

ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS OPTIQUES DANS LES LOCAUX DE TRAVAIL ET DÉTERMINATION DES MOYENS DE PROTECTION AVEC CATRAYON 3

- Rayonnement optique
- Logiciel
- Mesure de prévention

► *Annick BARLIER-SALSI, Serge SALSI, INRS, département Ingénierie des équipements de travail*

ASSESSMENT OF OPTICAL RADIATION EXPOSURE IN WORKPLACES AND DETERMINATION OF PROTECTION MEANS USING CATRAYON 3

Employees are frequently exposed at their workplace to several sources of optical radiation with different characteristics. A first version of the CatRayon computer programme enabled the risks created by a workstation radiation source to be assessed in a user-defined configuration. A new CatRayon 3 version has been developed and takes into account several radiation sources, fixed and moving workstations and, more generally, the activity of persons present in working areas. A database containing around a hundred protective filters now complements the 400-source database. CatRayon allows a choice of personal or collective protective equipment either by selecting it directly from the database or based on a list of filters effective for the problem concerned, which are determined automatically by the computer programme. A laboratory-verified computation model was therefore developed to assess exposures at workstations and in working areas, and to determine protective filter efficiency.

- Optical radiation
- Computer programme
- Prevention measure

Dans les locaux de travail, les salariés sont couramment exposés à plusieurs sources de rayonnement optique de caractéristiques différentes. Un premier logiciel, CatRayon, permettait d'évaluer les risques présentés par une source à un poste de travail dans une configuration définie par l'utilisateur. Une nouvelle version, CatRayon 3, a été développée et prend désormais en compte plusieurs sources, plusieurs postes de travail fixes et mobiles et, plus largement, l'activité des personnes dans des zones de travail. La base de données de 400 sources a été complétée par une base de données d'une centaine de filtres de protection. Ainsi, CatRayon 3 permet de choisir des équipements de protection individuelle ou collective soit en les sélectionnant directement dans la base de données, soit sur la base d'une liste de filtres efficaces pour le problème posé, déterminés automatiquement par le logiciel.

Un modèle de calcul, vérifié en laboratoire, a donc été développé pour évaluer les expositions aux postes et dans les zones de travail ainsi que pour déterminer l'efficacité des filtres de protection.

De nombreux procédés industriels, comme le soudage à l'arc, la fusion de l'acier ou du verre, émettent des rayonnements optiques parasites souvent insoupçonnés par les utilisateurs. Par ailleurs, certains de ces procédés utilisent les caractéristiques du rayonnement optique et mettent en œuvre des sources spécifiques émettant principalement un rayonnement dans les domaines ultraviolet ou infrarouge. Ainsi, les effets photochimique, germicide, fluorescent... du rayonnement ultraviolet sont utilisés pour la polymérisation des colles et vernis, le séchage des encres d'imprimerie, la stérilisation, les contrôles qualité... Dans tous les cas, le rayonnement émis par ces sources est susceptible de présenter des risques. Les effets cutanés et oculaires qu'il induit, sont rarement perçus instantanément et souvent difficilement appréciés à leur juste niveau par les personnes qui y sont exposées.

CatRayon a donc été développé dans le but de mettre à la disposition des utilisateurs et des responsables de pré-

vention, un ensemble de données générales et techniques relatives aux sources de rayonnement optique. Son principal objectif est de permettre aux utilisateurs de connaître les risques inhérents à l'exposition à des sources de rayonnement optique dans des conditions d'utilisation qu'ils peuvent définir.

Une première version de CatRayon [1, 2], incluant une base de données d'environ 400 sources, permettait de quantifier les risques présentés par une seule source à un poste de travail. L'évaluation de ces risques était basée sur les limites d'exposition proposées par l'ICNIRP¹[3, 4] et les expositions étaient déterminées en considérant les sources comme parfaitement diffusées [5].

Cette nouvelle version 3 de CatRayon [6], permet désormais de calculer les expositions collectives et individuelles à des sources diverses : ponctuelles, étendues, diffusées ou non diffusées, en tenant compte de leur forme et de leur directi-

¹ *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.*

tivité. Le risque collectif est caractérisé par l'évaluation de l'exposition dans des zones de travail rectangulaires, horizontales et quadrillées selon un maillage régulier. Le risque individuel est quantifié pour des postes de travail fixes et/ou des postes de travail mobiles.

