces projecteurs ne sont donc pas utilisables en l'état sans risque.

PROJECTEURS ÉQUIPÉS DE LAMPES À LED

Les projecteurs à LED étudiés, certes peu nombreux (quatre), sont tous classés dans le groupe de risque 1. Le seul domaine spectral en cause est le domaine visible, ce qui s'explique aisément puisque les LED émettent des rayonnements uniquement sur ce domaine spectral (Cf. Figure 2). Parmi les projecteurs à LED mesurés, l'un d'eux dispose des mêmes caractéristiques optiques et fonctionnelles qu'un appareil traditionnel, le pavé à LED se substituant simplement à une lampe halogène ou HMI. Les résultats, en termes de classe de risque, de ce projecteur de type Découpe, équipé d'un bloc à LED de 85 W peuvent être comparés à des projecteurs de même type dont l'un est équipé d'une lampe halogène de 1000 W et l'autre d'une lampe HMI de 1200 W. Les résultats

de leur classifications selon la norme NF EN 62 471 présentés à la figure 4 confirment que le projecteur équipé de LED présente un risque faible (GR 1) dû uniquement à la lumière bleue. Avec une lampe halogène, le même type de projecteur est également classé en risque faible pour la lumière bleue mais appartient au groupe de risque 3 pour le domaine infrarouge. Dans le cas d'une lampe HMI, le groupe de risque est 2 dans les quatre domaines spectraux.

Compte tenu de la disparité des puissances entre ces lampes (85, 1000 et 1200 W), et même si les LED ont une efficacité lumineuse plus élevée que les deux autres types de lampes, il est pertinent d'évaluer les risques qu'elles présentent, sur la base des VLE du décret 2010-750 [1], à une distance d'exposition qui produit un même éclairement lumineux, en l'occurrence 33000 lux. Dans ces conditions, en limitant l'analyse au domaine visible, la figure 5 montre que l'indice de risque (rapport de la grandeurs concernée par la VLE) correspondant à Lb est de l'ordre de 15, que le projecteur soit équipé de LED ou d'une lampe HMI, et de 9,5 avec une lampe halogène. Par conséquent, en supposant que les rayonnements ultraviolets et infrarouges émis par les lampes HMI et halogène puissent être éliminés, il demeure que les lampes HMI présentent, comme les LED, un risque dû à la lumière bleue.

On remarque que sur la figure 5, les indices de risque Lb avec la lampe HMI et les LED sont identiques. Pour ce même risque, sur la figure 4, la lampe HMI est de groupe de risque 2 et la LED classée en GR1. Cette différence provient de la prise en compte de l'angle de vision effectif de 110 mrd [2,4] pour déterminer la luminance énergétique. En effet, à une distance de 1 m, la surface effective à prendre en compte pour déterminer la luminance du projecteur à LED est inférieure à sa surface réelle, d'où un niveau de luminance inchangé égal à la luminance propre du projecteur. En revanche, à la distance de 2,5 m, la surface effective du projecteur à lampe HMI est plus grande que la surface réelle du projecteur. La luminance étant moyennée sur cette surface effective, elle a une valeur inférieure à la luminance propre du projecteur.

À ce jour, les lampes halogène et HMI sont les plus couramment utilisées dans les projecteurs de scène. Cette étude a montré qu'elles émettent des rayonnements ultraviolets et infrarouges qui présentent des risques pour la santé des personnes exposées.

La classification définie par la norme NF EN 62 471 est un indicateur de choix d'un projecteur pour l'utilisateur qui doit être complétée par une distance minimale d'utilisation [5]. Cependant, compte tenu du cumul des niveaux d'éclairement, cette classification ne garantit pas l'absence de risque lorsque plusieurs projecteurs appartenant au groupe de risque 0 sont utilisés simultanément. En revanche, l'émission des projecteurs équipés de LED est limitée au domaine visible du spectre. Dans ce domaine, les risques étant évalués à partir de la luminance énergétique, la classification est un indicateur pertinent dans la mesure où le nombre de projecteurs en service n'intervient pas dans l'évaluation des risques.

Pour le cas des lampes halogène et HMI, des lampes double enveloppe traitées anti-UV permettent de réduire, sans le supprimer totalement, le rayonnement ultraviolet émis. En revanche, il est difficile de filtrer le rayonnement infrarouge sans modifier la couleur de la lumière émise. C'est pourquoi les projecteurs à LED apparaissent, à ce jour, comme le meilleur compromis pour réduire les risques à la source, en ne négligeant pas toutefois les risques dus à la lumière bleue qu'ils sont susceptibles de présenter [6,7].

Du point de vue de la protection individuelle, l'utilisation de crème de protection solaire est recommandée pour protéger la peau contre les rayonnements ultraviolets. Au niveau de la protection oculaire, le port de lunettes de protection adaptées, pour les artistes pendant les répétitions et durant les phases de réglage pour le personnel technique, permettrait de limiter les niveaux d'exposition aux rayonnements nocifs. ●

1. Composition du groupe de travail : les sociétés ADB Lighting Technologies, Magnum et Robert Juliat, l'Opéra National de Paris, France Télévision, l'Association des Producteurs de cinéma et le Comité central d'hygiène et de sécurité de la production Cinématographique, les Carsat, la médecine du travail, le ministère de la Culture et l'INRS.

2. Grandeur nommée E_s dans la norme NF EN 62 471 et E_{eff} dans le décret 2010-750.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. J.O. 4 Juillet, Texte 11.

[2] NF EN 62471. Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. Afnor 2008,46 p.

[3] Salsi S., Barlier-Salsi A. Exposition aux dispositifs d'éclairage scénique : risque pour la santé des professionnels du spectacle vivant ou enregistré. *Radioprotection* 2013,48, pp. 391–410.

[4] ICNIRP. *ICNIRP guidelines on limits exposure to incoherent visible and infrared radiation. Health Phys.* 2013, 105, pp. 74–91.

[5] IEC. IEC/TR 62471-2. *Photobiological Safety of Lamps and Lamps System- Part 2: Guidance on Manufacturing Requirements relating to Non-Laser Optical Radiation Safety*, 2009.

[6] ANSES. Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED). Anses, 2010.

[7] Jaadane I., Boulenguez P., Chahory S., Carré S., Savoldelli M., Jonet L. *et al.* Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs). *Free Radic. Biol. Med., 2015,* pp. 84:373-84.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Systèmes radiants de séchage par infrarouge

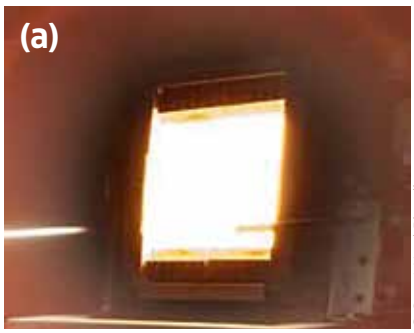
Thierry Becker Contrôleur de sécurité, Carsat Nord-Picardie

Utilisés dans l'industrie du papier, les systèmes radiants de séchage utilisant le rayonnement infrarouge peuvent être nocifs pour la peau et les yeux. Une évaluation des risques auxquels sont exposés, d'une part, les salariés qui fabriquent ces systèmes et, d'autre part, les salariés utilisateurs a été menée par la Carsat Nord-Picardie dans deux entreprises, l'une fabriquant les systèmes radiants, l'autre les utilisant.

Les systèmes radiants à gaz et électriques de séchage par infrarouge (IR) destinés à l'industrie du papier émettent des rayonnements optiques potentiellement nocifs pour la peau et les yeux. Pour les salariés qui utilisent ces systèmes, les mesures montrent l'absence de risque. En revanche, pour les salariés qui fabriquent ces systèmes (phases de contrôle particulièrement), les mesures indiquent un dépassement des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) dans l'IR. De plus, les systèmes radiants électriques présentent aussi des risques dans l'ultraviolet (UV).

SOURCES DE RAYONNEMENT ET ANALYSE DES PHASES D'EXPOSITION

Les systèmes radiants de séchage par infrarouge destinés à l'industrie du papier émettent des rayonnements optiques, *a priori* dans les domaines spectraux visible et infrarouge. Il existe des modèles de systèmes radiants modulables à gaz et des systèmes radiants compacts électriques (Cf. Figure 1). Les surfaces rayonnantes sont orientées vers le papier



© Carsat Nord-Picardie

↑FIGURE 1
Système radiant compact électrique (a) et modulaire à gaz (b).

© Carsat Nord-Picardie

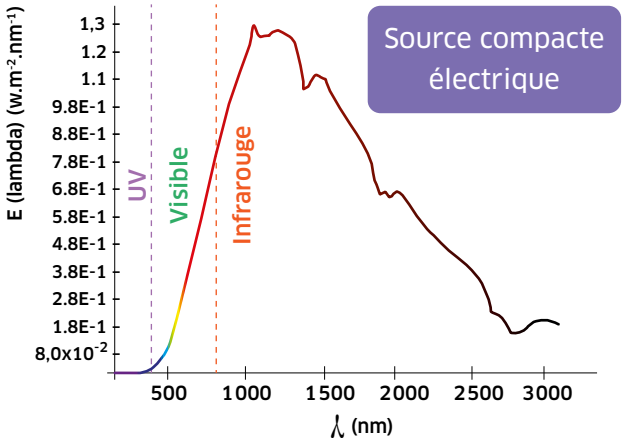
↑FIGURE 2
Séchage de la colle des enveloppes par dispositif radiant électrique.

↑FIGURE 3
Mesurage d'une source chez le fabricant (a) et dans l'entreprise utilisatrice (b) à l'aide du spectroradiomètre OPTRONIC OL750.

et ne sont donc pas visibles des salariés durant la phase d'utilisation. Cependant, les salariés qui fabriquent ces systèmes y sont exposés lors des phases de contrôle et les salariés utilisateurs, sur lignes de production, sont exposés aux rayonnements par réflexion sur le papier (Cf. Figure 2). Deux entreprises, l'une fabriquant des systèmes radiants, l'autre les utilisant pour fabriquer des enveloppes ont fait l'objet d'une évaluation des niveaux d'exposition des salariés. Il est à noter que le système radiant électrique implanté dans l'entreprise utilisatrice a des caractéristiques (taille, nombre de tubes, puissance électrique…) très différentes de celui mesuré chez le fabricant.

MÉTROLOGIE ET MÉTHODE D'ÉVALUATION DES RISQUES

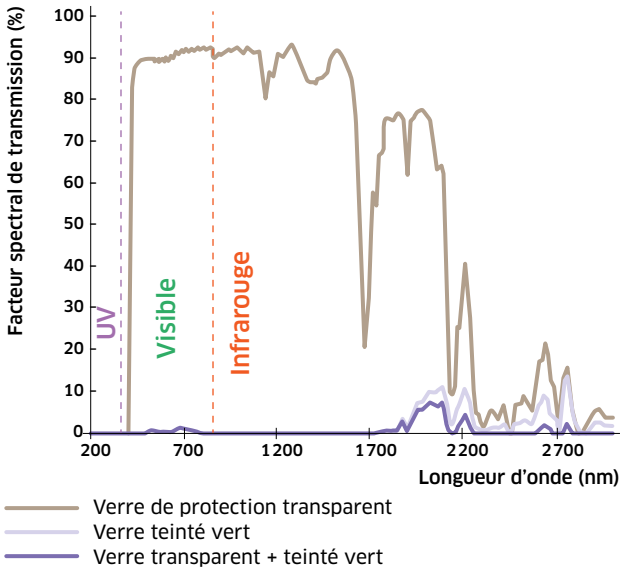
Les mesures ont été réalisées *in situ* par l'INRS : l'éclairement énergétique spectrique (200-3000 nm) a été mesuré à l'aide d'un spectroradiomètre Optronic OL-750 (Cf. Figure 3) et la luminance énergétique spectrique (380-780 nm) au moyen d'un spectroradiomètre Minolta modèle CS1000. L'évaluation du risque, quant à elle, a été réalisée à l'aide du logiciel CatRayon [1,2] sur la base de la



←FIGURE 4
Répartition spectrale du rayonnement émis par la source compacte électrique.

↓TABLEAU 1
Évaluation des risques par CatRayon pour un poste de travail situé à 2 m dans l'axe (90°) des sources.

SYSTÈME	CONFIGURATION	EFFET ASSOCIÉ	DOMAINE SPECTRAL	INDICE DE RISQUE
Système modulaire à gaz	4 modules	Cataracte	IR AB	5
	6 modules	Cataracte	IR AB	5
	Etendue : 2 X 49 modules	Cataracte	IR AB	44,6
		Brûlure de la peau	Visible + IR AB	1,3
Système compact électrique	/	Lésion rétinienne	Visible	2,9
	/	Cataracte	IR AB	33,9
	/	Cataracte	UV A	3,5
	/	Erythème (peau)	UV ABC	16,9
	/	Kératoconjonctivite (yeux)	UV ABC	16,9



←FIGURE 5
Facteur de transmission des différents oculaires équipant les lunettes de protection fournies par l'entreprise.

SYSTÈME	CONFIGURATION	EFFET ASSOCIÉ	DOMAINE SPECTRAL	INDICE DE RISQUE
Système modulaire à gaz + lunettes de protection	4 modules	Cataracte	IR AB	<1
	6 modules	Cataracte	IR AB	<1
	Etendue: 2X 49 modules	Cataracte	IR AB	<1
		Brûlure de la peau	Visible + IR AB	<1
Système compact électrique+ lunettes de protection	/	Lésion rétinienne	Visible	<1
	/	Cataracte	IR AB	<1
	/	Cataracte	UV A	<1
	/	Erythème (peau)	UV ABC	<1
	/	Kératoconjonctivite (yeux)	UV ABC	<1

↑TABLEAU 2
Indices de risques calculés en tenant compte du port des lunettes de protection, à 2 m dans l'axe des sources.

caractérisation des sources et des VLEP figurant dans le décret 2010-750 [3]. Les résultats sont exprimés sous la forme d'indices de risque: rapport de la grandeur énergétique calculée dans un domaine spectral sur la VLEP correspondante. Ainsi, un indice de risque supérieur à 1 indique qu'il existe un risque dans ce domaine spectral.

RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

Un exemple de répartition spectrale du rayonnement émis par la source compacte électrique est présenté dans la figure 4.

En ce qui concerne l'évaluation des risques:

- pour les salariés utilisateurs, sur les lignes de fabrication comportant des systèmes radiants de séchage, les mesures montrent que les rayonnements optiques visibles et infrarouges par réflexion sur le papier blanc ne présentent pas de risque (dans les conditions de mesure et de puissances mises en œuvre lors des mesures);
- pour les salariés qui fabriquent ces systèmes, en revanche, les résultats des mesures (Cf. Tableau 1) indiquent que le risque de cataracte par exposition aux infrarouges est avéré, ainsi que celui de brûlure de la peau (VLEP dépassée après 16 min d'exposition). Les mesures révèlent également, pour les systèmes radiants électriques, un risque dans le domaine visible et ainsi que dans l'ultraviolet.

MESURES DE PRÉVENTION

Le facteur spectral de transmission des lunettes de protection utilisées dans l'entreprise (Cf. Figure 5) a été mesuré. Ces lunettes sont équipées d'un oculaire teinté vert et d'un oculaire transparent. Ensuite, les indices de risque ont été recalculés à l'aide du logiciel CatRayon en tenant compte du port de ces protections.
Les mesures de protection individuelle par lunettes filtrantes se révèlent efficaces dans tous les domaines spectraux (Cf. Tableau 2) pour protéger les yeux. Cependant, il persiste un risque d'érythème de la peau non protégée par les lunettes et exposée aux UV ainsi que de brûlure due aux rayonnements visible et IR AB. La mise en place d'écrans adaptés devant les sources ou le port d'écrans faciaux anti-UV permettraient de protéger l'intégralité du visage. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS. CatRayon 4, logiciel d'évaluation de l'exposition aux rayonnements optiques dans les locaux de travail, téléchargeable sur www.inrs.fr, 2012.

[2] BARLIER-SALSI A., SALSI S. CatRayon3: Un logiciel pour évaluer l'exposition au rayonnement optique dans les locaux de travail et déterminer les moyens de protection. INRS, NST, 2007, 265:57.

[3] 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:Texte 11.

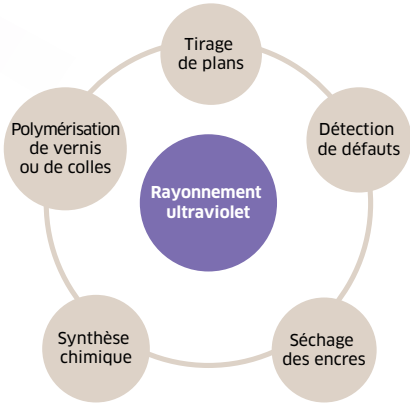
RAYONNEMENTS OPTIQUES

Contrôle qualité par rayonnement UVA ou « lumière noire »

Céline Ruillard Contrôleur de sécurité, Carsat Centre – Val de Loire

Les applications industrielles ou médicales des UV de type A sont nombreuses. Mais ces rayonnements suscitent des interrogations de la part des travailleurs : utilisés régulièrement et de manière répétée, sont-ils dangereux pour la santé ? Une évaluation des risques a été menée par la Carsat Centre – Val de Loire dans un atelier de maroquinerie où des lampes UVA sont utilisées pour réaliser des contrôles qualité.

Selon le type de source, le rayonnement ultraviolet émis est soit considéré comme parasite lorsqu'il ne contribue pas à l'effet recherché (cas de certaines lampes à usage général, d'arcs de soudage…), soit utilisé pour ses effets directs. Par exemple, dans le domaine médical, il est employé pour le traitement de maladies (eczéma, psoriasis, hyperbilirubinie…) et pour la désinfection bactérienne. Les cabines de bronzage en sont un autre exemple d'application. Dans l'industrie, les applications sont également très nombreuses, comme le montre la figure 1.



↑FIGURE 1
Applications industrielles du rayonnement ultraviolet.

Dans la classification des rayonnements optiques, les ultraviolets A se situent entre 315 et 380 nanomètres (Cf. Figure 2).

Dans cette étude, l'application retenue concerne la détection de défauts par rayonnement UVA. Ce choix s'est imposé car les centres de mesures physiques et l'INRS sont régulièrement sollicités par des chefs d'entreprise et des salariés s'inquiétant des risques liés au rayonnement émis par les lampes UVA (dites de « lumière noire ») et des conséquences potentielles sur la santé. Aux postes de travail nécessitant l'usage de lampes UVA, l'inquiétude des opérateurs porte plus spécifiquement sur l'exposition, de manière régulière et répétée, de leurs avant-bras et de leurs mains à ce rayonnement. Ainsi, une évaluation des risques a été menée par la Carsat Centre – Val de Loire dans un atelier de maroquinerie où sont utilisées des lampes UVA pour réaliser des contrôles qualité.

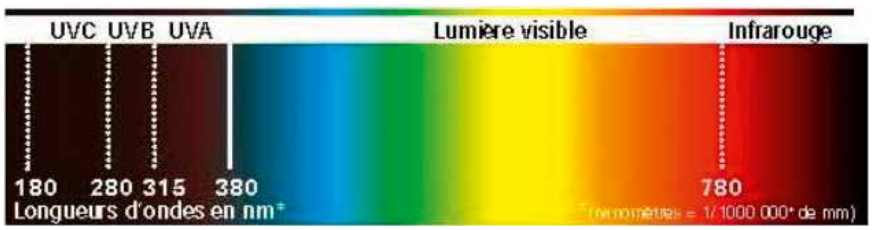


FIGURE 2→
Classification des rayonnements optiques.

Collecter les données sur la source

- Longueur d'onde, nombre
- Répartition spectrale

Observer le poste de travail

- Utilisation, nombre de personnes
- Position de l'opérateur, distance à la source
- Exposition au rayonnement direct, au rayonnement réfléchi

Évaluer la durée d'exposition journalière

FIGURE 3
Données à collecter *in situ*.

FIGURE 4
Tube UVA (lumière noire) de 18 W équipant la cabine.

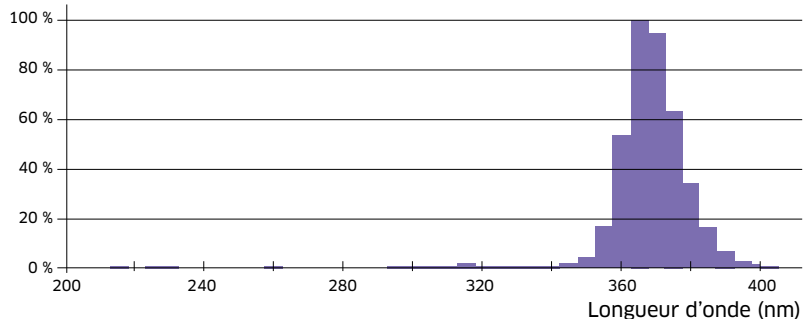


FIGURE 5
Répartition spectrale relative entre 200 et 400 nm du rayonnement émis par un tube équipant la cabine.