La détermination des expositions collectives et individuelles conduit à proposer des protections adaptées à chacune d'elles. La protection collective est assurée en traitant, à l'aide de filtres de protection, chaque source selon les risques qu'elle engendre, de manière à assurer la protection de l'ensemble des opérateurs intervenant dans une zone de travail. En revanche, la protection individuelle consiste à rechercher les filtres capables de protéger un opérateur des risques dus à l'ensemble des sources présentes dans le local de travail. Ainsi, la base de donnée de 400 sources, issue de la version 1, est complétée par une base de données d'une centaine de filtres de protection.

CatRayon 3 permet donc :

- d'évaluer l'exposition à des postes de travail fixes ou mobiles,
- de réaliser une cartographie des risques dans une zone de travail déterminée,
- de définir ou de proposer des protections collectives et individuelles efficaces,
- d'éditer un rapport d'analyse consignant l'ensemble des résultats.

Cet article décrit les principaux éléments qui constituent le modèle de calcul élaboré pour évaluer les niveaux d'exposition et déterminer les filtres de protection adaptés, ainsi que les résultats de la vérification expérimentale de ce modèle en laboratoire. Il donne enfin une description des différentes fonctionnalités de CatRayon 3.

MÉTHODOLOGIE

MÉTHODE D'ÉVALUATION DES RISQUES

Les effets nocifs du rayonnement optique concernent les yeux et la peau. Ils dépendent essentiellement de la longueur d'onde, de l'intensité du rayonnement et de la durée d'exposition. Sur

la peau, ils vont du simple érythème jusqu'à des lésions plus importantes (lésions cancéreuses). Sur l'œil, les effets directs immédiats se traduisent, selon le domaine spectral du rayonnement, par des lésions de la cornée, de la conjonctive, voire de la rétine. A long terme, l'exposition chronique peut aussi entraîner une opacification du cristallin (cataracte) [6].

Limites d'exposition et grandeurs calculées

Les risques sont évalués en comparant les expositions dans chaque domaine spectral aux limites d'exposition proposées par l'ICNIRP² [3, 4]. Selon les domaines, ces grandeurs sont exprimées en termes d'exposition (H), d'éclairement (E) ou de luminance (L) énergétiques (cf. *Annexe A* et [9]). Elles dépendent des conditions d'exposition, telles que la distance d'exposition, l'angle d'observation, l'orientation de la source, la durée d'exposition, ainsi que des caractéristiques des sources : répartition spectrale, puissance, directivité... Le modèle de calcul développé dans CatRayon 3 consiste donc à déterminer ces grandeurs dans chaque domaine spectral en prenant en compte les différents paramètres énoncés ci-dessus.

Remarque : les limites d'exposition proposées par l'ICNIRP [3, 4] sont intégralement reprises dans la nouvelle directive européenne 2006/25/CE [7] relative à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux rayonnements optiques artificiels.

Indice de risque

Afin de mettre en évidence et de quantifier les risques associés aux sources de rayonnement optique, chaque Grandeur $\lambda_1\lambda_2$ calculée entre λ_1 et λ_2 nm est comparée à la limite d'exposition ($LE_{\lambda_1\lambda_2}$) correspondante. Pour ce faire, dans chaque domaine spectral $\lambda_1\lambda_2$, un indice de risque $Ind_{\lambda_1\lambda_2}$ a été défini comme suit :

$$Ind_{\lambda_1\lambda_2} = \frac{\text{Grandeur}_{\lambda_1\lambda_2}}{LE_{\lambda_1\lambda_2}}$$

Ainsi un indice de risque supérieur à 1 signifie qu'il existe un risque dans le domaine spectral considéré.

MODÈLE DE CALCUL

Dans l'évaluation des risques associés à différentes situations de travail, il est nécessaire de calculer, en divers points d'un local, l'exposition à des sources de natures, de formes et de directivités différentes. Pour ce faire, les sources et les postes de travail sont repérés dans un système de coordonnées à trois dimensions.