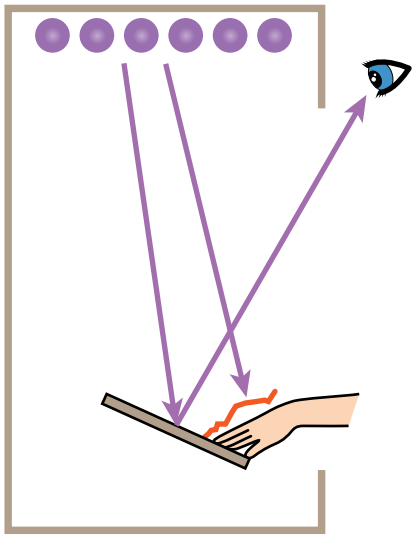


FIGURE 6
Schéma de la cabine de contrôle.

POSTE DE TRAVAIL

Dans l'industrie de la maroquinerie, les opérateurs vérifient l'absence de résidus de colle sur les pièces de fabrication. Ce type d'opération s'effectue dans une cabine équipée d'une ou plusieurs lampes UVA placée(s) en partie haute.
Avant toute évaluation des risques, se rendre sur le site et dans l'atelier concerné de l'entreprise est indispensable pour analyser le poste de travail (Cf. Figure 3). L'objectif est de connaître son environnement de manière à collecter le plus de données possible sur le poste de travail et ses équipements. Ensuite, en collaboration avec les différents intervenants de l'entreprise, une évaluation de la durée d'exposition journalière est effectuée.

Les cabines de contrôle sont équipées de huit lampes UVA Philips TL-D 18 W (Cf. Figure 4) avec une émission maximale aux environs de 365 nm. La répartition spectrale de la lampe est représentée à la figure 5, elle a été déterminée dans les laboratoires de l'INRS.
Quatre cabines de contrôle sont utilisées par une douzaine d'opérateurs. Sur toutes les cabines, un écran disposé sur la partie haute empêche la vision directe des lampes par l'opérateur (Cf. Figure 6). Certaines sont également obstruées par un rideau épais de type velours.
Les lampes sont éloignées de 20 cm à 30 cm de l'œil de l'opérateur et de 40 cm de ses mains et avant-bras. Ainsi, les mains et avant-bras sont exposés au rayonnement direct des lampes, alors que les yeux sont exposés au rayonnement indirect, celui réfléchi par la pièce à observer.
Les durées d'exposition journalières estimées pour chaque poste de travail sont présentées dans le tableau 1. Pour l'évaluation des risques, la durée maximale de 40 min a été prise en compte.

ÉVALUATION DES RISQUES

L'évaluation des risques a été effectuée à l'aide du logiciel CatRayon [1]. Ce logiciel a été développé par l'INRS dans le but de mettre à disposition des utilisateurs un ensemble de données générales et techniques relatives aux sources de rayonnement optique. Son objectif principal est de permettre aux utilisateurs de connaître les risques inhérents à une source de rayonnement après avoir défini les conditions d'utilisation. Il permet d'évaluer l'exposition aux rayonnements optiques artificiels aux postes de travail. Les méthodes de calcul des niveaux d'exposition et les valeurs limites d'exposition (VLE) utilisées sont celles fixées par la directive européenne 2006/25/CE [2] et le décret 2010-750 [3]. La méthode intégrée dans le logiciel permet d'obtenir un indice de risque: rapport de la grandeur énergétique calculée dans un domaine spectral sur la VLE

POSTES EXPOSÉS AUX UVA	ÉVALUATION DU TEMPS D'EXPOSITION PAR L'ENTREPRISE
Contrôle qualité	25 min/jour en temps normal 40 min/jour en intensif
Réalisation	6 min/jour
Collage	30 min/jour

TABLEAU 1
Durées d'exposition journalière.

	DOMAINE SPECTRAL		180-400 nm	315-400 nm
	Effets physiologiques	Peau	Erythème	
		Yeux	Kératite Conjonctivite	Cataracte
Durée d'exposition journalière	Rayonnement mesuré		Indices de risque	
40 min	R_{Direct}		< 0,1	0,9
	$R_{Indirect}$		< 0,1	< 0,1

TABLEAU 2
Indices de risque obtenus avec le logiciel CatRayon.

correspondante. Un indice de risque supérieur à 1 signifie qu'il existe un risque au poste de travail analysé dans le domaine spectral considéré.

RÉSULTATS ET CONCLUSION

Les résultats de l'évaluation des risques sont présentés dans le tableau 2.
Dans les configurations de travail décrites dans cette étude de cas, à tous les postes de travail les indices de risque sont inférieurs à 1. Les postes de travail étudiés ne présentent donc aucun risque pour la peau et les yeux des opérateurs.
Sachant que l'indice de risque UVA (cataracte) dû au rayonnement direct est proche de 1, à la distance de 40 cm des lampes, il est important de s'assurer que le rayonnement direct des lampes n'atteint jamais les yeux des opérateurs (qui se trouvent entre 20 et 30 cm du premier tube) et donc que l'écran disposé en partie haute de la cabine :

- est en place pendant toutes les opérations de contrôle,
- a une hauteur suffisante lorsque les opérateurs sont de petite taille (Cf. Figure 7).

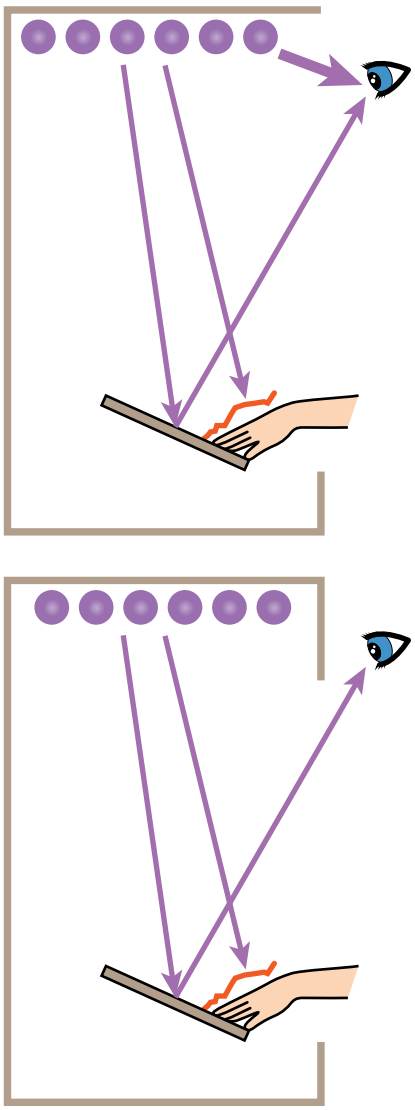


FIGURE 7
Vision directe et vision protégée des lampes lors du contrôle.

BIBLIOGRAPHIE

[1] INRS. CatRayon 4, logiciel d'évaluation de l'exposition aux rayonnements optiques dans les locaux de travail, téléchargeable sur www.inrs.fr, 2012.

[2] Parlement européen. Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). J.O. 2006:38-59.

[3] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. J.O. 4 Juillet 2010:Texte 11.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Évaluation des risques liés aux rayonnements optiques artificiels émis par des fours de fonderie

Éric Lainet Contrôleur de sécurité, Centre de mesures physiques, Cramif

Une étude a été réalisée dans un atelier de forge d'une entreprise du secteur aéronautique. Des mesures *in situ* et en laboratoire ont été menées afin d'évaluer les niveaux d'exposition aux rayonnements optiques artificiels des salariés intervenant à proximité des fours, ainsi que l'efficacité des moyens de protection individuelle mis à leur disposition.

Cette étude a été effectuée à la demande de la Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif). Les pièces métalliques fabriquées dans cet atelier sont chauffées dans des fours à des températures comprises entre 800 et 1 200 °C, avant d'être forgées sous presse ou laminées. À ces températures, le rayonnement thermique émis par ces fours s'accompagne de rayonnement optique (ultraviolet, visible et infrarouge). L'étude a porté sur deux types de fours :

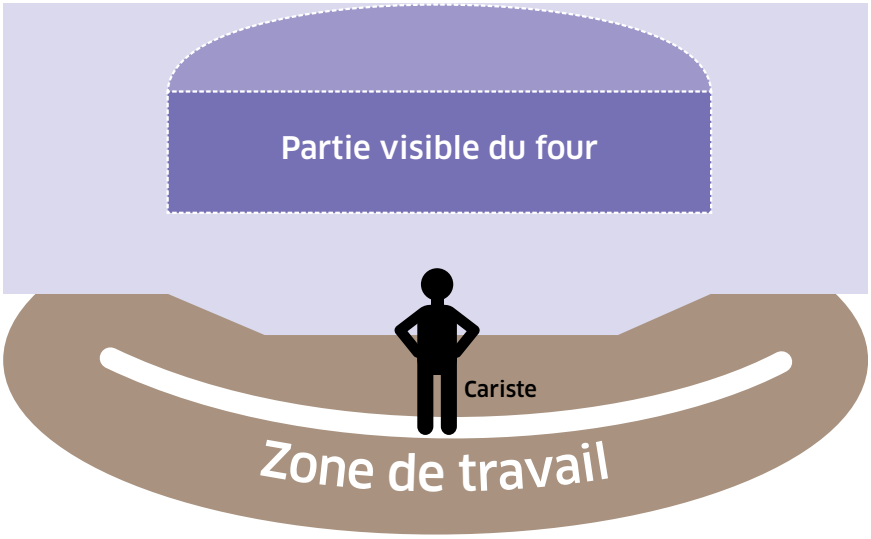
- un four à gaz (repéré 26 G) dont la surface d'ouverture est égale à H x L = 0,7 m x 2,1 m ;
- un four électrique (repéré 7E) dont la surface d'ouverture est égale à H x L = 0,34 m x 0,64 m.

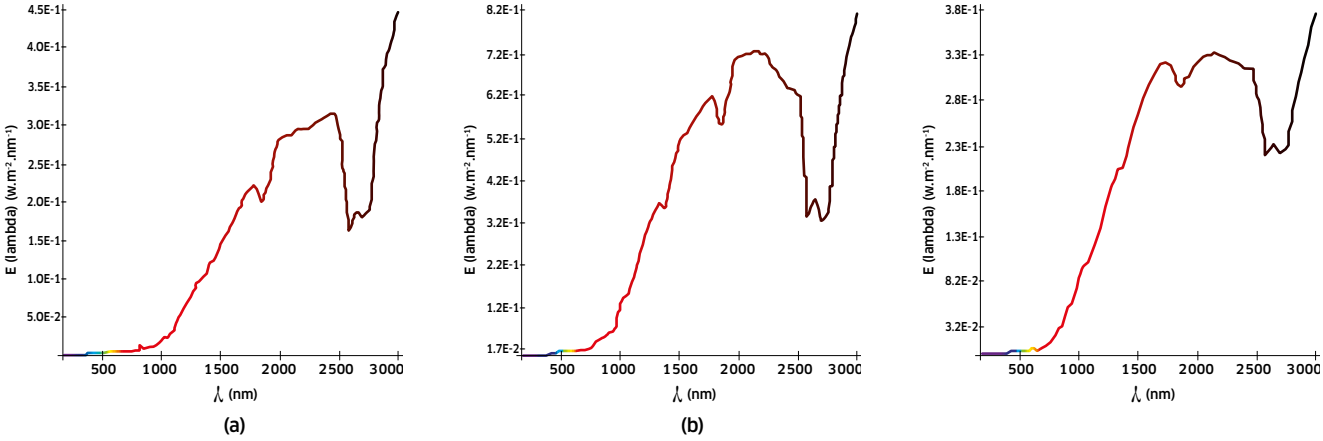
Plusieurs personnes travaillent à proximité des fours dont un cariste situé à environ 4,8 m de leur plan d'ouverture. La durée d'exposition journalière des opérateurs a été évaluée à une heure. Les opérateurs portent une visière de protection faciale pour la plupart des travaux réalisés dans la forge.

APPAREILLAGE ET MÉTHODE D'ÉVALUATION DES RISQUES

L'éclairement énergétique spectrique E_λ a été relevé entre 200 et 3 000 nm au

FIGURE 1
Représentation schématique de la zone d'évolution des salariés devant les fours.





↑FIGURE 2
Éclairement énergétique spectrique relevé à 8 m du four 26G à 940 °C (a) et à 1 180 °C (b).

↑FIGURE 3
Éclairement énergétique spectrique relevé à 3,3 m du four 7E à 1 180 °C.

moyen d'un spectroradiomètre Optronic modèle OL750. La luminance énergétique spectrique L_λ entre 380 et 780 nm a été mesurée à l'aide d'un spectroradiomètre Minolta modèle CS1000. Le facteur de transmission spectral des équipements de protection a été déterminé en laboratoire entre 200 et 3000 nm, à l'aide un spectrophotomètre Perkin Elmer lambda 900.

Les effets des rayonnements optiques sur les yeux et sur la peau sont d'ordre thermique et/ou photochimique. La nature et le siège des lésions provoquées sont essentiellement liés à la longueur d'onde de ces rayonnements. La méthode de calcul des niveaux d'exposition figure en annexe de la directive européenne 2006/25/CE du 5 avril 2006 [1], transposée en droit français par le décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 [2]. Selon le domaine spectral considéré, il s'agit de niveaux d'exposition énergétique, d'exposition énergétique efficace, d'éclairement énergétique, d'éclairement ou de luminance énergétique efficace. Les valeurs limites d'exposition (VLE) utilisées sont celles fixées par la réglementation.

Afin de mettre en évidence et de quantifier les risques présentés par les sources, un indice de risque a été défini. Il correspond au rapport de la grandeur énergétique calculée dans un domaine spectral sur la VLE correspondante. Ainsi, un indice de risque supérieur à 1 signifie qu'il existe un risque au poste de travail analysé dans le domaine spectral considéré.

L'évaluation de l'efficacité d'un équipement de protection nécessite d'abord de calculer l'éclairement énergétique spectrique E'_λ reçu par l'opérateur à travers l'équipement de protection, comme suit :

$$E'_\lambda = E_\lambda . T_\lambda$$

avec :

E_λ : éclairement énergétique spectrique au niveau des yeux des opérateurs dû à l'émission directe de la source de rayonnement ;

T_λ : facteur spectral de transmission de l'équipement de protection.

RÉSULTATS ET ÉVALUATION DES RISQUES

Caractéristiques spectrales

Les éclairements énergétiques spectriques E_λ correspondant au rayonnement émis par les fours 26G et 7E, sont représentés dans les figures 2 a et b et 3.

Le facteur spectral de transmission de la visière de protection est représenté dans la figure 4.

Évaluation des risques

Dans un premier temps, les indices

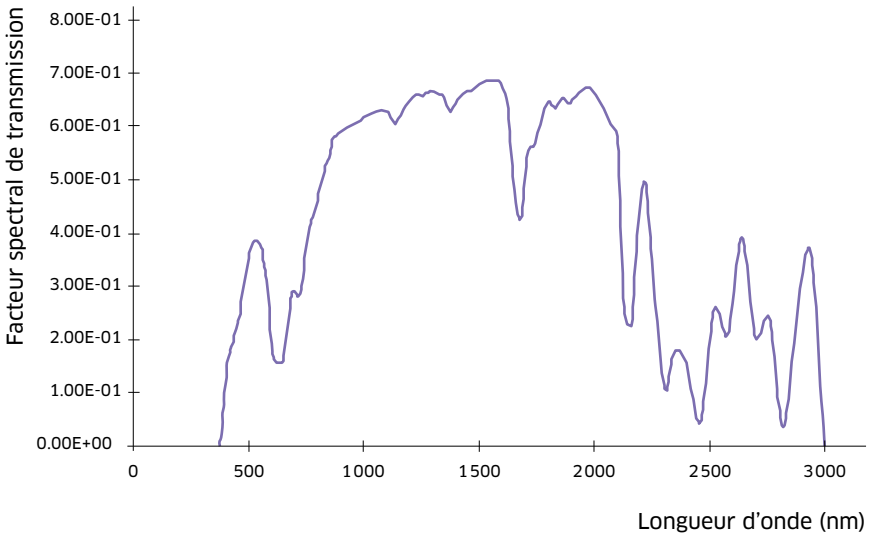
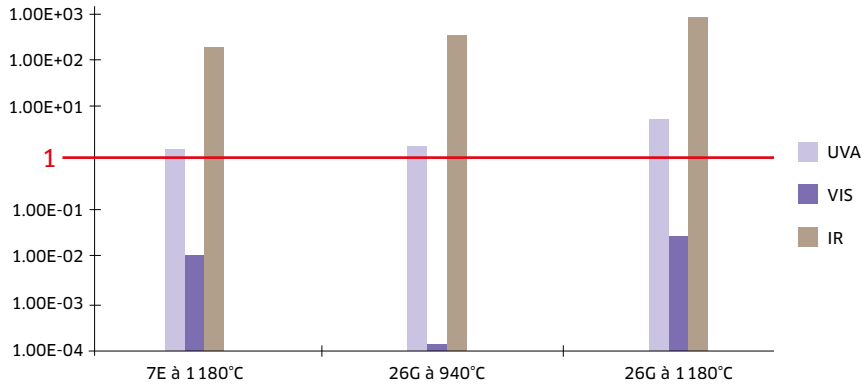
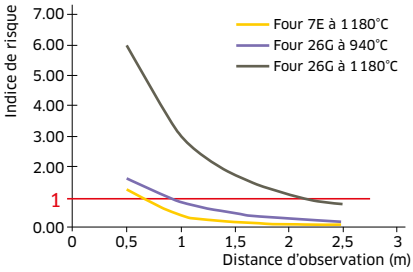


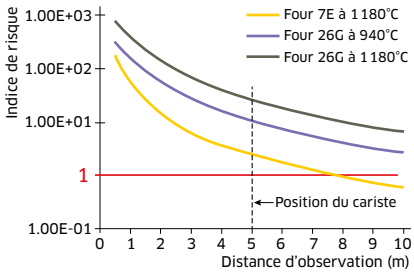
FIGURE 4→
Facteur spectral de transmission de l'équipement de protection individuelle (EPI).



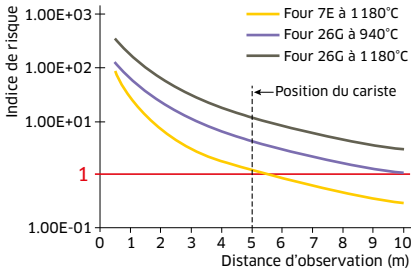
←FIGURE 5
Indices de risque calculés à 0,5 m pour les fours 26G et 7E aux températures de 940° et 1 180°C.



↑FIGURE 6
Indices de risque dans l'ultraviolet A en fonction de la distance d'exposition pour les fours 26G et 7E.



↑FIGURE 7
Indices de risque dans l'infrarouge en fonction de la distance d'exposition pour les fours 26G et 7E.



↑FIGURE 8
Indices de risque dans l'infrarouge en fonction de la distance d'exposition pour les fours 26G et 7E vus à travers l'équipement de protection individuelle (EPI).

de risque ont été déterminés pour une durée d'exposition journalière de 1 heure et une distance d'exposition de 0,5 m. Ces indices de risque, présentés dans la figure 5, font apparaître qu'à 0,5 m, il existe des risques dans l'ultraviolet A et l'infrarouge pour les deux fours étudiés.

Ensuite, les indices de risque dans l'ultraviolet A et dans l'infrarouge ont été calculés toujours pour une durée d'exposition journalière de 1 heure mais en faisant varier la distance d'exposition de 0,5 m à 10 m. Ils sont présentés respectivement dans les figures 6 et 7 pour l'ultraviolet A et l'infrarouge. La position du cariste situé à 4,8 m du four a été repérée dans la figure 7.

La figure 7 montre que, quelles que soient la source et la distance d'exposition, les indices de risque dans l'infrarouge sont tous supérieurs à 1. Il existe donc des risques d'apparition de cataracte à tous les postes de travail. Pour les risques liés au domaine ultraviolet A (Cf. Figure 6), seule l'exposition à une distance inférieure à 2 m pour le four 26G à 1 180°C, et à 0,6 m pour les fours 7E et 26G à 940°C est susceptible de provoquer des dommages au niveau du cristallin.

Efficacité de l'équipement de protection individuelle

L'efficacité de la visière de protection a été évaluée en calculant les indices de risque correspondant à la source vue à travers l'équipement de protection, dans le même environnement de travail que précédemment. Dans le domaine infrarouge, l'équipement de protection individuelle n'est pas efficace devant le four 26G à des distances d'exposition inférieures à 10 m et devant le four 7E pour des distances d'exposition inférieures à 5 m (Cf. Figure 8). En revanche, il protège efficacement les personnes, travaillant à proximité des deux fours 26G et 7E, des risques liés à l'ultraviolet A.

CONCLUSION

Les deux fours étudiés ne présentent aucun danger particulier dans les domaines ultraviolet B et C, et visible du spectre. En revanche, dans l'infrarouge, les niveaux d'exposition sont tous supérieurs aux valeurs limites d'exposition. Le four 26G à 1 180°C et les fours 7E et 26G à 940°C présentent également des risques dans l'ultraviolet A pour des distances d'exposition respectivement inférieures à 2 m et 0,6 m.

L'équipement de protection individuelle utilisé est efficace pour protéger les personnes des risques liés au domaine ultraviolet A mais n'offre pas une protection suffisante contre les risques dus à l'infrarouge. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Parlement européen. Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). Journal Officiel 2006:38-59.

[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: Texte 11.

RAYONNEMENTS OPTIQUES

Analyse des pratiques en sécurité laser dans le milieu médical

Stéphanie Lolliot Centre de formation optique et laser Pyla

Devenu incontournable dans le milieu médical, le laser présente des risques pour la santé et la sécurité du personnel qui sont encore trop mal connus, de même que les mesures de prévention à mettre en œuvre. Afin de mieux comprendre les pratiques en sécurité laser dans ce milieu, une enquête a été réalisée auprès d'environ 80 professionnels de santé. Des efforts restent à faire en termes d'information et de formation.

La sécurité liée à l'utilisation des lasers, véritable enjeu pour les employeurs en termes de santé et sécurité au travail, est devenue incontournable à la suite du décret n° 2010-750 [1] relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. Les médecins et leurs collaborateurs sont ainsi soumis aux obligations d'information et de formation, de prévention et de protection, d'évaluation des risques, de contrôle des valeurs limites d'exposition, etc.

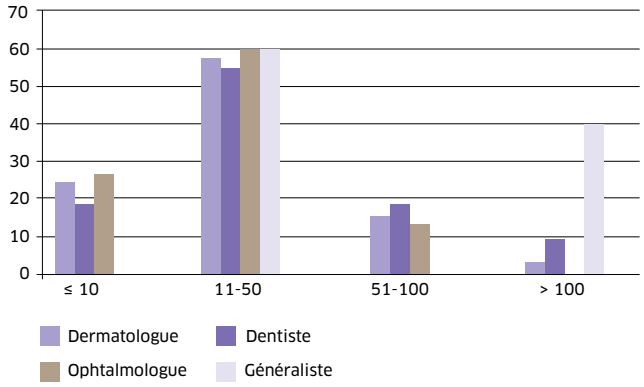
Pour répondre à ces objectifs, et alors que les rayonnements optiques sont de plus en plus utilisés dans le milieu médical, que leurs effets sur la santé sont peu connus et que les méthodes de prévention à mettre en œuvre sont peu diffusées, le Comité national de sécurité optique (CNSO) a été créé en 2013. Il propose un système de labellisation des formations, des formateurs et des contrôleurs d'installations laser.

Afin de mieux appréhender les pratiques en sécurité laser dans le milieu médical, une enquête sur cette thématique a été réalisée. Ainsi, un questionnaire en ligne a été transmis à 600 personnes du milieu médical (14% de réponses). Il abordait différentes thématiques:

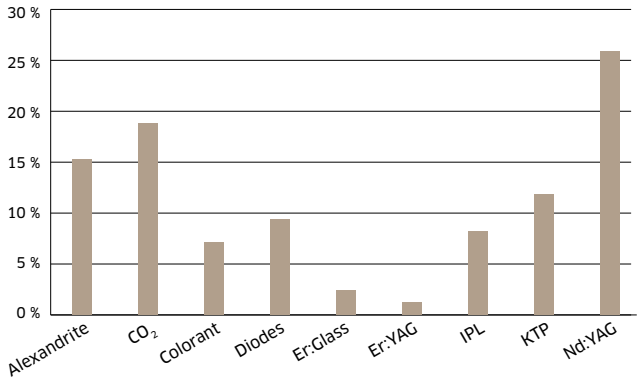
- l'utilisation du laser dans la pratique professionnelle;
- la formation à l'utilisation des lasers et à la sécurité laser;

© Fotolia

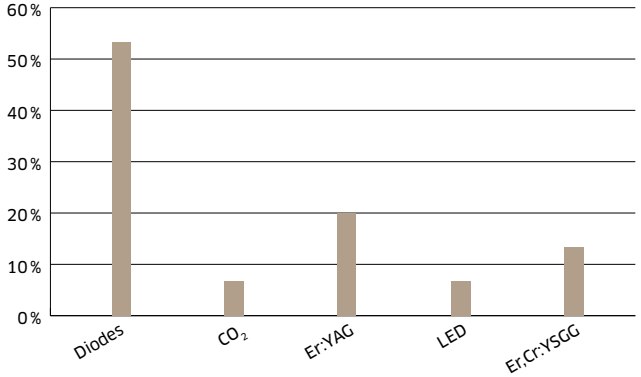
Le laser est notamment utilisé par les dermatologues pour réaliser des épilations. →



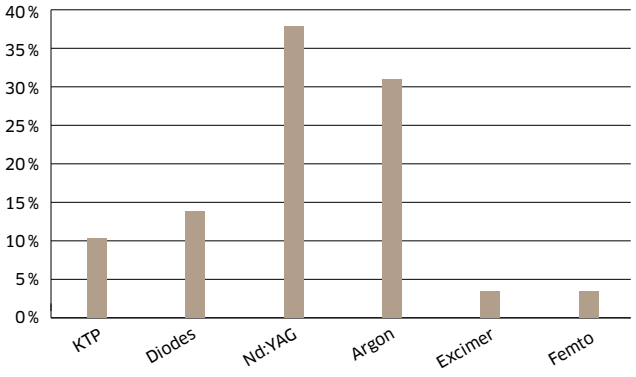
↑FIGURE 1
Nombre d'actes laser mensuel en fonction des spécialités médicales.



↑FIGURE 2
Proportion des différents lasers utilisés par les dermatologues et les angiologues.



↑FIGURE 3
Proportion des différents lasers utilisés par les dentistes.



↑FIGURE 4
Proportion des différents lasers utilisés par les ophtalmologues.

- la connaissance de la réglementation;
- le contrôle de l'équipement laser et l'évaluation des risques.

Les personnes ayant répondu à ce questionnaire sont en majorité des médecins spécialistes: 47% de dermatologues et angiologues, 18% d'ophtalmologues et 16% de chirurgiens-dentistes. Les autres participants étant des médecins généralistes, des chirurgiens, des techniciens biomédicaux et des assistantes.

Les réponses montrent que 86,7% des personnes interrogées sont utilisatrices de lasers et qu'elles réalisent, pour une grande majorité, entre 10 et 50 actes par mois (Cf. Figure 1).

Nous avons pu constater que, dans 70% des cas, la pratique du laser se fait en cabinet médical, les médecins y travaillant seuls ou avec seulement quelques collaborateurs. À l'inverse du milieu hospitalier qui dispose souvent d'une ou plusieurs personnes dédiées à la sécurité, la mise en place de la prévention et de l'organisation de la sécurité en cabinet médical peut s'avérer plus problématique.

Chez les dermatologues et les angiologues utilisant le laser:

- 71% pratiquent l'épilation;
- 71% traitent les lésions vasculaires;
- 25,9% pratiquent le rajeunissement et le relissage de peau;
- 16,1% pratiquent le détatouage;
- 16,1% traitent les cicatrices.

Chez les chirurgiens-dentistes utilisant le laser:

- 90% traitent les tissus mous;
- 90% pratiquent la désinfection;
- 20% font de la biostimulation;
- 20% pratiquent l'hémostase;
- 10% traitent les tissus durs dentaires.

Les ophtalmologues sont:

- 80% à pratiquer la photocoagulation;
- 66,7% à pratiquer la capsulotomie;
- 33,3% à traiter l'iridectomie;
- 26,7% à pratiquer la trabeculoplastie;
- 20% à effectuer de la chirurgie réfractive;
- 13,3% à traiter le décollement de la rétine.

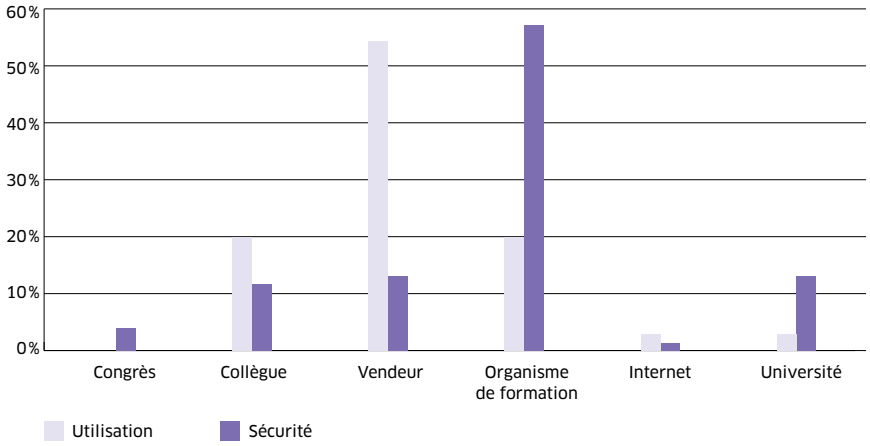
Les médecins généralistes sont:

- 80% à pratiquer l'épilation;
- 40% à traiter les lésions vasculaires;
- 20% à traiter les acanthomes, les nævus bénin et les cicatrices;
- 20% à faire du *resurfacing* et des traitements pigmentaires.

Les chirurgiens ayant participé à l'enquête (maxillo-faxial, orthopédiste et général) utilisent le laser pour l'épilation, le traitement des lésions vasculaires et des tumeurs cutanées.
Les lasers les plus utilisés sont les Nd:YAG à 1064 nm et 532 nm (37,9% chez les ophtalmologues et 25,9% chez les dermatologues et les angiologues), les diodes laser (53,3% chez les dentistes) et le laser Argon (31% chez les ophtalmologues) (Cf. Figures 2, 3 et 4), une partie de ces lasers ayant des longueurs d'onde pouvant causer des dommages sur la rétine. Les rayonnements incohérents apparaissent aussi dans notre enquête: IPL (*Intense Pulse Light* ou lumière intense pulsée) (8,2% par les dermatologues et les angiologues) et LED (6,7% par les chirurgiens-dentistes).
Les lasers utilisés dans le domaine médical sont pour la plupart des lasers de classe 4, donc considérés comme dangereux. En effet, la vision dans le faisceau et l'exposition de la peau sont dangereuses et la vision de réflexions diffuses peut également l'être. Ils peuvent aussi provoquer des incendies. La réglementation impose donc des obligations lors de l'utilisation de ces lasers dont des actions de prévention, d'évaluation des risques, d'information et de formation des travailleurs, la mise en place d'une personne compétente, etc.

© Fotolia

↓ Les lunettes protectrices doivent être utilisées en cas de manipulation d'un laser.



↑FIGURE 5
Les différents acteurs de la formation des médecins à l'utilisation et à la sécurité des lasers.

Or, concernant la formation à la sécurité laser, bien que 73,5% des personnes interrogées répondent être formées, plus de la moitié d'entre elles ont reçu une information qui a duré moins d'une demi-journée (une vingtaine de minutes dans beaucoup de cas). Ce temps est très insuffisant pour être formé à la sécurité liée à l'utilisation de lasers dangereux comme les classes 4. La figure 5 présente les différents modes de formation à l'utilisation et à la sécurité des lasers des médecins.
Parmi les personnes interrogées, 57% estiment avoir une connaissance de la réglementation mais seulement 36% d'entre elles (des 57%) ont une personne compétente (le médecin dans la plupart des cas) pour participer à l'évaluation des risques, à la mise en œuvre des mesures propres à assurer la santé et la sécurité et participer à l'amélioration continue de la prévention des risques (art. R. 4452-21 du Code du travail). Le contrôle de la salle laser afin de s'assurer du respect de la réglementation et des normes en vigueur quant à la sécurité de la zone laser n'est réalisé que dans 25% des cas. La maintenance du laser, quant à elle, est régulièrement effectuée (81%) par le fabricant ou revendeur.
Concernant l'évaluation des risques (décret n°2010-750 du 2 juillet 2010), 54% des personnes interrogées ont connaissance de cette obligation mais seulement 35% l'effectuent au moins annuellement ou chaque fois que nécessaire. Plus de la moitié des praticiens ayant répondu à cette enquête ont une méconnaissance des valeurs limites d'exposition alors que le décret n° 2010-750 stipule que l'employeur a une obligation de contrôle de ces valeurs.
En conclusion de cette enquête, il apparaît que le laser est devenu un outil incontournable du milieu médical et qu'il est urgent de sensibiliser les utilisateurs aux problèmes de sécurité et à leurs obligations. Promouvoir l'information et la formation à la sécurité laser est ainsi devenu un véritable enjeu pour la santé et la sécurité des travailleurs, mais aussi des patients. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels, *J.O. du 4 Juillet 2010,* Texte 11.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Le contrôle par magnétoscopie

Alain Becker Ingénieur-conseil, Centre interrégional de mesures physiques de l'Est – Carsat Nord-Est

De nombreux secteurs industriels utilisent la technique du contrôle par magnétoscopie. Les risques associés sont liés principalement aux champs magnétiques importants produits au moment de la magnétisation de la pièce à contrôler. Dans certains cas, il faut tenir compte également du risque résultant de l'éclairage sous rayonnement ultraviolet. Des mesures de prévention permettent cependant de les maîtriser.

Le contrôle par magnétoscopie est un procédé de contrôle non destructif, permettant de détecter des défauts (discontinuités) en surface (défauts dits « débouchants ») ou sous-jacents (jusqu'à quelques millimètres de profondeur), dans les matériaux ferromagnétiques.

Le panorama des applications industrielles est très étendu. Les exemples ci-dessous n'en donnent qu'un aperçu:

- contrôle des soudures (toute industrie);
- contrôle de la fabrication des pièces de fonderie ou de forge pour les industries:
  - automobile: bielles, vilebrequins, pignons, roulements…;
  - ferroviaire: essieux, bogies, roues, crochets d'attelage…;
  - aéronautique: trains d'atterrissage, roulements…;
  - nucléaire: cuves, viroles…;
  - marine: arbres de transmission…;
- contrôle *in situ* des organes mécaniques lors des opérations de maintenance (toute industrie).

PRINCIPE DU CONTRÔLE PAR MAGNÉTOSCOPIE

Le contrôle par magnétoscopie consiste à produire un flux d'induction magnétique intense dans la pièce à contrôler. La présence d'un défaut provoque une déformation des lignes de champ et l'apparition d'un « champ de fuite ». La visualisation de celui-ci est obtenue par l'application sur la surface contrôlée d'un produit révélateur (poudre ou liquide). Les particules ferromagnétiques (colorées ou fluorescentes) contenues dans le révélateur sont attirées par le champ de fuite et forment une signature caractéristique du défaut, visible soit en lumière blanche, soit sous rayonnement ultraviolet (Cf. Figure 1).

PRINCIPAUX MODES DE MAGNÉTISATION

Magnétisation transversale (ou circulaire)

La magnétisation transversale met en

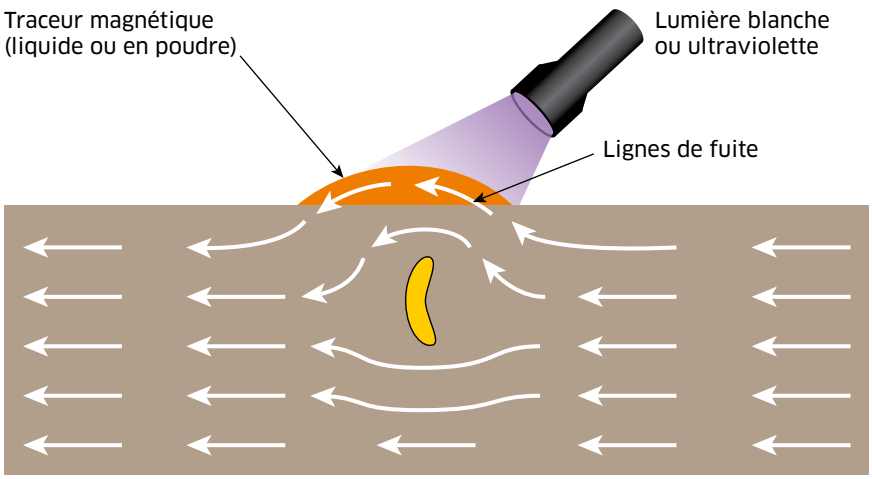
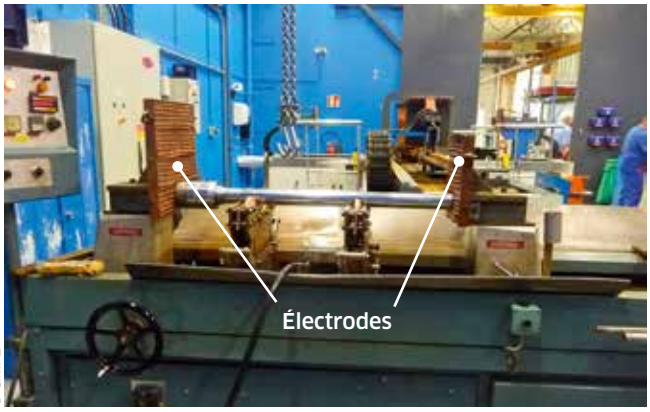


FIGURE 1→
Visualisation du défaut lors du contrôle par magnétoscopie.



© CIMPE

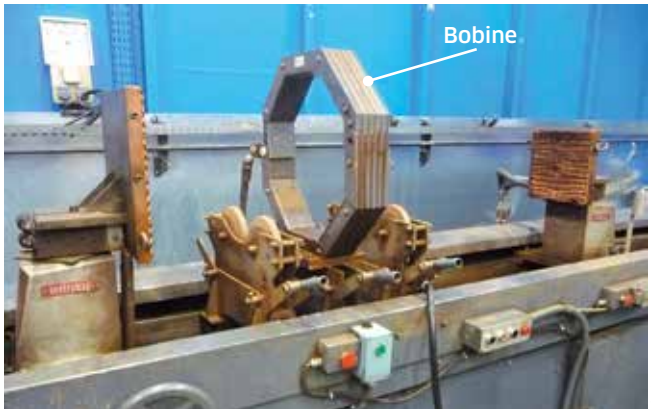
FIGURE 2
Magnétisation transversale sur banc de magnétisation.

© CIMPE

FIGURE 3
Magnétisation transversale avec équipement portatif.

© CIMPE

FIGURE 4
Conducteur auxiliaire pour la magnétisation des pièces creuses.



© CIMPE

FIGURE 5
Magnétisation longitudinale par bobine d'induction.

évidence les discontinuités longitudinales. Elle est obtenue soit par la circulation directe du courant dans la pièce à contrôler, soit par la circulation du courant dans un conducteur auxiliaire. Dans le premier cas, les équipements utilisés sont:

- les équipements fixes: bancs de magnétisation (Cf. Figure 2) particulièrement adaptés pour le contrôle en série;
- les équipements portatifs (Cf. Figure 3) utilisés pour le contrôle des pièces de grandes dimensions, de formes complexes ou pour le contrôle *in situ*.

Concernant le second cas, le conducteur auxiliaire est généralement en cuivre (Cf. Figure 4). Cette technique est particulièrement adaptée pour le contrôle des pièces creuses.

Magnétisation longitudinale (par passage de flux magnétique)

La magnétisation longitudinale met en évidence les discontinuités transversales dans la pièce à contrôler. La méthode est particulièrement adaptée à la détection des défauts sous-jacents. La magnétisation est obtenue par plusieurs moyens:

- avec une bobine d'induction, généralement installée sur le banc de magnétisation, technique adaptée pour le contrôle en série (Cf. Figure 5);
- avec des spires ou un électroaimant portatifs (Cf. Figures 6 et 7) utilisés pour le contrôle des pièces de grandes dimensions, de formes complexes ou pour le contrôle *in situ*.