Comme les risques concernent à la fois les yeux et la peau, il convient de distinguer deux types de récepteurs :

- l'un plan, dont la normale coïncide avec l'axe de vision d'un observateur, pour déterminer les risques oculaires,
- l'autre volumique (3D) - pour estimer les risques cutanés - prend en compte le rayonnement émis dans tout l'espace, pour en déduire la direction dans laquelle le risque est maximal.

Ces deux types de récepteurs sont disposés :

- soit en un seul point récepteur représentant un poste de travail fixe, soit en une succession de points récepteurs coïncidant avec le trajet suivi par un opérateur se déplaçant dans un local de travail (appelé poste de travail mobile) ;
- soit en un réseau de points récepteurs répartis selon un maillage régulier délimitant une zone de travail. L'éclairement et la luminance au niveau du récepteur sont déterminés en prenant en considération la directivité et la forme de la source ; ce qui conduit à calculer un facteur de configuration pour chaque couple source-récepteur [8].

Lors de l'évaluation des risques, un coefficient de contribution aux risques dans chaque domaine spectral est affecté à chacune des sources attachées à une zone de travail. Ce coefficient est utilisé pour hiérarchiser les sources en termes de risque et ainsi traiter en priorité les sources qui présentent un risque majeur. Le traitement des sources et/ou des postes de travail est réalisé en recherchant, à l'aide d'une méthode itérative, les filtres de protection qui permettent de ramener les grandeurs calculées dans chaque domaine spectral en dessous des limites d'exposition (LE).

² International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

Tous les calculs d'exposition sont basés sur les composantes directes du rayonnement, les réflexions sur les parois du local ne sont pas prises en compte.

Ce modèle de calcul, dont les principaux éléments sont repris ci-après, est décrit en détail dans la Note Scientifique et Technique 265 [9].

Repère de référence

Les positions des sources et des différents récepteurs dans le local sont repérées par des points et leurs orientations dans l'espace par des vecteurs. Ces points et ces vecteurs sont définis par leurs coordonnées dans un système d'axes rectangulaire XYZ considéré comme repère de référence.

Détermination de l'éclairement produit par une source au centre d'une surface réceptrice ds' .

L'éclairement, produit par une source étendue de forme complexe, est calculé en décomposant celle-ci en surfaces de géométries simples. Chaque surface de géométrie simple est ensuite discrétisée en éléments de surface ds d'aire a_i [8].

Une source ponctuelle est traitée comme un élément de surface unique ds d'aire a_i .

Trois cas peuvent se présenter selon la nature de la source : diffuse, non diffuse ou omnidirectionnelle.

Sources non diffuses

L'éclairement dE au centre d'une surface réceptrice ds' , produit par un élément de surface ds (cf. figures 1 et 2) d'une source non diffuse a pour expression [10] :

$$dE = \frac{dl(C_i, \gamma_i) \cdot \cos(\beta_i)}{D_i^2}$$

avec $dl(C_i, \gamma_i)$: intensité produite par l'élément de surface ds .

Les sources étant supposées homogènes, alors :

$$dl(C_i, \gamma_i) = I(C_i, \gamma_i) \cdot \frac{a_i}{A}$$

avec :

A : aire de la source S ,

a_i : aire de l'élément de surface ds ,

$I(C_i, \gamma_i)$: intensité de la source dans la direction (C_i, γ_i) , définie dans le système de référence CIE [11] (cf. Figure 2).

En posant $K(C_i, \gamma_i) = \frac{I(C_i, \gamma_i)}{I_N}$,

l'éclairement E produit par une source d'aire A a alors pour expression :

$$E = \frac{I_N}{A} \sum_i K(C_i, \gamma_i) \cdot \cos \beta_i \cdot \frac{a_i}{D_i^2}$$

ou $E = \frac{I_N \cdot F_c}{A}$

avec :

I_N : intensité dans la direction normale à la surface de la source,

$K(C_i, \gamma_i)$: intensité relative de la source dans la direction C_i, γ_i ,

F_c : facteur de configuration source-surface réceptrice.

Remarque : Les courbes de répartition d'intensité d'une source sont données avec des pas en C et γ variables selon les constructeurs, et, dans un grand nombre de cas, uniquement pour les 4 demi-plans $C = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ et 270° . À partir des répartitions dans les plans C connues, l'intensité $I(C, \gamma)$ dans une direction quelconque est alors obtenue par interpolation linéaire [9].

Sources diffuses

Dans le cas d'une source diffuse l'intensité a pour expression :

$$I(C, \gamma) = I_N \cdot \cos(\gamma) \quad \forall C$$

Ainsi, l'éclairement produit par une source diffuse s'écrit :

$$E = \frac{I_N}{A} \sum_i \cos(\gamma_i) \cdot \cos \beta_i \cdot \frac{a_i}{D_i^2}$$

FIGURE 1

Éclairement produit par une source étendue
Irradiance produced by an extended source

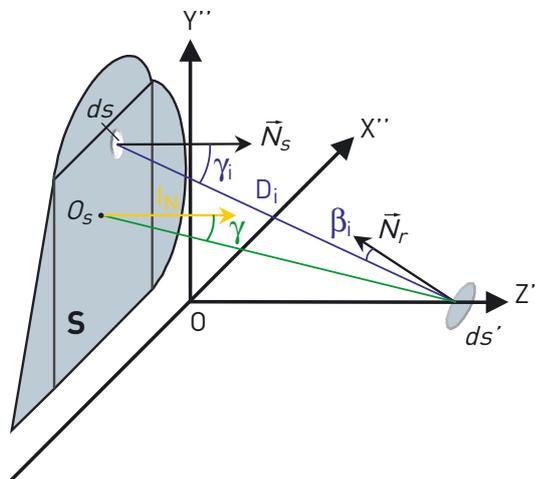
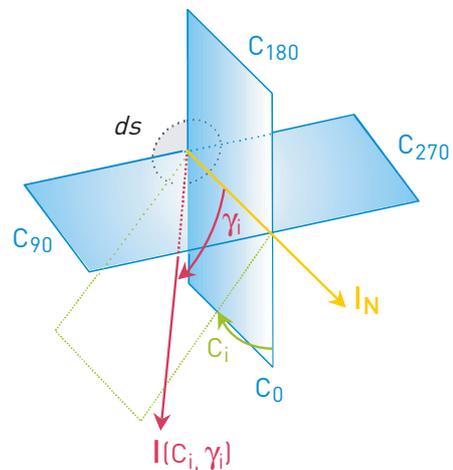


FIGURE 2

Système de référence CIE [11]
CIE [11] reference system



Sources omnidirectionnelles

Une source omnidirectionnelle a une intensité $I(C, \gamma) = I_N$ quelque que soit la direction d'émission. Ainsi, l'éclairement qu'elle produit s'écrit :

$$E = \frac{I_N}{A} \sum_i \cos \beta_i \cdot \frac{a_i}{D^2_i}$$

Détermination de l'éclairement dans une configuration quelconque à partir de l'éclairement dans la configuration de référence (configuration de mesure)

Si E_{ref} est l'éclairement énergétique déterminé dans la configuration de référence (configuration de mesure) et $F_{C_{ref}}$ le facteur de configuration correspondant, alors l'éclairement énergétique E dans une configuration quelconque (de facteur de configuration F_C) peut être calculé comme suit :

$$E = E_{ref} \frac{F_C}{F_{C_{ref}}}$$

Changements de repère

Dans les relations précédentes, l'éclairement est déterminé dans un repère source-surface réceptrice $X''Y''Z''$ (cf. Figure 1), alors que les coordonnées des sources et des récepteurs sont définies dans le repère du local. Par conséquent, préalablement à tout calcul d'éclairement, il est nécessaire de procéder à 2 changements de repère. Un premier changement, du repère de référence XYZ vers le repère $X'Y'Z'$, par rotation autour des axes de référence ; un second, du repère $X'Y'Z'$ vers le repère $X''Y''Z''$, par translation de l'origine.

Le repère $X'Y'Z'$ est obtenu par rotation autour de chacun des axes X, Y et Z du repère de référence, de telle sorte que le plan $X'Y'$ soit parallèle au plan de la source. Le changement de repère s'effectue comme suit :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = M_{ref \rightarrow S} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

avec :

x', y', z' : coordonnées d'un point exprimées dans le repère $X'Y'Z'$,

x, y, z : coordonnées d'un point exprimées dans le repère de référence.