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES GÉNÉRATEURS

Le courant électrique utilisé dans les équipements de magnétoscopie peut être continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, sa fréquence fondamentale est généralement de 50 Hz. Un circuit électronique permet d'obtenir un courant redressé (une ou deux alternances) ou pulsé. Le courant alternatif sinusoïdal est approprié pour la détection des défauts débouchants tels que les fissures. Le courant continu et les courants redressés permettent la détection des défauts sous-jacents. Dans ce cas, plus la composante continue du courant redressé est importante, plus la détection des défauts profonds est

possible. La puissance électrique des équipements va de quelques kW à plusieurs centaines de kW. Les intensités peuvent dépasser 10000 A.

DÉMAGNÉTISATION

Cette opération est souvent rendue nécessaire après le contrôle pour supprimer l'aimantation rémanente dans la pièce. On fait passer celle-ci dans une bobine d'induction (Cf. Figure 8) pour lui appliquer un champ magnétique alternatif décroissant jusqu'à zéro. La fréquence du champ magnétique est généralement de 50 Hz.

EXPOSITIONS AUX POSTES DE CONTRÔLE PAR MAGNÉTOSCOPIE ET DE DÉMAGNÉTISATION

Les mesurages ont été réalisés par les neuf Centres de mesures physiques (CMP) des Carsat, de la Cramif et l'INRS. Ils ont porté sur plus de 60 postes de contrôle par magnétoscopie et de démagnétisation. Les résultats sont présentés de manière synthétique dans les figures 9 et 10. Les indices d'exposition R correspondent au rapport « valeur mesurée au poste/valeur déclenchant l'action ». Un indice R égal à 1 signifie que la valeur déclenchant l'action (VA) est atteinte.

Pour rappel, VA = 1000 µT pour le corps et 18000 µT pour les mains (Cf. Tableau B2 de la directive européenne 2013/35/UE du 26 juin 2013). Concernant le cas particulier des porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs (DMIA), la valeur de référence est la valeur « public » de 100 µT pour le corps mentionnée dans la recommandation européenne 1999/519/CE. Elle concerne uniquement les implants cardiaques actifs (pacemaker, défibrillateurs).

Aux postes de contrôle par magnétoscopie, on observe un dépassement de la VA dans 23% des cas pour le corps et dans 64% des cas pour les mains. En ce qui concerne les porteurs d'implants cardiaques actifs, la VA pour le corps est dépassée dans près de 70% des cas.

Pour ce qui est des postes de démagnétisation, on observe un dépassement de la VA dans 14% des cas pour le corps et dans 50% des cas pour les mains (situations dans lesquelles l'opérateur tient la pièce en main pour la passer dans la bobine de démagnétisation). Par ailleurs, pour les porteurs d'implants cardiaques actifs, la VA pour le corps est dépassée dans près 60% des cas.

MOYENS DE PRÉVENTION

Champs électromagnétiques

Les principaux moyens de prévention concernent le choix de l'équipement, l'éloignement de la source, l'information et la formation des travailleurs.

En premier lieu, il est recommandé d'utiliser les nouvelles technologies qui sont moins émissives: magnétoscopie à basses fréquences variables, magnétoscopie sans contact par champ tournant ou magnétoscopie sans contact par passage de courant induit.

L'éloignement constitue actuellement la seule mesure de prévention efficace vis-à-vis des champs magnétiques, car il n'existe pas, à ce jour, de moyens techniques économiquement acceptables pour s'en protéger. Au préalable, il convient de réaliser des mesurages afin de déterminer les distances de sécurité appropriées.

L'éloignement peut être obtenu au moyen de différents aménagements selon la situation, par exemple:

- installations fixes (bancs de magnétisation): déporter les commandes;
- inducteurs ou électroaimants portatifs: adapter sur la poignée une rallonge en matériau non ferromagnétique (bois, PVC...);
- câbles d'alimentation des équipements portatifs: les suspendre au moyen d'un dispositif avec équilibreur;
- application du produit révélateur: utiliser une canne d'aspersion plus longue;
- installations avec magnétisation automatisée (par passage de flux): déplacer le poste de contrôle visuel;
- démagnétiseurs: installer un convoyeur mécanique pour le passage des pièces.

© CIMPE

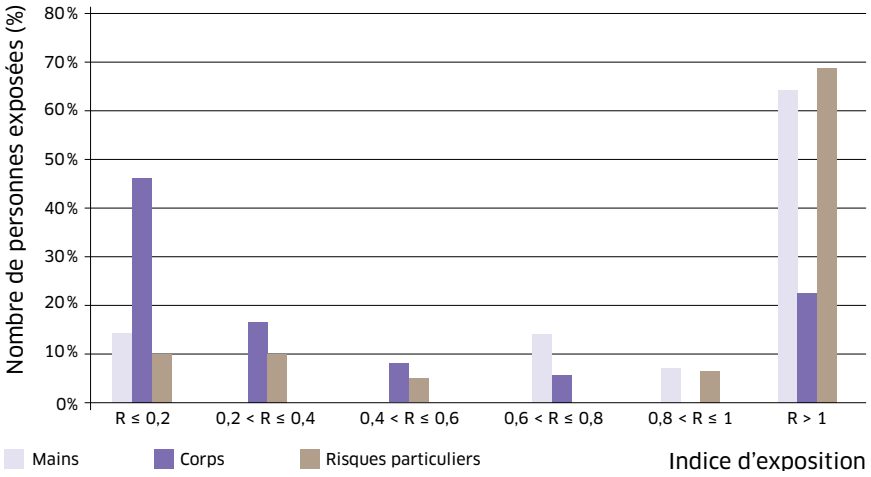
↑FIGURE 6
Magnétisation longitudinale par spires posées sur la pièce à contrôler.

© CIMPE

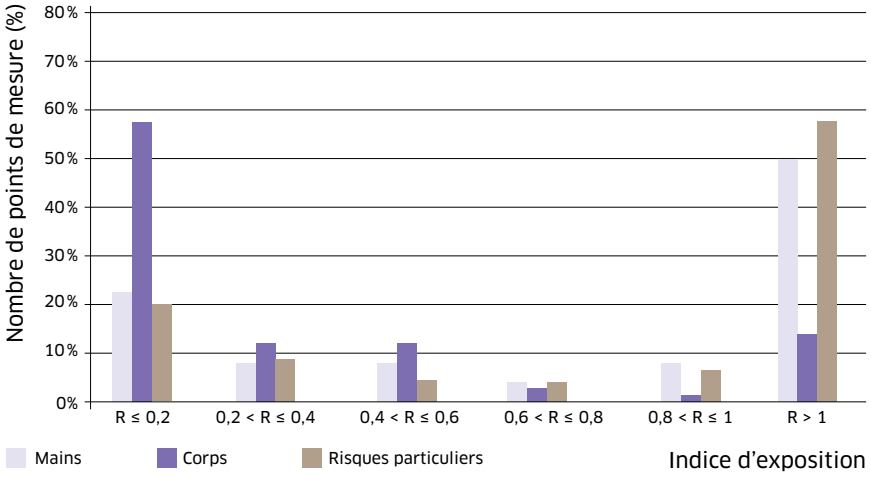
↑FIGURE 7
Magnétisation longitudinale par électroaimant portatif posé sur la pièce à contrôler.

© CIMPE

↑FIGURE 8
Démagnétiseur sur convoyeur.



↑FIGURE 9
Indices d'exposition aux postes de contrôle par magnétoscopie.



↑FIGURE 10
Indices d'exposition aux postes de démagnétisation.

Information des travailleurs

Des recommandations doivent également être données aux travailleurs:

- matérialiser les distances de sécurité: par exemple par un marquage au sol ou avec une chaîne non métallique;
- afficher des pictogrammes: pour informer les salariés de la présence de rayonnements non ionisants ou de champ magnétique statique (Cf. Figure 11) et pour avertir les porteurs de DMIA d'un risque de perturbation de leur implant (Cf. Figure 12).

Enfin, la formation se rapporte à l'évaluation des risques, notamment en ce qui concerne:

- les valeurs et les concepts relatifs aux valeurs limites d'exposition et aux valeurs déclenchant l'action;
- les effets directs et indirects potentiels;
- les résultats de l'évaluation des risques;
- les mesures de prévention mises en œuvre.

Rayonnements ultraviolets

Les lampes utilisées dans les torches portatives ou dans les luminaires fixes pour la visualisation des défauts sous éclairage ultraviolet émettent un rayonnement centré généralement sur la longueur d'onde 365 nm (UVA). Dans la plupart des cas, le rayonnement UV réfléchi par la surface des pièces est diffusé, ce qui entraîne un risque faible pour l'œil. Certaines situations peuvent cependant s'avérer à risque:

↑FIGURE 11
Pictogrammes informant de la présence de RNI et de champs magnétique statique.

←FIGURE 12
Pictogramme informant les porteurs de DMIA.

- pour les yeux: si l'opérateur a la possibilité de vision directe sur les lampes UV ou en cas de réflexions spéculaires sur la pièce à contrôler (réflexions de type « miroir »);
- pour la peau: si la distance à la lampe UV est courte.

Les mesures de prévention dans ces situations restent:

- pour les yeux: les lunettes de protection spécifiques aux rayonnements ultraviolets: marquage 2,2 C ou 3 (norme EN 170);
- pour la peau: le port de vêtements à manches longues et de gants;
- pour éviter la vue directe de l'opérateur sur les lampes UV, l'utilisation d'écrans ou de grilles de défilement sur les torches portatives ou les luminaires. ●

Pour en savoir +

- Directive européenne 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).
- Fiches de la collection « Champs électromagnétiques », INRS, ED 4200 et suivantes.
- Dossier « Champs électromagnétiques » sur www.inrs.fr

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Évaluation des différentes procédures de magnétoscopie dans l'hydraulique

Isabelle Magne EDF, Recherche & développement
Jérôme Delemontez EDF, Division technique générale

La directive européenne 2013/35/UE impose une évaluation de l'exposition au champ électromagnétique au poste de travail. Cet article montre comment cette évaluation, dans le cas du contrôle par magnétoscopie des roues Pelton, a conduit à modifier les procédures de travail et à améliorer le poste de travail dans son ensemble, au-delà de la seule prise en compte de l'exposition au champ magnétique.

Les roues Pelton sont un des types de turbine utilisés dans les centrales hydrauliques en France. Ces roues sont forgées ou moulées en acier inoxydable martensitique. Les zones fortement sollicitées d'une roue Pelton correspondent aux zones de raccordement des augets sur la jante (zones d'attaches) et sur les échancrures (impact du jet sur le bol) (Cf. Figure 1). Les défauts qui sont recherchés sont du type fissure de fatigue.

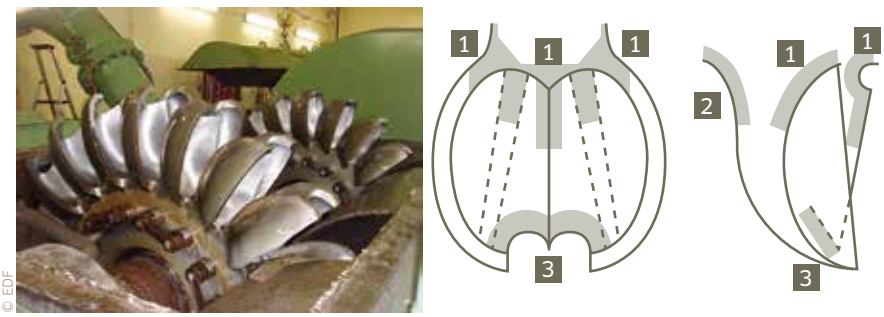
Le niveau de champ magnétique à imposer sur la surface pour un contrôle par magnétoscopie (Cf. Encadré) efficace dépend de la nuance de l'acier et du révélateur utilisé et varie de l'ordre de 2 400 à 4 800 A/m.

Plusieurs méthodes sont possibles pour imposer ce champ magnétique. Nous présentons ici les deux méthodes utilisées à EDF pour le contrôle des roues Pelton.

La méthode dite « par touche » consiste à faire passer localement du courant dans la pièce au moyen de deux électrodes appelées touches, qui sont tenues par l'opérateur (Cf. Figure 2). Cette méthode nécessite au moins une dizaine de positions pour contrôler l'auget d'une roue.

La méthode par spire consiste à imposer plus globalement un flux magnétique dans la pièce. Cette méthode ne nécessite que trois positions pour contrôler l'auget d'une roue (Cf. Figure 3).

Des simulations des deux méthodes avec le logiciel Flux3D ont permis de vérifier que le niveau de champ magnétique nécessaire au contrôle était atteint et homogène sur la surface à examiner.



© EDF

FIGURE 1→
Exemple de roue Pelton et zones à contrôler.

ENCADRÉ

La magnétoscopie

La magnétoscopie est un procédé de contrôle non destructif permettant de s'assurer de l'absence de fissures à proximité de la surface de matériaux ferromagnétiques, en magnétisant la surface de ces matériaux et en projetant simultanément un révélateur.
Son principe est le suivant : un champ magnétique est créé à l'intérieur d'une pièce, à l'aide d'un courant alternatif ou continu. Ce champ magnétique est surtout concentré à proximité de la surface de la pièce. La présence d'une discontinuité dans la pièce, proche de la surface ou débouchant, provoque une perturbation du champ magnétique. L'application de fines particules ferromagnétiques (révélateur) permet de former une image des discontinuités présentes sur la surface de la pièce.

© EDF

FIGURE 2
Méthode par touche.

© EDF

FIGURE 3
Exemple d'examen par la méthode par spire.

MÉTHODE DE MESURE DE L'EXPOSITION

L'exposition au champ magnétique a été mesurée avec un mesureur EFA-300 (Narda), équipé d'une sonde de mesure triaxiale de diamètre 3 cm.
L'exposition a été mesurée au poste de travail avec des opérateurs réalisant habituellement des contrôles par magnétoscopie, afin d'étudier la position réelle de travail. De plus, les opérateurs ont porté sur eux des mesureurs EMDEX II High Field (Enertech USA), réglés pour enregistrer le champ magnétique toutes les 3 secondes, afin de vérifier les mesures réalisées avec l'EFA-300.

Différents filtres ont été utilisés avec l'EFA-300, permettant d'évaluer la composante 50 Hz et les harmoniques (150 Hz, 250 Hz, 350 Hz). En effet, le générateur utilisé pour la méthode par spire émet des harmoniques, ce qui n'est pas le cas du générateur utilisé pour la méthode par touche. Une approche simplifiée et conservatrice pour prendre en compte les harmoniques dans l'évaluation de l'exposition est de sommer les composantes fréquentielles selon la formule :

$\sum_{j=1Hz}^{10MHz} \frac{H_j}{H_{Rj}} \leq 1$, où H_j est l'intensité du champ magnétique à la fréquence j et H_{Rj} est la valeur déclenchant l'action (VA) à la fréquence j.
Les résultats montrent que la prise en compte des harmoniques ne change pas le résultat par rapport à la mesure 50 Hz seule (Cf. Tableau 1). C'est pourquoi seule la composante 50 Hz sera présentée dans la suite de cet article.

CONTRÔLE DE LA ZONE D'ATTACHE

Les tableaux 2 et 3 présentent des exemples de valeurs de champ magnétique mesuré au niveau de l'opérateur pour la méthode par touche et la méthode par spire, pour différents types de roues. On observe quelques dépassements

POSITION DE MESURE	FRÉQUENCE (Hz)	B(µT)	VA(µT)	B/VA
Tête de l'opérateur sur le côté (interprétation après la magnétisation)	50	720	1000	0,72
	150	62	1000	0,062
	250	35	1000	0,035
	350	18	857	0,021
	Total			0,84

TABLEAU 1
Exemples de mesure avec prise en compte des harmoniques : roue à axe horizontal, contrôle de la zone d'attache, 4800 A/m imposés sur le métal.

TYPE DE ROUE	POSITION DES CÂBLES	POSITION DE MESURE	B(µT)
Roue à axe horizontal (∅ environ 2,5 m)	Au sol	Main	610
		Tête	282
	Sur les épaules	Main	778
		Tête	850
	Suspendus au-dessus et sur les épaules	Tête	1 100
Roue à axe vertical	Suspendus sous la roue	Tête de l'opérateur sous la roue	343
		Tête de l'opérateur au-dessus de la roue	164
		Tête de l'opérateur appliquant le révélateur	270
		Tête de l'opérateur à l'extérieur de la roue	197
		Tête de l'opérateur appliquant le révélateur	591

↑TABLEAU 2
Exemples de contrôle de la zone d'attache par la méthode par touches.

TYPE DE ROUE	H SUR LE MÉTAL	POSITION DE MESURE	B(µT)
Roue à axe horizontal (∅ environ 2,5 m)	4 800 A/m	Tête de l'opérateur sur le côté (interprétation après la magnétisation)	720
	3 400 A/m	Tête de l'opérateur sur le côté (interprétation après la magnétisation)	490
Roue à axe horizontal (∅ 1,49 m)	4 000 A/m	Tête de l'opérateur accroupi appliquant le révélateur	60
		Tête de l'opérateur debout pilotant le générateur injectant le courant dans les spires	20
Roue à axe horizontal (∅ 2,67 m)	4 000 A/m	Tête de l'opérateur appliquant le révélateur	150 à 200

↑TABLEAU 3
Exemples de contrôle de la zone d'attaches par la méthode par spire.

de la VA basse (1 000 µT) au niveau de la tête de l'opérateur pour la méthode par touche, en particulier si les câbles sont suspendus ou posés sur les épaules de l'opérateur. Au contraire, l'exposition de la tête de l'opérateur reste inférieure à la VA basse avec la méthode par spire.

CONTRÔLE DE LA ZONE D'ÉCHANCRURE

Les tableaux 4 et 5 présentent des exemples de valeurs de champ magnétique mesuré au niveau de l'opérateur pour la méthode par touche et la méthode par spire, pour différents types de roues. On observe quelques dépassements de la VA basse (1 000 µT) au niveau de la tête de l'opérateur pour la méthode par touche, en particulier si les câbles sont suspendus ou posés sur les épaules de l'opérateur. Au contraire, l'exposition de la tête de l'opérateur reste inférieure à la VA basse avec la méthode par spire, du moment que l'opérateur ne se place pas juste en face de la spire.
L'analyse de l'ensemble des mesures obtenues a donc permis de définir des modifications et une évolution de la méthode de travail afin de réduire l'exposition des opérateurs au champ magnétique.

ÉVOLUTION DES MÉTHODES DE TRAVAIL

Le tableau 6 compare les méthodes par touche et par spire pour le contrôle des roues Pelton. La méthode par spire permet de réduire l'exposition de l'opérateur au champ magnétique 50 Hz, mais elle présente également d'autres avantages comme une meilleure reproductibilité des contrôles, moins de manipulations à faire, des contrôles plus rapides et, plus généralement, une meilleure posture de travail.
Au vu de ces résultats, une évolution des méthodes de travail pour le contrôle des roues Pelton sur le parc EDF a été décidée dans le cadre de l'application de la directive 2013/35/UE.
Les opérateurs utilisant toujours la méthode par touche ont été sensibilisés à la question de l'exposition au champ magnétique et des postures à proscrire ont été définies (pas de câbles sur les épaules, mettre générateur et câbles au sol).
Un déploiement généralisé de la méthode par spire a été lancé. Les opérateurs sont formés au nouveau dispositif et sensibilisés à l'exposition au champ magnétique. Avec cette méthode, l'exposition au champ magnétique est diminuée en ajustant les valeurs de champ magnétique à appliquer et en supprimant le contact opérateur – câbles pendant la phase de magnétisation. Il est ainsi demandé aux opérateurs de réaliser la phase d'interprétation après la phase de magnétisation afin de réduire l'exposition.

TYPE DE ROUE	POSITION DES CÂBLES	POSITION DE MESURE	B(µT)
Roue à axe horizontal (⌀ environ 2,5 m)	Suspendus au-dessus	Tête	2 300
	Au sol	Tête	310
Roue à axe vertical	Suspendus sous la roue	Tête de l'opérateur sous la roue	502
		Tête de l'opérateur appliquant le révélateur	268
	Sur l'épaule	Tête de l'opérateur au-dessus de la roue	1 850
	Suspendus sous la roue	Tête de l'opérateur sous la roue	365
		Tête de l'opérateur appliquant le révélateur	300

↑TABLEAU 4
Exemples de contrôle de la zone d'échancrure par la méthode par touche.

↓TABLEAU 5
Exemples de contrôle de la zone d'échancrure par la méthode par spire.