$M_{ref \rightarrow S}$ désigne la matrice de changement du repère de référence XYZ vers

le repère de la source $X'Y'Z'$. Elle est déterminé comme suit :

$$M_{ref \rightarrow S} = M_{R_x} \cdot M_{R_y} \cdot M_{R_z}$$

avec :

$M_{R_x}, M_{R_y}, M_{R_z}$ les matrices de changement de repère par rotation autour des axes X, Y et Z où R_x, R_y, R_z désignent respectivement les angles de rotation autour des axes X, Y et Z.

Le repère $X''Y''Z''$ est obtenu par translation de l'origine du repère $X'Y'Z'$ de manière à ce que le plan $X''Y''$ coïncide avec le plan de la source et que la surface réceptrice ds' se déplace sur l'axe OZ'' .

Éclairement produit par l'ensemble des sources présentes dans le local

L'éclairement reçu par le centre d'une surface réceptrice ds' et produit par les sources $S_1, S_2 \dots S_n$ est égal à la somme des éclairements $E_1, E_2 \dots E_n$ produits par chacune d'elles.

Luminance dans une direction donnée

Les sources étant supposées homogènes, la luminance $L(C, \gamma)$ d'une source d'aire A , dans la direction (C, γ) d'une surface réceptrice a pour expression (cf. Figure 1) :

$$L(C, \gamma) = \frac{I_N}{A} \cdot \frac{K(C, \gamma)}{\cos(\gamma)}$$

pour $-60^\circ < \gamma < +60^\circ$

$$\text{avec : } K(C, \gamma) = \frac{I(C, \gamma)}{I_N}$$

et I_N : Intensité dans la direction normale à la surface de la source,

$I(C, \gamma)$: Intensité dans la direction C, γ .

Le champ visuel d'un observateur étant de l'ordre de 120° , la source est prise en considération dans les calculs de luminance si l'angle formé par la direction d'émission de cette source et la normale à la surface réceptrice est compris entre -60° et $+60^\circ$.

Si $L_{ref}(C_{ref}, \gamma_{ref})$ est la luminance énergétique dans la direction (C_{ref}, γ_{ref}) de référence, alors la luminance énergétique $L(C, \gamma)$ dans une direction quelconque (C, γ) a pour expression :

$$L(C, \gamma) = L_{ref} \frac{K(C, \gamma)}{\cos \gamma} \frac{\cos \gamma_{ref}}{K(C_{ref}, \gamma_{ref})}$$

Si plusieurs sources sont présentes dans l'intervalle angulaire $-60^\circ + 60^\circ$ encadrant la normale à la surface réceptrice, c'est la valeur maximale des luminances calculées en direction de chaque source qui est retenue.

RÉCEPTEURS

Surfaces réceptrices

Les risques se rapportant à l'œil sont évalués à l'aide de surfaces réceptrices planes infiniment petites disposées au niveau des yeux d'un observateur. La normale \vec{N}_r à la surface est orientée dans la direction de son regard. Les indices de risques sont caractérisés par des vecteurs $\vec{I}nd_{\lambda_1\lambda_2}, \vec{I}nd_{\lambda_3\lambda_4} \dots \vec{I}nd_{\lambda_n\lambda_m}$ dont les directions sont celles du vecteur \vec{N}_r et dont les modules sont égaux à la valeur des indices de risque calculés, pour une durée d'exposition t , dans chacun des domaines spectraux listés dans l'Annexe A.

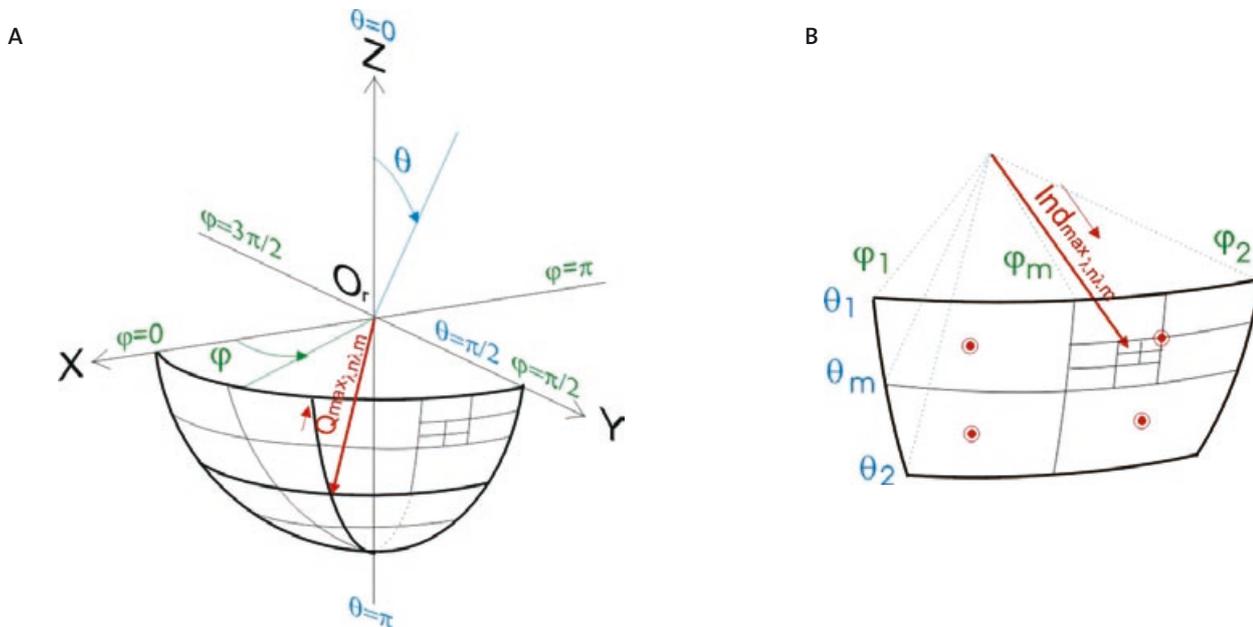
Récepteurs volumiques 3D

Les grandeurs se rapportant aux risques cutanés sont calculées à partir de récepteurs 3D. Les données fournies par ce type de récepteur sont également utilisées pour orienter les surfaces réceptrices dans la direction du risque maximal lors de l'évaluation de l'efficacité des équipements de protection.

Un récepteur volumique 3D est caractérisé par des vecteurs indice de risque $\vec{I}nd_{MAX\lambda_1\lambda_2}, \vec{I}nd_{MAX\lambda_3\lambda_4} \dots \vec{I}nd_{MAX\lambda_n\lambda_m}$ dont les directions sont celles du risque maximal dans le domaine spectral concerné $(\lambda_1\lambda_2, \lambda_3\lambda_4 \dots \lambda_n\lambda_m)$ et dont les modules sont égaux à la valeur des indices de risque correspondants.

FIGURE 3

Détermination de la direction du risque maximal Determination of maximum risk direction



La recherche de la direction du risque maximal s'effectue en deux temps. La première étape consiste à identifier, parmi les huit quadrants formés par les axes XYZ (cf. Figure 3a), le quadrant dans lequel le risque est maximal. Si les vecteurs $\bar{Q}_{\lambda n \lambda m}$, repérés par leurs coordonnées polaires, représentent les vecteurs indices de risque déterminés au centre de chacun des quadrants, le vecteur $\bar{Q}_{\max \lambda n \lambda m}$, identifiant le quadrant dans lequel le risque est maximal, s'exprime comme suit :

$$\bar{Q}_{\max \lambda n \lambda m}(\theta, \varphi) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right) \right|, \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \right) \right|, \\ \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4} \right) \right|, \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right) \right|, \\ \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{3\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right) \right|, \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \right) \right|, \\ \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4} \right) \right|, \left| \bar{Q}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right) \right| \end{array} \right\}$$

Dans un second temps, la direction du risque maximal est recherchée dans le quadrant identifié. Cette recherche est réalisée à l'aide d'une méthode récursive de type « Quadtree », qui consiste à découper successivement la zone de risque identifiée en quatre zones. Si les vecteurs $\bar{Ind}_{\lambda n \lambda m}$ représentent les vecteurs indices de risque dirigés vers

le centre de chacune des quatre zones (cf. Figure 3b), le vecteur $\bar{Ind}_{\max \lambda n \lambda m}$, permettant d'identifier la zone dans laquelle le risque est maximal, est déterminé comme suit :