TYPE DE ROUE	CHAMP MAGNÉTIQUE SUR LE MÉTAL	POSITION DE MESURE	B(µT)
Roue à axe horizontal (⌀ environ 2,5 m)	3 400 A/m	Tête de l'opérateur positionné du côté opposé à la spire (interprétation après la magnétisation)	340
	3 400 A/m	Tête de l'opérateur positionné du même côté que la spire (interprétation après la magnétisation)	1 000
	3 400 A/m	Tête de l'opérateur positionné du même côté que la spire, mais un peu sur le côté (pas juste en face de la spire) (interprétation après la magnétisation)	250
Roue à axe vertical	3 400 A/m	Tête de l'opérateur appliquant le révélateur, les câbles étant suspendus sous la roue	155
Roue à axe horizontal (⌀ 2,67 m)	4 000 A/m	Tête de l'opérateur appliquant le révélateur	60 à 80

CONCLUSION

Le contrôle des roues Pelton par magnétoscopie avait été identifié comme une exposition potentielle à des champs magnétiques élevés. L'évaluation de l'exposition des opérateurs a été réalisée par des mesures sur site, représentatives des diverses situations réelles rencontrées. Cela a permis, d'une part, de se rassurer quant au niveau des expositions et, d'autre part, de définir des modifications et des évolutions des méthodes de travail afin de toujours réduire les expositions des opérateurs au champ électromagnétique.
Deux méthodes de magnétoscopie ont été comparées : la méthode par passage de courant (« touche ») et la méthode par spire. La méthode par spire, plus flexible, permet, selon le mode opératoire défini, de maintenir l'exposition de l'opérateur en dessous de la VA basse de la directive 2013/35/UE. Elle est meilleure en termes de fiabilité du contrôle, mais aussi de pénibilité pour l'opérateur. Elle est en cours de déploiement sur l'ensemble du parc EDF, avec une sensibilisation des opérateurs sur l'exposition aux champs magnétiques. ●

↓TABLEAU 6
Comparaison des méthodes de magnétoscopie pour le contrôle des roues Pelton.

	MÉTHODE PAR TOUCHE	MÉTHODE PAR SPIRE
Reproductibilité des contrôles	–	+
Couverture de la zone à examiner	–	+
Nombre de manipulations de la tête d'aimantation pour couvrir la zone à examiner	1 dizaine	1 à 3
Manipulations et postures de travail	–	+
Risque d'amorçage par arc électrique sur la pièce	Oui	Non
Échauffement des câbles	Oui (peut nécessiter l'interruption du contrôle)	Non (intensité plus faible) car longueur plus importante
Puissance du générateur	Plus faible	Plus importante
Phase d'interprétation et de détection des fissures	Pendant la magnétisation	Après la phase de magnétisation (pas de contact avec les câbles)
Exposition de l'opérateur au champ magnétique 50 Hz	> VA basse pour certaines positions	≤ VA basse

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Exposition aux champs électromagnétiques émis par une presse de soudage à haute fréquence

Josselin Fortuné Contrôleur de sécurité, Centre interrégional de contrôles physiques, Carsat Centre – Val de Loire

Une intervention a été effectuée dans une entreprise pour évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques dans l'environnement d'une presse de soudage à haute fréquence. Cette intervention a été réalisée en utilisant le système Captiv développé par l'INRS qui permet de suivre les niveaux d'exposition en lien avec les phases de travail.

L'intervention a consisté à évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques dans l'environnement d'une presse de soudage à haute fréquence et à mesurer le courant induit dans les extrémités du corps des deux opératrices lors de l'émission de champs électromagnétiques. Cette intervention a été menée en utilisant le système Captiv (Cf. Encadré), qui permet de:

- présenter le niveau d'exposition des opérateurs en fonction du temps;
- visualiser les phases de travail au moyen d'un enregistrement vidéo;
- corréler les niveaux d'exposition et les phases de travail.

Dans cet atelier, l'activité principale est le soudage d'éléments plastiques sur des longueurs variant de quelques centimètres à 5 mètres. Cette opération est réalisée avec une presse de soudage à haute fréquence (HF) de marque SEF, type 7,5 kW, installée dans un local spécifique (Cf. Figures 1 et 2). La fréquence d'émission du champ électrique est de 27,12 MHz. Deux salariés placés de part et d'autre de la machine aident à avancer et à positionner les éléments avant le soudage. Leur rôle est de maintenir constante la largeur d'un rebord.

Le chauffage par pertes diélectriques sous haute fréquence permet l'élévation de la température de matériaux isolants. Les machines utilisant ce type de chauffage génèrent des champs électromagnétiques (principalement des champs électriques). Celles qui n'ont pas de blindage haute fréquence ou dont le blindage est mal conçu peuvent exposer les opérateurs au-delà des valeurs déclenchant l'action (VA). Les risques connus, liés aux champs électromagnétiques engendrés par ces machines, sont les suivants:

- échauffement corporel;
- brûlures de l'opérateur par contact avec des pièces métalliques (bagues, colliers, lunettes, châssis…) chauffées par la circulation de courants induits;
- perturbation de systèmes électroniques avoisinants (automates programmables, implants biomédicaux actifs…);
- décharges électriques en radiofréquences au contact d'éléments métalliques (lâché d'objet, mouvement réflexe, chute en cas de travail en hauteur…).

D'autres risques existent, tels que les risques électrique, mécanique (écrasement), chimique (émanation toxique…).

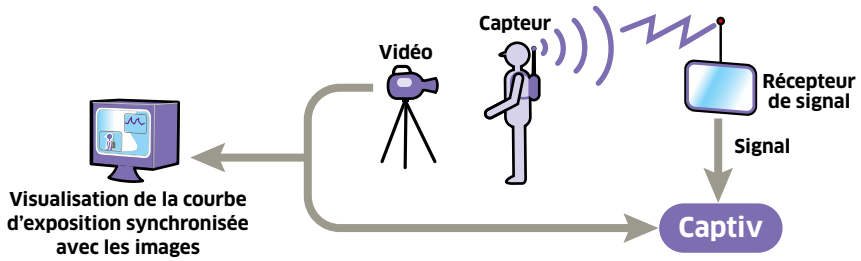
CRITÈRES D'ÉVALUATION

La directive sociale « agents physiques » spécifique aux champs électromagnétiques 2013/35/UE du 26 juin 2013 [1] fixe les prescriptions minimales en matière de protection des travailleurs, c'est-à-dire toute personne en activité professionnelle dès lors qu'elle peut être exposée à une source de champ électromagnétique en relation ou non avec sa propre activité.

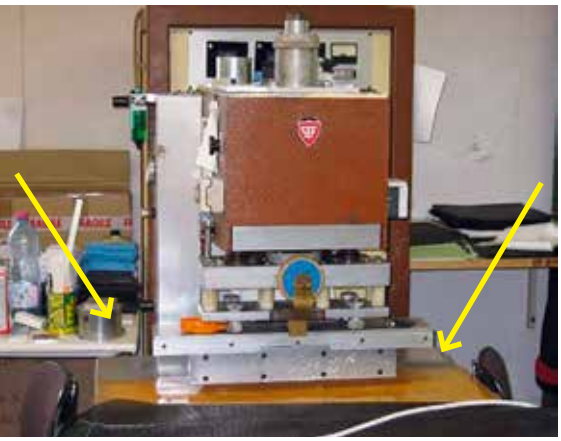
ENCADRÉ

Le système Captiv

Le système Captiv (Centrale d'acquisition de la pollution au travail informé par vidéo), développé par l'INRS, permet de centraliser et de stocker les informations en provenance de capteurs d'exposition professionnelle et de les coupler à un enregistrement vidéo du poste de travail (Cf. Figure ci-dessous). Cette technique permet d'étudier précisément un poste de travail et, en particulier, de corréler le geste professionnel avec le niveau d'exposition. Le traitement des informations ainsi collectées, réalisé à l'aide du module d'analyse Captiv, permet d'obtenir une connaissance fine du poste. On peut dès lors proposer des modifications ou des aménagements d'installations existantes et/ou former les opérateurs.



© Carsat Centre - Val de Loire



© Carsat Centre - Val de Loire

←FIGURE 1
Vue de la presse et des deux postes de travail (gauche et droit).

Cette directive comporte plusieurs spécifications, notamment les valeurs limites d'exposition (VLE) et les valeurs déclenchant l'action (VA).
Les VLE correspondent aux restrictions de base définies par l'ICNIRP[1] (commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants). Non directement quantifiables et dépendantes de la fréquence, les VLE sont les limites en dessous desquelles il n'y aurait pas d'effets nocifs connus sur la santé.
Les VA correspondent aux niveaux de référence définis par l'ICNIRP. Ce sont des grandeurs mesurables, obtenues à partir des VLE, utilisées pour évaluer les expositions pratiquement. Au-dessus de ces niveaux, il convient de mettre en œuvre des mesures de prévention. Le respect des VA garantit le respect des VLE.

Elles sont établies à partir des effets reconnus nocifs, à court terme, sur le corps humain. Les effets à long terme et les effets sur les implants ne sont pas pris en compte.
Dans le cas présent, pour une fréquence de 27,12 MHz, la valeur déclenchant l'action est de 61 V/m pour la valeur efficace de l'intensité de champ électrique et 100 mA pour le courant induit dans les extrémités. Dans le cas où la durée d'exposition est inférieure à 6 minutes, le niveau de champ électrique mesuré est pondéré par application de la formule suivante (en référence à la norme C18-610 de novembre 1995 page 14 [2]):

$$E_{pondéré} = E_{soudure} \times (T_{soudage} + T_{préparation})^{0,5}$$

E: niveau de champ électrique (V/m)
T: temps (s)

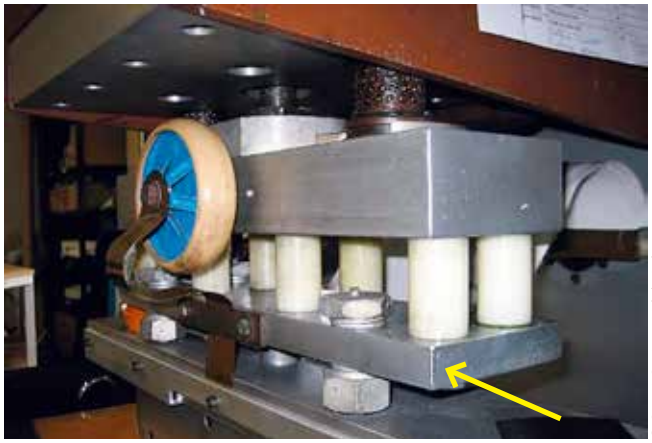
MÉTHODE DE MESURAGE

Le champ électrique ainsi que le courant induit qui traverse l'opérateur lors de la phase de soudage ont été mesurés aux postes de travail (à hauteur des mains et du tronc des opérateurs). Les mesures ont été réalisées dans les configurations de soudage du jour avec les opérateurs à leur poste de travail en permanence.
Le matériel utilisé comprenait une base PMM 8053, une sonde EP 330 pour le mesurage des champs électriques (0 – 300 V/m, 100kHz – 3 GHz), un calibreur 8053 CAL, un mesureur de courant induit Holaday HI3702 et un trépied en bois.
Le traitement des informations collectées a été réalisé à l'aide du système Captiv (Cf. Encadré 1).
Pour chacun des enregistrements réalisés, l'opérateur a été équipé du capteur permettant d'enregistrer en temps réel le courant induit qui traverse son corps.

RÉSULTATS DES MESURES ET DES OBSERVATIONS

Mesure du courant induit à un poste de travail

Des mesures de l'intensité du champ électrique et des courants induits


© Carsat Centre – Val de Loire

© Carsat Centre – Val de Loire

↑FIGURE 2
Vue de l'électrode et du clinquant de la presse.

dans les extrémités ont été réalisées sur une opératrice. Les valeurs dépassant les VA figurent en grisé dans le tableau.
Rappel : pour une fréquence de 27,12 MHz, la valeur déclenchant l'action est de :

- 61 V/m pour la valeur efficace de l'intensité de champ électrique ;
- 100 mA pour le courant induit dans les extrémités.

Évolution temporelle du courant induit

L'opératrice réalise deux cycles de soudage. Les figures 3 et 4 montrent les valeurs de courant induit traversant son corps, respectivement aux postes de gauche et de droite. Ces valeurs sont différentes d'un cycle à l'autre. On constate que lors du premier cycle de soudage, alors que l'opératrice est accoudée sur la table qui comporte un mètre ruban métallique, le courant induit atteint 76 mA pour le poste de droite et 154 mA puis s'atténue à 120 mA pour le poste de gauche (Cf. Figure 3). Lors du deuxième cycle, l'opératrice n'est plus accoudée à la table, elle a son bras près du corps et le courant induit n'est plus que de 50 mA pour le poste de droite et 65 mA pour le poste de gauche (Cf. Figure 4).

POSITION DU PIED DROIT	POSITION DU PIED GAUCHE	TYPE D'ÉLECTRODE	POSITION ET EMPLACEMENT DE L'OPÉRATRICE	COURANT INDUIT MAXI (mA)	CHAMP ÉLECTRIQUE MAXI (V/m)
Chaise	Chaise	Large	Au poste de travail	77	713
Chaise	Chaise	Étroite	Au poste de travail	50	488
Chaise	Chaise	Large	Assise reculée	77	596
Chaise	Sol	Large	Debout reculée	140	602
Sol	Machine	Large	Au poste de travail	160	710
Sol	Chaise	Large	Au poste de travail	181	689
Machine	Chaise	Large	Au poste de travail	182	661
Machine	Chaise	Étroite	Au poste de travail	50	519

	Absence réelle d'opérateur	Présence nécessaire d'un opérateur
Mesure du champ E	E = E mes ± 45 %	E = E mes x 1,1 ± 45 %

E mes = indication donnée par le champmètre

Mesure du courant induit	$I_L = I_L$ mes ± 30 %

I_L mes = indication donnée par l'appareil de mesure de courant induit

↑TABLEAU
Résultats des mesures de courant induit et de champ électrique au poste de l'opératrice. Ci-contre : incertitudes sur les mesures.

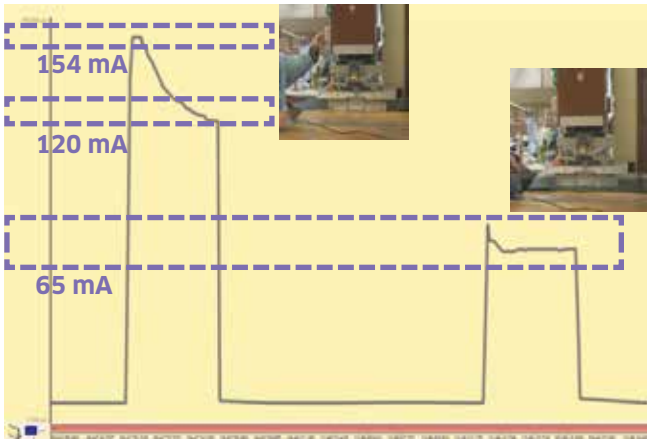


FIGURE 3
Mesure du courant induit au poste de gauche.

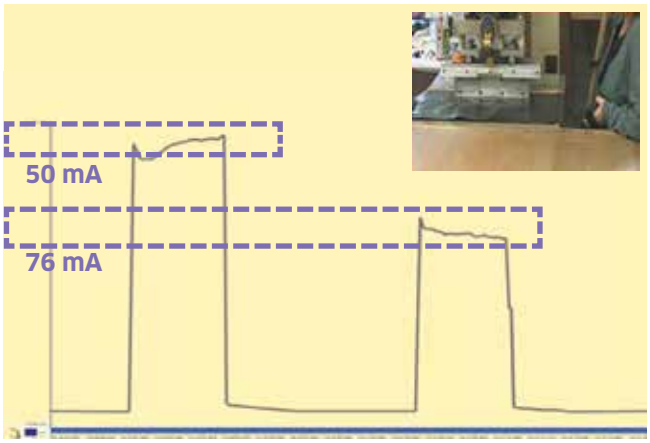


FIGURE 4
Mesure du courant induit au poste de droite.

FIGURE 5
Signalisation à mettre en place à proximité des installations émettant des champs électromagnétiques importants.

La gestuelle a donc une importance sur le niveau de courant induit auquel est exposée l'opératrice et l'effet « antenne » est à proscrire.

CONCLUSION

Dans l'environnement de la presse, proche du poste de travail :
- les valeurs efficaces du champ électrique sont toutes supérieures à la VA (61 V/m à 27,12 MHz) ;
- les valeurs des courants induits dans les extrémités sont supérieures à la valeur de référence (100 mA à 27,12 MHz) lorsqu'une électrode large est utilisée et qu'un pied de l'opératrice touche le sol ou la machine.

Les mesures et les vidéos nous permettent de constater qu'il y a une corrélation entre les niveaux des courants induits dans les extrémités, le type d'électrode et la position de l'opératrice.

Parmi les aménagements envisageables, la première solution consiste à réduire les valeurs efficaces du champ électrique :
- en réalisant des patins de masse ;
- en améliorant les blindages et les tresses de masse.

Ces aménagements ne peuvent être réalisés que par des entreprises spécialisées en se fixant un objectif de résultats.

Pour en savoir +

- Dossier web « Champs électromagnétiques » sur www.inrs.fr

Pour réduire les intensités des courants induits dans les extrémités, notre expérience nous permet de conseiller, lorsque cela est possible :
- d'éloigner l'opérateur de la table lors de la phase de soudage ;
- de ne pas être en contact avec la table, lors de la phase de soudage ;
- de déporter les boutons de commande pour éviter l'effet « antenne ».

De plus, au regard du principe de précaution, des panneaux signalétiques (Cf. Figure 5) concernant les implants doivent être installés. ●

1. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques). J.O. du 26 juin 2013.

[2] Norme française. Exposition humaine aux champs électromagnétiques hautes fréquences (10 kHz à 300 GHz), norme C18-610, novembre 1995.

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Les systèmes de télécommunication : mesurage des champs électriques et actions de prévention

Emmanuel Marteau Ingénieur-conseil, Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France

La Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et la Carsat Languedoc-Roussillon ont réalisé plusieurs interventions destinées à mesurer les champs électriques à proximité de trois systèmes de télécommunication. Lorsque les résultats dépassaient la valeur déclenchant l'action fixée par la directive européenne 2013/35/UE, des mesures de prévention adaptées ont été proposées.

Les télécommunications représentent une famille à part entière de sources industrielles de champs électromagnétiques. En dehors de la téléphonie mobile – sujet qui n'est pas développé dans cet article –, les applications sont nombreuses, les fréquences utilisées vont de 10 kHz à plusieurs dizaines de GHz et les puissances d'émission de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts.

Trois exemples d'intervention sont présentés dans cet article avec des résultats de mesurage et des préconisations de mesures de prévention :

- système de transmission satellite à l'aide d'antennes paraboliques ;
- pylône de télécommunication dédié aux émissions TV et radios ;
- tour Eiffel.

ÉQUIPEMENTS DE MESURE ET MÉTROLOGIE

L'expérience des mesures dans le domaine des antennes de télécommunication a montré que les valeurs de l'intensité du champ magnétique à proximité de ce type d'équipement est négligeable, eu égard aux valeurs déclenchant l'action fixées par la directive européenne 2013/35/UE. C'est pourquoi seul le champ électrique a été mesuré. Le choix du matériel a été réalisé en tenant compte des

FABRICANT	LIBELLÉ	TYPE	GAMME DE FRÉQUENCES	NIVEAU DE SATURATION
Wandel & Goltermann	Champmètre	EMR 200 + sonde de type 9.2	10 MHz à 18 GHz	E > 1 000 V/m
EMTEST	Champmètre	PMM 8053 + sonde de type EP 330	100 kHz à 3 GHz	E > 600 V/m
EMTEST	Champmètre	PMM 8053 + sonde de type EP 301	100 kHz à 3 GHz	E > 1 200 V/m

↑TABLEAU 1
Caractéristiques techniques des appareils de mesure.

© CRAMIF

↑FIGURE 1
Vue d'ensemble d'un site de transmission satellite.

bandes de fréquences d'émission et de réception des antennes. Les caractéristiques techniques des équipements de mesure sont données dans le tableau 1.

SYSTÈME DE TRANSMISSION SATELLITE À L'AIDE D'ANTENNES PARABOLIQUES

La première intervention concerne un établissement spécialisé dans la transmission de données par satellites à l'aide d'antennes paraboliques (Cf. Figure 1).
Les paraboles fonctionnent en émission, en réception ou en combiné émission/réception. La fréquence des champs électromagnétiques varie de 3,4 à 14 GHz. Les émetteurs ont des puissances comprises entre 10 et 400 W et les diamètres des antennes varient de 2,5 à 11 m (Cf. Figures 2 et 3).
À proximité des paraboles fonctionnant en réception, les niveaux des champs électromagnétiques sont peu élevés puisque l'objectif est de réceptionner un signal très faible venant de très loin.
Le tableau 2 indique les valeurs

© CRAMIF

↑FIGURE 2
Source et parabole de 10 W.

© CRAMIF

↑FIGURE 3
Émetteurs au pied de l'antenne.

efficaces moyennes maximales du champ électrique mesuré dans différentes configurations.
Les valeurs du champ électrique mesuré sont inférieures à la VA fixée à 140 V/m par la directive 2013/35/UE entre 3,4 et 14 GHz, sauf entre la source et la parabole où la valeur du champ est de 172 V/m. Des valeurs supérieures sont vraisemblablement présentes près des antennes de plus forte puissance.
En termes de prévention, il est indispensable de couper l'émission des antennes lors des travaux de maintenance à l'avant des paraboles près des sources, notamment lors d'interventions techniques en hauteur ou lors de travaux de nettoyage ou de déneigement.

POINTS DE MESURE	CHAMPS ÉLECTRIQUES MESURÉS (V/m)
Dans les allées de circulation	1,5
Près des émetteurs	18
Devant les paraboles, à environ 2,2 m de hauteur	26
Dans le faisceau entre la source de 10 W et la parabole	172
Valeur déclenchant l'action (3,4 - 14 GHz)	**140**

↑TABLEAU 2
Résultats des mesures de champ électrique comparés à la valeur déclenchant l'action (VA).

PYLÔNE DE TÉLÉCOMMUNICATION DÉDIÉ AUX ÉMISSIONS TV ET RADIO

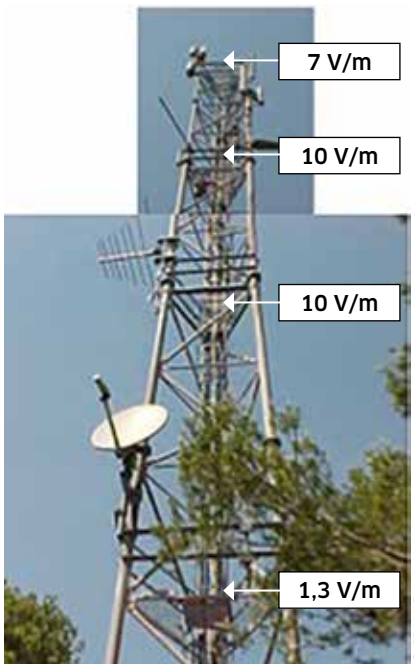
La deuxième intervention concerne un pylône de télécommunication (Cf. Figure 4).
Ce pylône supporte de nombreuses antennes fonctionnant en émission ou en réception, destinées à la téléphonie mobile, à la radiodiffusion, à la télédiffusion ainsi qu'à des transmissions par faisceaux hertziens. La fréquence des champs électromagnétiques varie de quelques MHz à 13 GHz. Dans cette gamme de fréquences, la VA la plus basse du champ électrique est de 61 V/m. Les valeurs mesurées du champ électrique à l'intérieur du pylône varient de 1,3 à 10 V/m (Cf. Figure 5), ce qui est inférieur aux VA de la directive 2013/35/UE.
Ces résultats ne préjugent en rien des niveaux pouvant être atteints sur d'autres pylônes. L'expérience montre que les VA pouvaient être dépassées. C'est pourquoi il est recommandé d'équiper les salariés intervenant sur des pylônes d'un champmètre ou d'un détecteur de champ. Les VA peuvent également être dépassées en cas d'intervention devant une antenne. Il est donc recommandé de consigner l'émetteur lors d'une telle intervention et de s'assurer de l'absence de champ avant de commencer les travaux.

TOUR EIFFEL

La troisième intervention concerne un pylône un peu particulier puisqu'il s'agit de la tour Eiffel. Elle constitue en effet un « super pylône » équipé de presque tous les types d'antennes pour la radiotélécommunication. Au-dessus du troisième étage de la tour Eiffel, ouvert au public, se trouvent plusieurs étages techniques (Cf. Figure 6). Au cinquième étage, quatre phares sont installés et au

© CRAMIF

↑FIGURE 4
Pylône de télécommunication dédié aux émissions TV et radios.



© CRAMIF

↑FIGURE 5
Valeurs du champ électrique mesurées à différentes hauteurs du pylône.

© CRAMIF

↑FIGURE 6
Vue des étages supérieurs de la tour Eiffel.

POINTS DE MESURE	CHAMP ÉLECTRIQUE (V/m)
5e étage	28
5e étage, passerelles surélevées près des phares	67
6e étage	150
7e étage, derrière les antennes de radiodiffusion	640
7e étage, devant les antennes de radiodiffusion	1 100
Valeur déclenchant l'action (100 kHz - 13 GHz)	**61**

↑TABLEAU 3
Résultats des mesures de champ électrique comparés à la VA.

septième étage, des antennes de radiodiffusion. Des antennes de télédiffusion sont présentes encore plus haut sur le mât. Les plages de fréquences concernées se situent entre 100 kHz et 13 GHz. Des interventions sont régulièrement nécessaires aux étages les plus élevés pour des opérations de maintenance ou l'installation de nouveaux équipements.

Une première série de mesures de champ électrique a été effectuée en 2003, le service prévention de la Cramif ayant été sollicité par l'entreprise chargée de poser les lampes de scintillement. Une autre campagne de mesures a été réalisée en 2010 à l'occasion de travaux de peinture de l'ensemble de la tour Eiffel (Cf. Tableau 3). À la suite de ces mesures et du dépassement important des VA, il a été décidé de ne pas installer d'illumination sur les derniers étages de la tour Eiffel. D'autres mesures de prévention ont été prises:

- la puissance d'émission des antennes de radiodiffusion a été réduite lors de la pose des lampes sur la partie supérieure de la tour;
- des équipements de protection individuelle (EPI) ont été mis à disposition des salariés. Deux types de combinaison étaient disponibles, une première combinaison assurant un facteur de protection de 5 et une deuxième réduisant l'exposition des salariés d'un facteur 10;
- port d'un détecteur de champ électromagnétique sous la combinaison qui émettait une alarme en cas de niveau supérieur à 61 V/m;
- formation des salariés réalisant les travaux. ●

© Guillaume J. Plisson pour l'INRS

↑ Lors des travaux à réaliser près d'une parabole, les intervenants peuvent être exposés à des ondes électromagnétiques.

Pour en savoir +

- Fiches de la collection « Champs électromagnétiques », INRS, ED 4200 et suivantes, notamment la fiche ED 4214 « Les moyens de prévention ».
- Dossier « Champs électromagnétiques » sur www.inrs.fr
- *Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques. Guide d'évaluation des risques,* INRS, ED 6136.
- Intégrer le risque « rayonnements électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels, *Hygiène et sécurité du travail,* ND 2350, 2011.
- Directive européenne 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de sante relatives à l'exposition des travailleurs aux risques physiques (champs électromagnétiques).
- Réduction du rayonnement électromagnétique des soudeuses haute fréquence de conception ancienne, à l'aide de patin de masse, *Hygiène et sécurité du travail,* ND 2360, 2012.

Abonnez-vous à HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL

LA REVUE TRIMESTRIELLE TECHNIQUE DE L'INRS

Dossier

DU NOUVEAU DANS LA PRÉVENTION DES RISQUES CHIMIQUES

Notes techniques

Les fiches HST

COMMENT ESTIMER LES RISQUES DE MULTI-EXPOSITIONS AUX AGENTS CHIMIQUES ?

TECHNIQUE

Des articles
d'analyse et de synthèse

Des actualités
juridiques et normatives

Des outils
pratiques et des méthodes

Pour vous aider
à mettre en œuvre
la **prévention des risques professionnels**
en entreprise

Pour vous abonner

hst.fr

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Exposition des porteurs d'implants médicaux actifs aux champs électromagnétiques 50 Hz

Martine Souques, Jacques Lambrozo EDF, service des Études médicales
Isabelle Magne EDF, R&D

La multiplication des sources de champs électromagnétiques (CEM) du monde moderne, associée au développement de dispositifs médicaux implantables actifs (DMIA), augmente le risque d'interférences électromagnétiques, entraînant un dysfonctionnement plus ou moins grave des DMIA. Or, c'est en milieu professionnel que se trouvent les sources de CEM les plus importantes. Une méthode d'évaluation individualisée des risques encourus par le travailleur aux CEM 50 Hz a été mise au point par EDF et est illustrée, dans cet article, à travers deux études de cas.

La directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil européen du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques)[1] et abrogeant la directive 2004/40/CE [1] précise que l'employeur doit prêter une attention particulière à toute incidence sur la santé et la sécurité des travailleurs à risques particuliers, tels que les porteurs d'implants actifs ou d'appareils médicaux portés à même le corps. Nous présentons ici notre analyse de la directive sans avoir connaissance du décret de transposition en droit français qui est encore en préparation lors de la rédaction de cet article.

Les mesures prises dans le cadre de la directive à l'égard de ces travailleurs doivent être adaptées, au moyen d'une évaluation du risque particulière. Si c'est à l'employeur de réaliser cette évaluation, c'est bien le médecin du travail qui est chargé de définir l'aptitude d'un travailleur à son poste de travail.

Lorsque le travailleur est porteur d'un DMIA et qu'il est exposé professionnellement aux CEM, cette décision peut être difficile à prendre. En effet, le fonctionnement de l'implant peut être perturbé par ces champs, c'est une question de compatibilité électromagnétique. D'un autre côté, prononcer l'inaptitude risque de priver le travailleur de son emploi. Le risque d'interférence doit donc être évalué.

DISPOSITIFS MÉDICAUX IMPLANTÉS ACTIFS (DMIA) ET RISQUE D'INTERFÉRENCES

Le risque d'interférence dépend du type d'implant, de la fréquence des champs électromagnétiques, de leur intensité et de la durée de l'exposition [2]. Notre démarche se réfère essentiellement à la fréquence de 50 Hz, liée à l'électricité, d'une part, car c'est l'exposition la plus courante dans notre entreprise et, d'autre part, car cette exposition est ubiquitaire. Toutes les industries sont alimentées en 50 Hz, la plupart des outils et machines industrielles fonctionnent avec du 50 Hz. Elle peut toutefois s'adapter à d'autres gammes de fréquences comme le montre notre deuxième exemple.

Il existe des données publiées, essentiellement sur le risque de dysfonctionnement des stimulateurs cardiaques. Ces publications permettent dans de nombreux cas,

	STIMULATEUR CARDIAQUE RÉGLÉ EN MODE UNIPOLAIRE	STIMULATEUR CARDIAQUE RÉGLÉ EN MODE BIPOLAIRE
Champ électrique < 1,8 kV/m < 5 kV/m ≥ 5 kV/m	Fonctionnement normal Étude de poste Étude de poste	Fonctionnement normal Fonctionnement normal Étude de poste
Champ magnétique < 45 µT < 100 µT ≥ 100 µT	Fonctionnement normal Étude de poste Étude de poste	Fonctionnement normal Fonctionnement normal Étude de poste
Demande/Angoisse	Étude de poste	Étude de poste

↑TABLEAU 1

Éléments d'appréciation du risque de dysfonctionnement des stimulateurs cardiaques selon les niveaux de champ électriques et magnétiques 50 Hz.

une fois connu le niveau de champ magnétique 50 Hz auquel est exposé le travailleur, de prendre une décision (Cf. Tableau 1). Pour les autres types de DMIA, ainsi que pour l'exposition au champ électrique 50 Hz, peu de données ont été publiées. C'est pourquoi, à EDF, nous avons mis au point une démarche d'évaluation du risque afin d'aider le médecin du travail dans sa prise de décision. Cette démarche a été mise en œuvre essentiellement dans le cas de travailleurs porteurs de défibrillateurs automatiques implantés (DAI), et, dans quelques cas, pour des porteurs de stimulateurs cardiaques, qui sont deux types de DMIA avec un risque vital en cas de dysfonctionnement.

Dans le cas des implants cardiaques, la démarche peut s'appuyer sur deux normes européennes. La norme EN 50527-1 « Procédure pour l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques des travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs. Partie 1 : généralités » est générale aux DMIA [3] et la norme EN 50527-2-1 est spécifique aux stimulateurs cardiaques [4]. Ces normes donnent des indications sur les différentes méthodes d'évaluation du risque. Les données de la littérature [5, 6] permettent de conclure que, avec les stimulateurs cardiaques actuels, réglés en mode bipolaire et une sensibilité ventriculaire courante (2 mV en général), le risque d'interférence est inexistant à 50 Hz pour les expositions inférieures aux limites de la recommandation européenne concernant l'exposition du public : 100 µT et 5 kV/m [7]. Ces valeurs sont d'ailleurs garanties par la plupart des fabricants. Dans le cas d'un réglage en mode unipolaire, des interférences ont été observées à des niveaux inférieurs : 45 µT et 1,7 kV/m [8]. Un numéro spécial de la revue des *Archives des maladies du cœur et des vaisseaux* a été consacré à ce sujet [9].

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉVALUATION DU RISQUE DÉVELOPPÉE À EDF

La méthode d'évaluation développée à EDF dans les années 2000 [10, 11] est une de celles proposées dans la norme CENELEC EN 50527-1. Elle a pour objectif d'évaluer le risque encouru par le travailleur dans son quotidien professionnel afin d'éclairer la décision du médecin du travail. Il s'agit d'une étude individualisée, qui est valable pour ce travailleur, avec cet implant, à ce poste de travail. Si le travailleur change de poste, de modèle d'implant ou que les réglages de cet implant sont modifiés, l'étude est à reprendre.

La démarche nécessite de réunir une équipe pluridisciplinaire, composée :

- du médecin du travail ;
- du salarié, équipé d'un appareil de mesure de champ porté en bandoulière ;
- du cardiologue, avec un matériel de réanimation cardiaque ;
- du fabricant de l'implant, avec le matériel de télémétrie approprié pour interroger l'implant ;
- de l'équipe chargée de réaliser les mesures de champs électromagnétiques sur le terrain, avec les appareils de mesure appropriés.

La personne concernée (le patient) doit être avertie des risques possibles d'interférence et signer un formulaire de consentement. Cette étude n'est engagée qu'avec l'accord du patient, de son cardiologue et de son médecin du travail. Tous les secteurs où cette personne est susceptible de travailler ou même de passer doivent être visités, en sa présence, en commençant par les endroits où le champ électromagnétique est le plus bas et en vérifiant les paramètres de programmation de l'implant à chaque fois. Un enregistrement de son fonctionnement est réalisé en simultané par télémétrie (d'où l'importance de la présence du fabricant) pour détecter une interférence et la pallier (d'où l'importance de la présence du cardiologue). Un rapport de fin d'étude est remis au médecin du travail qui, *in fine*, prendra sa décision.

Nous présenterons, à titre d'exemple, deux études de cas chez des travailleurs porteurs de DAI exposés, l'un à un champ magnétique 50 Hz possiblement intense, l'autre à des champs électromagnétiques dans la gamme des radiofréquences.

DAI ET CHAMP MAGNÉTIQUE 50 HZ

Dans le premier cas, Monsieur X est releveur de compteurs dans des postes de transformation client moyenne tension-basse tension (HTA/BT) de tout un département. Après la pose d'un DAI de marque Biotronik, son médecin du travail lui a donné une restriction d'aptitude qui est de ne pas s'approcher à moins de 50 cm des câbles électriques lorsqu'il rentre dans un poste HTA/BT. Du fait de l'exiguïté de ces locaux, cette restriction est difficile à appliquer et le médecin du travail décide de faire une étude d'évaluation de risque. L'étude a été effectuée avec l'accord du cardiologue et en présence d'un représentant du fabricant et d'une équipe de réanimation.

Cinq postes clients ont été choisis pour réaliser cette étude: différentes puissances et charge maximum au moment des mesures. Le courant a été enregistré en continu dans les trois semaines précédant et pendant les mesures afin de vérifier que celles-ci ont bien été réalisées à puissance maximale ou, le cas échéant, qu'elles puissent être extrapolées à charge maximale.

Les appareils de mesure utilisés ont été choisis en fonction de la gamme de fréquences (50 Hz et harmoniques) et des niveaux attendus. Trois appareils ont été retenus :

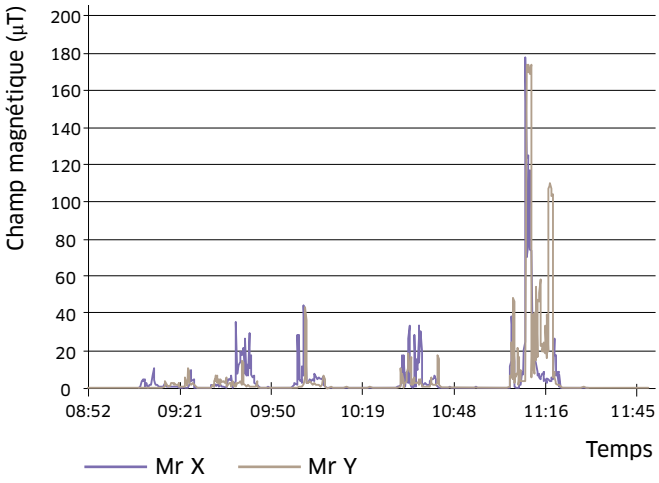
- un EFA 300 (Narda, Allemagne) qui mesure les champs magnétiques de 5 Hz à 32 kHz et de 20 nT à 31,6 mT, avec filtre 50 Hz;
- un Emdex II (Enertech, USA) qui mesure les champs magnétiques de 40 à 800 Hz et de 10 nT à 300 µT, en mode mesure du fondamental et des harmoniques;
- un Emdex II high field (Enertech, USA) qui mesure les champs magnétiques de 40 à 800 Hz et de 0,4 µT à 12 mT, en mode mesure du fondamental et des harmoniques.

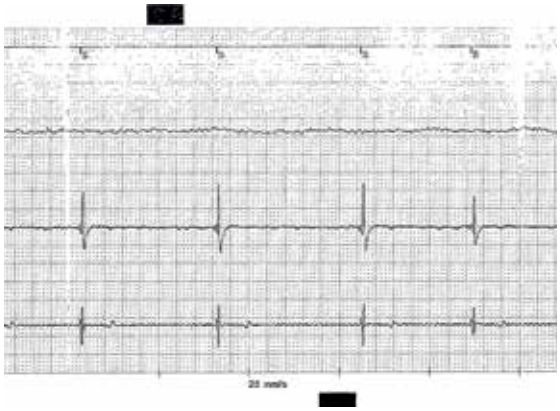
L'intensité maximale mesurée au niveau du DAI était de 200 µT (Cf. Figure 1). Le fonctionnement du DAI n'était pas perturbé. Si le DAI avait détecté un trouble du rythme, on aurait eu T (pour tachycardie) ou F (pour fibrillation) à la place de S (S = rythme sinusal = normal) (Cf. Figure 2). Ce DAI est surveillé à distance par envoi au fabricant, chaque nuit, des événements enregistrés dans les 24 heures précédentes. Aucun dysfonctionnement n'avait été signalé depuis un an, y compris au cours de son activité professionnelle depuis la reprise du travail, après la pose du DAI.

↓FIGURE 1

Exemple en champ magnétique 50 Hz – situation maximale d'exposition (à gauche) – enregistrement du champ magnétique dans les cinq postes (à droite).

© EDF





←FIGURE 2

Exemple en champ magnétique 50 Hz – enregistrement par télémétrie du fonctionnement du DAI.

DAI ET CHAMP ÉLECTRIQUE RF

Dans le second cas, Monsieur Y est pompier. Après la pose d'un DAI de marque Saint Jude, le médecin du travail a suspendu les missions sur le terrain car elles se font avec des véhicules équipés de nombreux systèmes de communication, en particulier radio. L'étude a été effectuée avec l'accord du cardiologue et en présence d'un représentant du fabricant et de médecins pompiers réanimateurs.

Trois véhicules différents ont été choisis pour réaliser cette étude :

- le véhicule poste de commandement (VPC) (Cf. Figure 3) qui sort de manière occasionnelle, lors de gros accidents. Il est équipé d'une radio numérique 2 W, d'une radio 12 et 24 W (bande de fréquence 380-400 MHz), d'un tableau numérique sans fil et d'un groupe électrogène (courant 50 Hz) ;
- le véhicule secours routier (VSR) qui effectue 5 % des missions. Il est équipé d'une radio numérique 2 W et d'un groupe électrogène (courant 50 Hz) ;
- le véhicule de secours et d'aide aux victimes (VSAV), communément appelé ambulance, qui effectue 80 % des missions. Il est équipé d'une radio numérique 2 W.