$$\bar{Ind}_{\max \lambda n \lambda m}(\theta, \varphi) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \left| \bar{Ind}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\theta_1 + \theta_m}{2}, \frac{\varphi_1 + \varphi_m}{2} \right) \right|, \\ \left| \bar{Ind}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\theta_1 + \theta_m}{2}, \frac{\varphi_m + \varphi_2}{2} \right) \right|, \\ \left| \bar{Ind}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\theta_m + \theta_2}{2}, \frac{\varphi_1 + \varphi_m}{2} \right) \right|, \\ \left| \bar{Ind}_{\lambda n \lambda m} \left(\frac{\theta_m + \theta_2}{2}, \frac{\varphi_m + \varphi_2}{2} \right) \right| \end{array} \right\}$$

la fonction récursive s'arrête lorsque :

$$\varphi_2 - \varphi_1 < \frac{\pi}{180} \quad \text{ou} \quad \theta_2 - \theta_1 < \frac{\pi}{180}$$

Point récepteur

Un point récepteur est composé d'une surface réceptrice orientée en fonction de la direction d'observation et d'un récepteur volumique 3D, centrés sur ce point. Tous les calculs d'exposition décrit précédemment sont effectués au niveau de ce point.

POSTES ET ZONES DE TRAVAIL

Dans CatRayon 3, les conditions d'exposition des personnes aux sources de rayonnements dans le local sont traitées au travers de trois configurations : les postes de travail fixes, les postes de travail mobiles et les zones de travail. Un poste ou zone de travail est défini à l'aide d'un ou plusieurs points récepteurs repérés dans le système de référence du local.

Un poste de travail fixe est composé d'un seul point récepteur.

Un poste de travail mobile est constitué d'une succession de points récepteurs. À chaque point récepteur correspond une durée d'exposition journalière. Par ailleurs, un indice de risque global $I_{\text{global}}_{\lambda n \lambda m}$ relatif à l'exposition sur les M points du parcours est calculé dans chaque domaine spectral compris entre λ_n et λ_m à partir des indices de risques ponctuels, $Ind_{\lambda n \lambda m}(1)$, $Ind_{\lambda n \lambda m}(2)$, ..., $Ind_{\lambda n \lambda m}(M)$. La méthode de calcul de $I_{\text{global}}_{\lambda n \lambda m}$ diffère selon la grandeur énergétique utilisée (cf. Annexe A).

Pour les grandeurs exprimées en exposition énergétique H ou en éclairement énergétique E sans limitation de la durée d'exposition journalière, l'indice de risque est cumulatif :

$$I_{\text{global}}_{\lambda n \lambda m} = \sum_{i=1}^{i=M} \left| \bar{Ind}_{\lambda n \lambda m}(i) \right|$$

Pour ces mêmes grandeurs, mais avec une limitation t_{lim} de la durée d'exposition journalière, l'indice de risque est calculé comme suit :

$$\text{Si } \sum_{i=1}^{i=M} t_i \leq t_{lim},$$

$$I_{global \lambda n \lambda m} = \sum_{i=1}^{i=M} \overrightarrow{Ind \lambda n \lambda m}(i)$$

$$\text{Si } \sum_{i=1}^{i=M} t_i > t_{lim},$$

$$I_{global \lambda n \lambda m} = \text{Max}_{i=1}^{i=M} \left\{ \overrightarrow{Ind \lambda n \lambda m}(i) \right\}$$

Pour les grandeurs exprimées en luminance énergétique :

$$I_{global \lambda n \lambda m} = \text{Max}_{i=1}^{i=M} \left\{ \overrightarrow{Ind \lambda n \lambda m}(i) \right\}$$

Une zone de travail est une zone rectangulaire disposée horizontalement et découpée selon un maillage régulier. Les points récepteurs sont disposés au centre de chaque maille. Une zone de travail est caractérisée par les coordonnées de son origine, ses dimensions en X et en Y et le nombre de subdivisions en X et en Y. La durée d'exposition ainsi que l'orientation des surfaces réceptrices sont les mêmes pour toutes les mailles (cf. Figure 4).

DÉTERMINATION DES MOYENS DE PROTECTION À METTRE EN ŒUVRE

Caractéristiques spectrales d'un filtre de protection

Un filtre de protection est caractérisé par son facteur spectral de transmission T_λ entre 180 et 3000 nm. L'interposition d'un filtre devant une source modifie les caractéristiques spectrales de cette source et la répartition spectrale relative R_λ du couple source-filtre s'obtient comme suit :

$R_\lambda = R_{s\lambda} \cdot T_\lambda$ avec $R_{s\lambda}$: Répartition spectrale relative de la source.