Les appareils de mesure utilisés ont été choisis en fonction de la gamme de fréquences (RF, 50 Hz et harmoniques) et des niveaux attendus. Quatre appareils ont été retenus :

- un EFA 300 (Narda, Allemagne) qui mesure les champs magnétiques de 5 Hz à 32 kHz et de 20 nT à 31,6 mT, avec filtre 50 Hz ;
- un Emdex II (Enertech, USA) qui mesure les champs magnétiques de 40 à 800 Hz et de 10 nT à 300 µT, en mode mesure du fondamental et des harmoniques ;
- un analyseur de spectre MS 2721B (Anritsu, Japon), avec une antenne HE-200 (Rhode et Schwarts, Allemagne), qui mesure les champs électriques de 200 à 500 MHz ;
- un champmètre large bande EMR 300 (Narda, Allemagne) qui

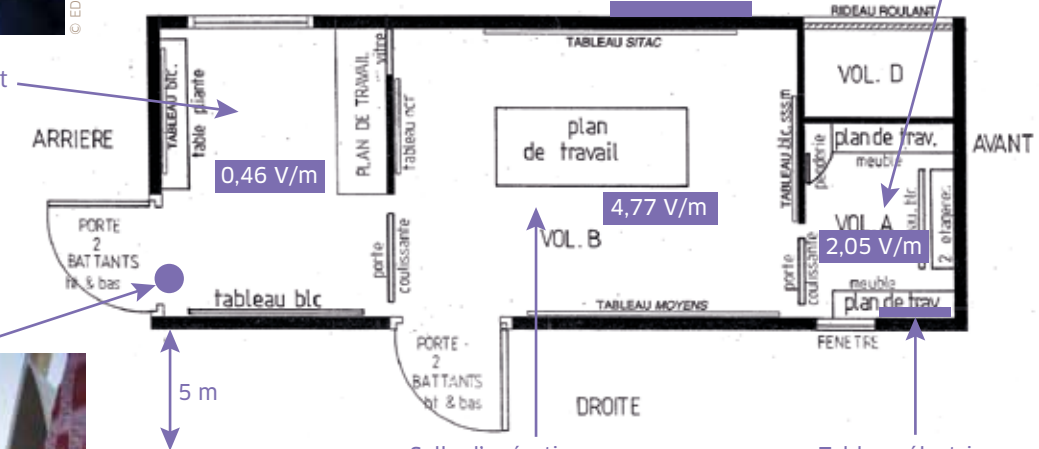
↑FIGURE 3
Exemple en champ électrique RF – véhicule poste de commandement (VPC).

↓FIGURE 4
Exemple en champ électrique RF – plan du VPC et résultats des mesures.

Salle de commandement

Groupe électrogène

Salle de transmission



mesure les champs électriques de 3 MHz à 18 GHz et de 0,8 à 1 000 V/m.

Les champs électromagnétiques les plus importants ont été mesurés dans le VPC. Le champ magnétique maximum mesuré était de 5 µT à 50 Hz au contact du tableau électrique (2,3 µT à 20 cm). Le champ électrique dans la bande de 380 – 400 MHz maximum était de 11,2 V/m au niveau du DAI dans la salle de transmission du VPC, en émission à la puissance maximale de 12 W, et de maximum 24,4 V/m au niveau du DAI, en utilisant le téléphone portatif 2 W (position assise au poste de transmission VPC). À l'extérieur, le champ électrique maximum mesuré était de 1,86 V/m, à 5 m en arrière de l'antenne (Cf. Figure 4). Dans et autour

© EDF

des deux autres véhicules, le champ magnétique maximum à 50 Hz était de 0,18 µT et le champ électrique maximum était de 2 V/m à 380 MHz. La surveillance par télémétrie du DAI était effectuée en continu (Cf. Figure 5), aucun dysfonctionnement n'a été enregistré.

Au total, ces exemples illustrent la démarche clinique d'évaluation

←FIGURE 5

Exemple en champ électrique RF – tête de télémétrie posée sur le boitier du DAI.

des risques proposée par la norme EN 50527-1 pour les personnes portant un dispositif médical cardiaque implanté exposées aux champs électromagnétiques. Ils démontrent l'intérêt de mesurer ces champs et de vérifier l'implant cardiaque en même temps, pour évaluer les risques d'interférences et aider le médecin du travail à définir l'aptitude au travail de ces personnes. La décision de l'aptitude revient *in fine* au médecin du travail. ●

1. Vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Conseil des communautés européennes. Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE. *Journal officiel de l'Union européenne,* L179, 29 juin 2013, 2013, pp. 1-21.

[2] Souques M., Magne I., Lambrozo J. Implants cardiaques et interférences électromagnétiques. *Revue de l'Electricité et de l'Electronique,* 5, 2012, pp. 44-51.

[3] Procédure pour l'évaluation de l'exposition des travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs aux champs électromagnétiques. Partie 1 : Généralités, EN 50527-1 (2010).

[4] Procédure pour l'évaluation de l'exposition des travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs aux champs électromagnétiques. Partie 2-1 : Spécification d'évaluation pour les travailleurs avec un stimulateur cardiaque, EN 50527-2-1 (2011).

[5] Kourtiche D., Souques M., Magne I. Implants médicaux et champs électromagnétiques basses fréquences 0–100 kHz. *Radioprotection,* 49, 4, 2014, pp. 241-248.

[6] Trigano A., Blandeau O., Souques M. *Clinical study of interference with cardiac pacemakers by a magnetic field at power line frequencies. Journal of the American College of Cardiology,* 45, 6, 2005, pp. 896-900.

[7] Conseil des communautés européennes. Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). *Journal officiel des Communautés européennes,* L199, 30 juillet 1999, 1999, pp. 59-70.

[8] Toivoinen L., Valjus J., Hongisto M., Metso R. *The influence of elevated 50 Hz electric and magnetic fields on implanted cardiac pacemakers: the role of the lead configuration and programming of the sensitivity. Pacing Clin. Electrophysiol.* 14, 12, 1991, pp. 2114-2122.

[9] Champs électromagnétiques, cardiostimulateurs et défibrillateurs. Journée scientifique organisée à Paris le 25 octobre 2002. *Arch. Mal. Coeur Vaiss.* 96, Spécial III, 2003, pp. 1-70.

[10] Magne I., Souques M., Héro M. Quelle conduite tenir après l'implantation d'un défibrillateur cardiaque chez un travailleur exposé aux champs magnétiques ? *Radioprotection,* 42, 2, 2007, pp. 211-218.

[11] Souques M., Magne I., Lambrozo J. *Implantable cardioverter defibrillator (ICD) and 50 Hz magnetic exposure in the workplace. International Archives of Occupationnal & Environmental Health,* 84, 1, 2011, pp. 1-6.

HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL

Découvrez le nouveau site !

Retrouvez gratuitement les principaux articles de la revue HST
pour vous aider à mettre en œuvre **la prévention des risques professionnels** en entreprise.

hst.fr

CHAMPS ELECTROMAGNÉTIQUES

Exposition du travailleur en environnement IRM

Mélina Bouldi INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Cédric Pasquier Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm)

Un dispositif d'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une source de champs électromagnétiques complexes, avec des fréquences diverses allant de 0 Hz à quelques centaines de MHz. Toutes ces composantes fréquentielles peuvent générer des risques multiples pour le travailleur évoluant dans l'enceinte IRM : attraction des métaux environnants, courants induits dans l'organisme, échauffements des tissus… Cet article présente les grandes lignes de la sécurité du travailleur et expose les différentes techniques qui permettent de quantifier l'exposition IRM.

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) est une technique d'imagerie médicale non-invasive, très répandue, visant à obtenir des images en deux ou trois dimensions des organes du patient (Cf. Figure 1). Son fonctionnement est fondé sur l'interaction entre des champs électromagnétiques (EM) produits par différentes bobines et l'intérieur du corps humain. Trois champs entrent en jeu :

- le champ statique, puissant et variant très lentement dans le temps, communément noté B_0. Il est issu d'une bobine supraconductrice[1]. Ce champ provoque l'alignement des *spins*, quantité vectorielle intrinsèque à tous les noyaux des atomes qui composent les cellules, selon la direction B_0. Cet alignement génère une aimantation globale le long du corps du patient ;
- les gradients de champs, notés G, issus de trois bobines entrelacées, permettent de choisir la région du corps et de sélectionner une coupe ou un volume à observer ;
- le champ radiofréquence RF, noté B_1, est produit par une antenne émettrice. Il varie dans le temps de la même façon que le champ B_0. Ce champ s'ajoute au champ statique B_0 et dévie l'aimantation macroscopique initialement créée, suivant un certain angle. Lorsque le champ RF B_1 cesse d'être appliqué, l'énergie acquise par les atomes d'hydrogène constituant les tissus humains est restituée, en fonction de la position dans la coupe étudiée. C'est cette énergie qui est détectée grâce à une autre antenne RF, cette fois-ci réceptrice, et qui produit des images contrastées en fonction de la nature et l'état des tissus.

©INSERM/Latron Patrice

↑FIGURE 1
Dispositif d'imagerie par résonance magnétique.

Les types de travailleurs intervenant en « environnement IRM » sont multiples : manipulateurs en électroradiologie, médecins (radiologues, anesthésistes, chirurgiens, pédiatres…), infirmières, chercheurs, techniciens de maintenance et d'entretien.

L'extension rapide du parc des IRM (plus de 700 en France en 2013 [1]) et de leurs applications ces trente dernières années accroît le nombre de personnes concernées. Parallèlement, la technologie IRM évolue avec l'augmentation du champ statique. Bien que les IRM cliniques restent principalement à 1,5 tesla (T)[2], les centres universitaires s'équipent avec des IRM 3 T et 7 T. Des projets très ambitieux voient le jour en recherche avec des IRM 11,4 T.

Pour bien comprendre les risques liés à la présence de champs élec-

tromagnétiques, il est important de différencier les effets dus à chacune des composantes fréquentielles présentes en environnement IRM.

Le champ statique B_0 est l'une des principales causes d'accidents en IRM. L'évaluation des risques se fait notamment grâce aux normes [2]. Le risque principal (projection d'objets, déplacement d'objets) est dû aux forces de translation exercées sur tous les objets ferromagnétiques[3]. Si ceux-ci se trouvent à proximité de l'entrée de l'IRM, ils se transforment en projectiles inéluctablement attirés vers le centre de l'aimant. De même, les objets métalliques longilignes (pinces, aiguilles…) subissent un couple de rotation les poussant à s'aligner avec la direction de B_0.

Il existe également des effets sensoriels indésirables sous l'action de B_0. Lorsqu'un travailleur se déplace rapidement autour du dispositif IRM, des courants électriques, créés par induction magnétique, peuvent provoquer des vertiges, nausées et une sensation de goût métallique dans la bouche. Ceux-ci sont dus à des interactions avec le système nerveux central [3].

Concernant les gradients de champs G, le champ magnétique produit est variable au cours du temps, avec un contenu fréquentiel pouvant atteindre 5 kHz. Dans ce cas, les risques sont principalement sensoriels, tels que des phosphènes[4] ou des modifications de certaines fonctions cérébrales.

Enfin, le champ RF B_1 a une fréquence d'émission le plus souvent de l'ordre de la centaine de MHz. Dans ce cas, le risque principal est un échauffement des tissus, quantifié par le débit d'absorption spécifique (DAS) en W/kg. La limite de référence est de 2 W/kg pour le corps entier ou 4 W/kg dans le cas d'une exposition rapide inférieure à 10 s [4].

La Commission européenne a commandité un rapport de recherche sur le sujet [5]. Ce travail conséquent et complet a été effectué dans quatre centres hospitalo-universitaires européens pour définir les expositions subies par le travailleur en IRM. Les conclusions de ce rapport sont les suivantes :

- Exposition à B_1 et comparaison aux limites d'exposition VLE[5]
  La limite d'exposition aux ondes RF est atteinte lors des procédures habituelles lorsque qu'un travailleur reste à l'entrée de l'IRM pendant l'acquisition des images. Ces limites sont dépassées pour le travailleur lors des examens interventionnels sous IRM.
- Exposition aux courants induits (G, mouvements dans B_0) et limites d'exposition VLE[5]
  Les limites sont atteintes pour les personnes exposées aux gradients de champ magnétique G lorsqu'un travailleur reste à l'entrée de l'IRM pendant l'acquisition des images. Dans le cadre d'examens interventionnels sous IRM, les valeurs peuvent dépasser de 50 fois la valeur limite. De même, ces valeurs sont jusqu'à 10 fois supérieures aux valeurs limites de la directive lorsque le travailleur se déplace dans le champ magnétique statique. Ce cas se présente, par exemple, lors de l'installation du patient et pour les opérations de maintenance ou d'entretien.

Il est cependant nécessaire de préciser que, dans des conditions normales d'examen clinique, le travailleur est en dehors de la salle IRM lors des acquisitions. Ainsi, seul le champ statique B_0 est à prendre en compte dans l'évaluation des risques et principalement lors de déplacements rapides autour de l'aimant.

QUANTIFIER L'EXPOSITION DU TRAVAILLEUR

Évaluation directe de l'exposition

En IRM, le travailleur est particulièrement exposé au champ statique B_0 (continu, 0 Hz) et aux champs EM de basse fréquence (G, < 5 kHz). L'article 10 de la directive 2013/35/UE recommande d'évaluer cette exposition *via* [3] :

- un système de vidéosurveillance qui enregistre les déplacements et les mouvements du travailleur dans l'IRM ;
- un exposimètre porté par le travailleur, comme c'est déjà le cas pour l'exposition aux rayonnements ionisants.

Concernant la vidéosurveillance, un procédé avait été développé dans l'étude commanditée par le Parlement européen [5]. Cette méthode soulève tout de même des questions d'éthique et de technologie. Le procédé nécessite une identification nominative du personnel, ce qui pourrait entraîner des utilisations détournées du système de surveillance. De même, des difficultés techniques apparaissent lors de la détection, parfois peu robuste, du mouvement du travailleur et lors de l'installation des caméras qui sont sources de perturbations EM pouvant dégrader la qualité de l'image en IRM.

Pour l'exposimètre EM (Cf. Figure 2), ce dernier enregistre les champs électromagnétiques de 0 Hz à 5 kHz. Sachant que les niveaux les plus élevés de courants induits dans le corps sont atteints lors des déplacements du travailleur dans le gradient de champ magnétique statique, c'est principalement une exposition à un champ EM de fréquence très basse,

©Healtis/Pontvianne, Yannick

↑FIGURE 2
Exemple d'exposimètre EM et sa base d'accueil.

de l'ordre du Hz, qui est détectée. De plus, une onde EM est toujours composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. À basse fréquence, seul le champ magnétique de l'onde interagit avec le corps humain par des phénomènes d'induction. Le principe du dosimètre est donc de mesurer les champs magnétiques *via* des technologies usuelles, telle que celle des capteurs type effet Hall[6].

Évaluation indirecte de l'exposition

Comme le préconise la directive 2013/35/UE, des études de poste sont nécessaires pour avoir une idée de l'exposition possible du travailleur [3]. Le déplacement dans l'enceinte IRM est cependant variable d'une acquisition à l'autre: il est alors difficile d'évaluer l'exposition réelle du travailleur et des champs électromagnétiques environnants. Une évaluation indirecte de l'exposition est possible *via* des simulations numériques, validées par des études expérimentales *in vitro*. Ces simulations consistent à modéliser correctement les antennes constituant l'IRM et les champs magnétiques en découlant. Par la suite, un modèle numérique de corps est soumis à ces mêmes champs et une évaluation du respect des VLE peut être réalisée. Cette approche permet de couvrir un large panel de configurations (position du travailleur par rapport à l'IRM, intensité du champ…) et d'évaluer de manière paramétrique les risques pour le travailleur.

Exemple d'utilisation: exposimètre EM

Des mesures sur un manipulateur en radiologie ont été effectuées au sein du Centre hospitalier universitaire de Nancy avec un exposimètre EM (Healtis©). Les résultats ont montré des expositions très variables. Le manipulateur est particulièrement exposé lors de l'installation d'un patient dans la machine. Les résultats ont montré des disparités d'exposition en fonction du type de patient à installer (différents niveaux d'autonomie motrice du patient), du type d'examen pratiqué (nécessité ou non d'installer du matériel de surveillance supplémentaire comme un capteur d'électrocardiogramme ou des antennes spécifiques)… Les courbes présentées dans la figure 3 donnent un exemple de résultats de mesure de champ magnétique lors de l'installation de deux patients. La première courbe montre l'exposition pour une installation sans problème. La durée d'exposition pour l'installation est d'environ 1 minute et le pic maximum de champ magnétique est d'environ 0,5 T. Les secondes mesures ont été faites lors d'une installation plus difficile à la suite de problèmes de branchement de matériel dans le tunnel IRM. La durée d'exposition est alors d'environ 8 minutes avec des pics pouvant atteindre 1,5 T.

En conclusion, l'exposition des travailleurs en IRM est très variable en fonction des activités de celui-ci. Les valeurs atteintes peuvent dépasser largement les VLE préconisées dans la directive. Pour avoir une idée réaliste de l'exposition du travailleur, il est indispensable de mettre en œuvre des moyens de mesures d'exposition quotidienne et des outils d'évaluation paramétrique tels que les simulations numériques.

Cas particuliers des porteurs de dispositifs médicaux implantables

Le vieillissement de la popula-

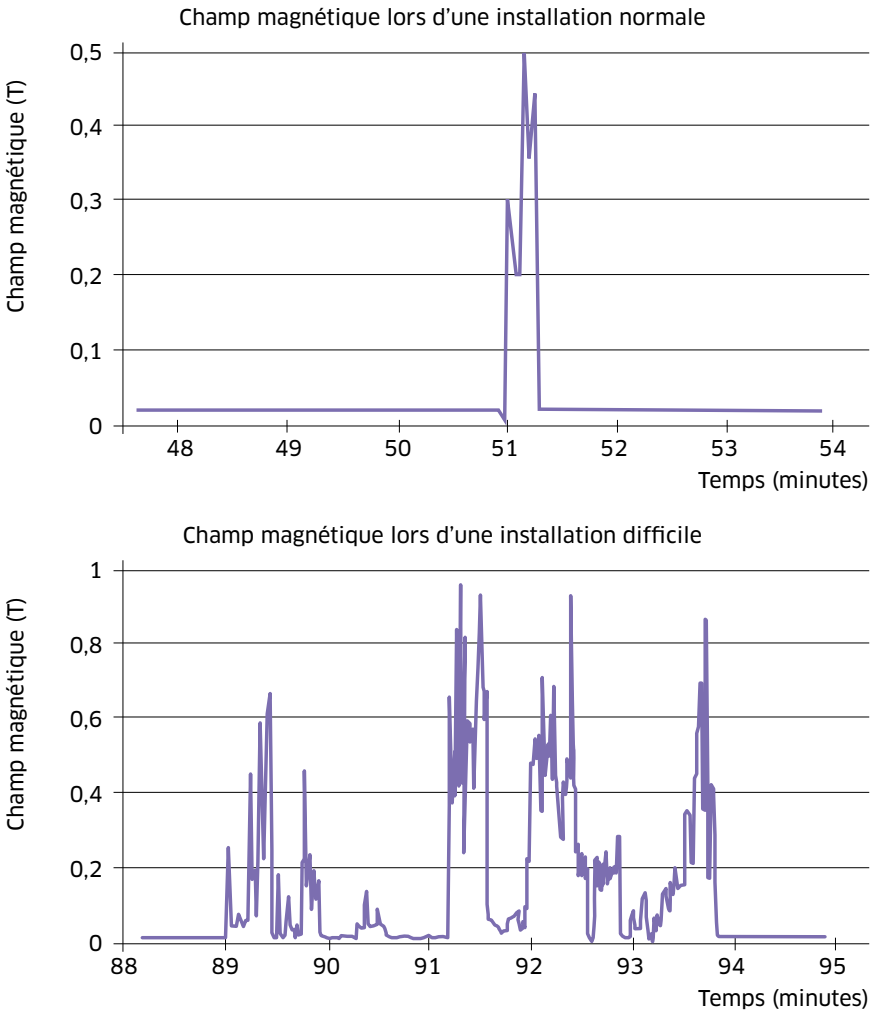


FIGURE 3

Comparaison de l'exposition du manipulateur en radiologie au cours de deux interventions très différentes dans l'enceinte IRM.

tion et les changements de mode de vie des travailleurs entraînent une augmentation des maladies neuro-dégénératives et cardio-vasculaires. Le nombre de porteurs d'implants médicaux croît régulièrement et les travailleurs se trouvant en IRM peuvent évidemment en être. Il existe trois principaux risques lors de l'exposition :

- un couplage entre le champ externe statique B_0 et le dispositif implanté, qui peut générer des torsions et/ou des rotations de l'implant selon la direction de B_0 ;
- des courants induits dans toutes les parties conductrices de l'implant, à la suite de l'exposition à G et B_1 ;
- une élévation de température dans le cas du champ B_1.

On distingue deux catégories d'implants médicaux : les implants passifs, tels que les prothèses, et les implants actifs. Selon la norme ISO/TC 150/SC 6, on considère qu'un implant est actif dès que « *sa source de puissance* […] *est autre que celles générées ou converties par le corps humain ou la gravité* ». Il existe plusieurs types d'implants, visant des zones spécifiques de l'organisme : stimulateurs nerveux, cardiaques et cérébraux ou encore les implants cochléaires… La plupart disposent d'un générateur de courant placé en sous-cutané et de fils d'extension conducteurs isolés, permettant la liaison entre le générateur et le dispositif de stimulation. Ces différentes parties, le plus souvent métalliques, possèdent une électronique interne pouvant être perturbée en présence de champs magnétiques.

L'entrée des travailleurs dans l'enceinte de l'IRM est contrôlée et des symboles rappelant l'interdiction d'accès aux porteurs d'implants actifs sont systématiquement affichés sur les portes. Cependant, il est possible que des objets conducteurs non référencés, tels que des éclats métalliques, certaines encres de tatouage… puisse générer des risques difficiles à quantifier. C'est dans ce cadre que la formation des travailleurs prend tout son sens.

Comment former le personnel aux risques de l'IRM ?

Dans l'article 10 de la directive 2013/35/UE, il est mentionné que les travailleurs en IRM doivent être formés sur les différents risques liés à l'IRM, le contenu de la formation devant être adapté aux différents personnels [3]. Un manipulateur en électroradiologie est amené à travailler quotidiennement dans l'enceinte IRM, contrairement à un électricien intervenant de manière ponctuelle. Les dangers sont cependant les mêmes : la formation doit donc contenir, dans un premier temps, un socle identique concernant les bases physiques de l'IRM, les interactions possibles avec divers matériaux et les dangers inhérents. Dans un second temps, la formation est adaptée aux différents métiers. Au sein d'un établissement de soins, les agents de sécurité sont amenés à intervenir en IRM pour des opérations de secours à la personne ou en cas d'inondation, de départ de feu, etc. Dans ce cas, l'agent doit apprendre quel matériel est autorisé ou non (extincteur, bouteille d'oxygène, défibrillateur…) et où se trouvent les différentes coupures d'énergie et le bouton d'arrêt d'urgence (« *quench* »), permettant l'arrêt immédiat du champ statique. Ces formations en deux temps permettent de recouvrir les nombreuses configurations possibles et d'apprendre aux travailleurs les risques propres à leurs activités spécifiques. ●

1. Dont la résistance électrique est proche de zéro, ce qui limite les pertes par échauffement.

2. Le champ magnétique terrestre déviant la boussole est de l'ordre de 50 µT.

3. Objets métalliques capables de s'aimanter en présence d'un champ magnétique extérieur.

4. Petit signal rétinien produit par le champ au niveau du cortex cérébral.

5. Valeurs limites de la directive 2013/35/UE.

6. Lorsqu'un conducteur sous tension est soumis à un champ magnétique, une tension est générée perpendiculairement à celui-ci : c'est l'effet Hall.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Organisation de coopération et de développement économique – OECD (2015), *Magnetic resonance imaging (MRI) units (indicator).* doi: 10.1787/1a72e7d1-en (Accès le 7 octobre 2015).

[2] ASTM F2052-15, *Standard Test Method for Measurement of Magnetically Induced Displacement Force on Medical Devices in the Magnetic Resonance Environment,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[3] Directive n° 2013/35/UE du 26/06/13 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE).

[4] IEC 60601-1-2:2014, *Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral Standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests.*

[5] Capstick M., McRobbie D. W., Hand J. W., Christ A., Kühn S., Mild K. H., Cabot E., Li Y., Melzer A., Papadaki A., Prüssmann K., Quest R., Rea M., Ryf S., Oberle M., Kuster N. *An Investigation into Occupational Exposure to Electromagnetic Fields for Personnel Working With and Around Medical Magnetic Resonance Imaging Equipment,* European Commission, Project VT/2007/017, 2008.

Sélection bibliographique

Champs électromagnétiques

Dossier web INRS « Champs électromagnétiques »

Consultable sur www.inrs.fr, rubrique Risques.

Brochures INRS

- *Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques,* ED 6136, 2015.
- *Réglementation nuisances physiques, une approche commune,* ED 6128, 2012.
- *Le point des connaissances sur… les champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz),* ED 5004, 2002.

Téléchargeables sur www.inrs.fr

Fiches INRS « Champs électromagnétiques »

- *Téléphones mobiles et stations de base,* ED 4200, 2013.
- *Généralités sur les rayonnements non ionisants jusqu'à 300 GHz,* ED 4201, 2005.
- *Les sources de rayonnements non ionisants (jusqu'à 60 GHZ),* ED 4202, 2004.
- *Les effets des rayonnements non ionisants sur l'homme,* ED 4203, 2005.
- *La réglementation en milieu professionnel, ED 4204,* 2015.
- *Les machines utilisant le chauffage par pertes diélectriques,* ED 4205, 2015.
- *Les stimulateurs cardiaques,* ED 4206, 2004.
- *Les réseaux sans fils de proximité,* ED 4207, 2012.
- *L'imagerie par résonance magnétique,* ED 4209, 2006.
- *Les lignes à haute tension et les transformateurs,* ED 4210, 2008.
- *Le chauffage par induction électromagnétique,* ED 4211, 2012.
- *Les radars,* ED 4212, 2013.
- *Les équipements de chauffage industriels par micro-ondes,* ED 4213, 2014.
- *Champs électromagnétiques : moyens de prévention,* ED 4214, 2014.
- *Les mécanismes d'interaction avec le corps humain,* ED 4215, 2008.
- *Grossesse et champs électromagnétiques,* ED 4216, 2011.
- *La RFID* (radio frequency identification), ED 4217, 2010.
- *Contrôle par magnétoscopie. Démagnétiseurs,* ED 4218, 2014.
- *Soudage par résistance,* ED 4219, 2016.

Téléchargeables sur www.inrs.fr

Guides de bonnes pratiques

- Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE « Champs électromagnétiques » - Volume 1 - Guide pratique, Commission européenne, Direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion, Unité B3, novembre 2014.
- Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE « Champs électromagnétiques » - Volume 2 - Études de cas, Commission européenne, Direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion, Unité B3, novembre 2014.
- Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE « Champs électromagnétiques » - Guide à l'intention des PME, Commission européenne, Direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion, Unité B3, novembre 2014.

Téléchargeables sur http://ec.europa.eu/social/easi

Décret

- Décret n°2016-1074 du 3/08/2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.

Téléchargeable sur www.legifrance.gouv.fr

Rayonnements optiques artificiels

Dossier web INRS « Rayonnements optiques »

Consultable sur www.inrs.fr, rubrique Risques.

Brochures INRS

- *Sensibilisation à l'exposition aux rayonnements optiques artificiels (ROA) sur les lieux de travail,* ED 6113, 2011.
- *Les équipements de protection individuelle des yeux et du visage – Choix et utilisation,* ED 798, 2009.
- *Rayonnements lasers : Principe, application, risque et maîtrise du risque d'exposition,* ED 6071, 2010.
- *Le point des connaissances sur… les lasers,* ED 5009, 2004.

Téléchargeables sur www.inrs.fr

Outils INRS

- Logiciel CatRayon 4 (2011)

Téléchargeable sur www.inrs.fr

Postface

Par Patrice Donati et Michel Jacques
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

L'ambition de ce recueil des actes du colloque « Rayonnements optiques & électromagnétiques au travail » était de faire le point sur les connaissances appliquées en matière de prévention des risques professionnels liés à ces nuisances physiques. Comme tout bilan, ce compte rendu n'est pas exhaustif et laisse de nombreuses interrogations soulevées par les participants à ce colloque.

• • • • •

Les sources de rayonnements optiques artificiels (ROA) sont présentes dans tous les domaines d'activité : verreries, sidérurgie, métallurgie mais également papeterie, agroalimentaire, médecine, spectacle, laboratoires, commerces, bureaux, etc. Sources émergentes, les LED sont utilisées partout, toute la population y est exposée, y compris dans sa vie privée. Les effets des ROA sur la santé sont avérés et connus. Au niveau de l'œil, ils vont des petits coups d'arc (flash de soudage) jusqu'à des lésions irréversibles et, sur la peau, de la petite rougeur jusqu'au cancer. Mais des interrogations persistent, par exemple concernant les effets sur la rétine de l'exposition chronique à de faibles doses de lumière bleue.

La directive européenne 2005/25/CE, transposée en droit français par le décret 2010-750 du 2 juillet 2010, indique les mesures visant à protéger les travailleurs contre les risques sur la santé et la sécurité liés aux ROA. Deux arrêtés du 1er mars 2016 définissent les modalités de l'évaluation de ces risques en milieu de travail et les conditions d'accréditation des organismes procédant aux mesurages des niveaux d'exposition. En complément à la réglementation, il existe des normes sur les sources de ROA et sur les équipements de protection collective ou individuelle. Mais des progrès sont nécessaires pour les compléter : certains protocoles de mesure demandent à être améliorés et des spécifications doivent être définies pour certains équipements de protection individuelle.

Dans bon nombre de situations, les risques peuvent être évalués sans mesure, à partir de documents ou de logiciels spécifiques. Lorsque la métrologie s'impose, les équipements modernes de mesure des ROA permettent de relever instantanément le spectre d'une source, ce qui facilite les interventions sur site et la mesure de sources pulsées, en mouvement ou évolutives. Les Centres de mesures physiques ont présenté un large exposé de situations d'exposition aux rayonnements ultraviolets, visibles et infrarouges rencontrées sur le terrain. Ils ont montré que la protection pouvait aussi passer par des solutions très simples. Les lasers, largement répandus dans l'industrie, les laboratoires et les milieux médicaux font l'objet d'un étiquetage obligatoire de leur classe de risque. Les utilisateurs doivent cependant être informés, et surtout formés, aux dangers qu'ils peuvent présenter.

Ce colloque a également permis de mettre l'accent sur des préoccupations d'actualité comme les risques potentiels dus à l'exposition aux LED, tant lors de leur utilisation qu'au moment de leur fabrication. Il faudra également se préoccuper des rayonnements optiques naturels, auxquels sont exposés, par exemple, une grande partie des salariés dans le BTP, ainsi qu'aux effets conjugués de l'exposition aux rayonnements optiques avec celle à des produits photosensibilisants. Il reste encore beaucoup à faire pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles dus aux rayonnements optiques.

Concernant les champs électromagnétiques, la directive européenne sur la prévention de l'exposition professionnelle à ces rayonnements a été transposée en droit français le 3 août 2016. Elle définit des valeurs limites à ne pas dépasser dans le corps des opérateurs et des valeurs d'action mesurables à proximité des personnes et au-delà desquelles des actions de prévention sont à mettre en œuvre pour réduire les valeurs des champs. Mais la multitude de toutes ces valeurs limites rend leur application complexe. Les attentes vis-à-vis du législateur étaient fortes pour effectuer certaines simplifications. Les experts nous ont confirmé qu'en l'état des connaissances, aucune pathologie liée à une exposition aux champs électromagnétiques n'a été constatée à ce jour si les valeurs limites étaient respectées. En revanche, si de nombreux effets immédiats, directs ou indirects, sont avérés, ils ne doivent pas occulter le cas des personnes dites hypersensibles aux champs électromagnétiques. Les médecins du travail insistent sur le fait que les souffrances de ces personnes sont réelles, même si aucun lien ne peut être mis en évidence entre les troubles évoqués et une exposition aux champs électromagnétiques.

Les sources de champs électromagnétiques en milieu professionnel sont nombreuses et elles seront de plus en plus répandues car les technologies qui les emploient se multiplient. En milieu industriel, les expositions dépassent les valeurs d'action dès qu'on se trouve à proximité de machines puissantes. Pour aider les utilisateurs à acheter des machines qui émettent moins de rayonnements, il faudrait que les fabricants déclarent les valeurs de champs émis comme cela se fait pour d'autres nuisances conformément à la directive « Machines ».

Un point important concerne la réglementation qui n'exige pas de mesurer les niveaux de champs électromagnétiques, mais de les évaluer afin de déterminer les expositions à risques. Des guides et des outils d'évaluation accessibles sur le web (comme Oseray et Wise) sont développés pour simplifier l'évaluation. La mesure, en revanche, nécessite une expertise. Elle est incontournable sur les postes de travail où sont relevés des niveaux d'exposition supérieurs aux valeurs d'action, car elle permet de vérifier l'efficacité des actions de prévention mises en œuvre.

Les études de cas présentées ici montrent les différentes possibilités pour réduire l'exposition. Si l'on ne doit retenir qu'une seule solution de prévention, c'est l'éloignement de la source, souvent facile à mettre en œuvre et parfois peu coûteux. Mais il existe d'autres techniques, telles que le blindage qui permet d'atténuer le champ ou la réduction à la source. Ce type de prévention est l'affaire de spécialistes. Sur le terrain, la prévention, même technique, nécessite un suivi de sa maintenance et surtout la sensibilisation des opérateurs. De plus, comment convaincre les personnes qui travaillent depuis des années avec une machine sans éprouver la nécessité de se protéger et sans avoir conscience qu'il est indispensable de bien remonter les boulons du blindage lors de la maintenance de la machine ?

« Si l'on ne doit retenir qu'une seule solution de prévention, c'est l'éloignement de la source. »

De plus en plus de travailleurs vieillissants sont équipés d'implants médicaux. Ces salariés sont classés à risque du fait de l'interaction possible entre les champs électromagnétiques et le fonctionnement de leur implant. Le risque peut être réel. Il est préconisé par la directive de respecter les valeurs grand public pour les travailleurs à risque, en particulier pour les femmes enceintes. Des normes ont été rédigées définissant une procédure pour vérifier l'acceptabilité d'une exposition pour ces personnes à risques. Elles indiquent aussi des listes de sources susceptibles de créer un risque. Certains préconisent de réaliser, sous suivi médical, des tests d'exposition des personnes porteuses d'implants médicaux à des niveaux de champs électromagnétiques importants. Ce type d'essais de terrain n'est jamais facile à réaliser car il exige la présence de spécialistes médicaux. L'idéal serait d'avoir des listes de situations sûres et des listes de matériels qui peuvent poser problème selon les types d'implants. La sensibilisation des fabricants d'implants à ce problème, comme c'est déjà le cas pour ceux qui construisent les pacemakers, devrait aboutir à une génération d'implants actifs mieux blindés.

• • • • •

Bien entendu, pour simplifier la tâche des acteurs de la prévention, l'INRS et les Carsat vont poursuivre la rédaction de documents de sensibilisation, d'information et de vulgarisation et la conception d'outils simplifiés pour estimer les risques liés à l'exposition aux rayonnements. ●

LISTE DES AUTEURS

Auger Yann, Centre national de la recherche scientifique (aujourd'hui à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales), *page 74*
Barlier-Salsi Annick, INRS, *pages 55 et 112*
Becker Alain, Centre interrégional de mesures physiques de l'Est, Carsat Nord-Est, *page 129*
Becker Thierry, Carsat Nord-Picardie, *page 117*
Bouldi Mélina, INRS, *page 152*
Boulenguez Pierre, Centre scientifique et technique du bâtiment, *page 28*
Brunet Séverine, INRS, *page 3*
Carré Samuel, Centre scientifique et technique du bâtiment, *page 28*
Cesarini Jean-Pierre, Société française de radioprotection, *page 13*
Chahory Sabine, École nationale vétérinaire d'Alfort, *page 28*
Delemontez Jérôme, EDF, *page 133*
Demaret Philippe, INRS, *pages 32 et 94*
Demol Thierry, CITC-EuraRFID, *page 98*
Démoulin Bernard, Université Lille 1, groupe TELICE-IEMN, CNRS UMR 8520, *page 37*
Deniel Jean-Marc, INRS, *page 50*
Donati Patrice, INRS, *page 158*
Dubard Jimmy, Laboratoire national de métrologie et d'essais, *page 24*
Dufaÿ Émilie, Direction générale du travail, *page 20*
Enderlin Stéphanie, Association interprofessionnelle des centres médicaux et sociaux de Suresnes, *page 90*
Enouf Olivier, Laboratoire national de métrologie et d'essais, *page 24*
Fortuné Josselin, Centre interrégional de contrôles physiques, Carsat Centre – Val de Loire, *page 137*
Freis Sébastien, Association interprofessionnelle des centres médicaux et sociaux de Suresnes, *page 90*
Gaillot Davy, Université de Lille 1, IEMN, *page 98*
Gheysels André, Hôpital Alost Asz, *page 98*
Jaadane Imène, Institut national de la santé et de la recherche médicale, *page 28*
Jacques Michel, INRS, *pages 64 et 158*
Lainet Éric, Centre de mesures physiques, Cramif, *page 123*
Lambrozo Jacques, EDF, *pages 102 et 146*
Le Berre Guy, Centre interrégional de mesures physiques de l'Ouest, Carsat Bretagne, *page 80*
Lienard Martine, Université de Lille 1, IEMN, *page 98*
Lolliot Stéphanie, Centre de formation optique et laser Pyla, *page 126*
Magne Isabelle, EDF, *pages 86, 102, 133 et 146*
Marchal Patrice, INRS, *page 69*
Marteau Emmanuel, Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France, *page 141*
Martens Luc, Université de Gand – i Minds, *page 98*
Martinsons Christophe, Centre scientifique et technique du bâtiment, *page 28*
Mathieu Peggy, Direction générale du travail, *page 41*
Morin Samuel, Carsat Bretagne, *page 8*
Moureaux Patrick, INRS, *page 41*
Ngo Hoang, Association interprofessionnelle des centres médicaux et sociaux de Suresnes, *page 90*
Nicolas Emmanuel, Bureau Veritas, *page 77*
Pasquier Cédric, Institut national de la santé et de la recherche médicale, *page 152*
Petitfour Rémi, Association interprofessionnelle des centres médicaux et sociaux de Suresnes, *page 90*
Point Sébastien, Société française de radioprotection, *page 60*
Ruillard Céline, Carsat Centre – Val de Loire, *page 120*
Sabri Allal, Association interprofessionnelle des centres médicaux et sociaux de Suresnes, *page 90*
Souques Martine, EDF, *pages 102 et 146*
Speeg-Schatz Claude, Hôpitaux universitaires de Strasbourg, *page 16*
Tanghe Emmeric, Université de Gand – i Minds, *page 98*
Tirlemont Stéphane, Centre interrégional de mesures physiques Nord-Picardie, Carsat Nord-Picardie, *page 107*
Torriglia Alicia, Institut national de la santé et de la recherche médicale, *page 28*
Van Den Bossche Matthias, Université de Gand – i Minds, *page 98*
Vanhecke Kris, Université de Gand – i Minds, *page 98*
Verloock Leen, Université de Gand – i Minds, *page 98*
Wout Joseph, Université de Gand – i Minds, *page 98*

HYGIÈNE ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL (HST),
publication éditée par l'INRS, Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

65, boulevard Richard-Lenoir
75011 Paris - France
Tél.: 01 40 44 30 00
Fax: 01 40 44 31 99
Dépôt légal décembre 2016
n°185836
ISSN 00007-9952
www.hst.fr - www.inrs.fr

INRS service abonnements
Com & Com
Bâtiment Copernic
20, avenue Édouard-Herriot
92 350 Le Plessis-Robinson
Tél.: 01 40 94 22 22
inrs@cometcom.fr

Prix au numéro: 20,40 €
Tarifs abonnement pour 1 an/4 numéros:
France: 72 €
DOM: 78 €
TOM et Europe: 84 €
Reste du monde: 90 €

Maquette, infographies
Sophie Boulet

Photogravure
Jouve

Impression
Corlet Imprimeur
14110 Condé-sur-Noireau
France

L'autorisation de reproduire totalement ou partiellement des articles parus dans Hygiène et sécurité du travail (HST) doit être sollicitée à l'avance et par écrit. Toute reproduction, quel qu'en soit le support (à l'exception des copies à usage interne), qui n'aurait pas été précédée d'un accord préalable, serait effectuée en violation des droits de l'éditeur.

PEFC 10-31-1510

IMPRIM'VERT®

www.hst.fr