Protection collective

Pour chaque source, une liste de filtres efficaces (issus de la base de données de filtres) est établie de manière à assurer la protection d'une zone de travail. Une zone de travail est considérée comme protégée si, en chacun de ses points récepteurs et dans chaque domaine spectral, les indices de risques sont inférieurs ou égaux à 1. C'est pour-

quoi, un vecteur indice global $\overrightarrow{Ind}_{global}$, relatif à l'ensemble de la zone de travail et des domaines spectraux, a été défini. En se référant aux notations des figures 3 et 4, ce vecteur indice global a pour expression :

$$\overrightarrow{Ind}_{global} = \text{Max}_{\substack{j=N_y \\ i=N_x \\ i=1 \\ j=1}} \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{Ind}_{max \lambda_1 \lambda_2}(i, j), \\ \overrightarrow{Ind}_{max \lambda_3 \lambda_4}(i, j), \\ \dots, \\ \overrightarrow{Ind}_{max \lambda n \lambda m}(i, j) \end{array} \right\}$$

On considère donc que la protection de la zone de travail est assurée si $|\overrightarrow{Ind}_{global}| \leq 1$

Sachant que pour la majeure partie des domaines spectraux, les risques sont cumulatifs, une démarche itérative a été adoptée pour pouvoir établir une liste de filtres efficaces par source. Cette démarche est détaillée dans la NST 265 [9].

Protection individuelle

Comme précédemment, une liste de filtres efficaces est établie pour chaque poste de travail (P_t). Les filtres étant placés devant les yeux des opérateurs, la démarche est plus simple qu'en protection collective. Elle consiste à placer le même filtre (F_t) devant les K sources (S_1, S_2, \dots, S_k). Ainsi, le filtre F_t est considéré comme efficace si, pour les couples sources-filtres ($S_1+F_t, S_2+F_t, \dots, S_k+F_t$),

$$\text{Max}_{\substack{j=N_y \\ i=N_x \\ i=1 \\ j=1}} \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{Ind}_{max \lambda_1 \lambda_2}(P_t), \\ \overrightarrow{Ind}_{max \lambda_3 \lambda_4}(P_t), \\ \dots, \\ \overrightarrow{Ind}_{max \lambda n \lambda m}(P_t) \end{array} \right\} \leq 1$$

Tous les filtres de la base de données sont interposés successivement entre l'opérateur et les sources et seuls les filtres répondant à ces exigences sont retenus.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE DE CALCUL

La vérification du modèle a été réalisée en laboratoire dans deux configurations représentées à la figure 5. L'éclairement énergétique spectrique a été mesuré entre 200 et 3000 nm au moyen d'un spectroradiomètre OPTRONIC® modèle OL750 dans les deux configurations précitées pour un angle $\alpha = 0$ (cf. Figure 5). Pour les autres valeurs de α , seul l'éclairement lumineux a été mesuré à l'aide d'un luxmètre LMT calibré par rapport au spectroradiomètre.

Les erreurs associées aux relevés de distances et d'angles, imputables aux mesures, ont été prises en compte au niveau du modèle pour des raisons de simplicité et ont donc été répercutées sur les données d'entrée. Elles ont été estimées à ± 1 mm sur les distances dans la configuration 1 et à ± 2 mm dans la configuration 2 (impossibilité d'utiliser un banc optique pour l'alignement). L'erreur commise sur les angles a été évaluée à $\pm 2^\circ$ dans les deux configurations. Pour chaque configuration, le modèle a donc été testé en entrant, d'une part, les distances et angles relevés et, d'autre part, les distances et les angles aux bornes. Les indices de risque ont été calculés pour une durée d'exposition de 8 heures. Chaque indice calculé à partir du modèle est encadré par des valeurs minimales et maximales correspondant aux indices déterminés aux bornes. Les erreurs dues au matériel de mesure et à son étalonnage n'ont pas été prises en compte.

Dans les deux configurations testées, il a été vérifié que les résultats fournis par le logiciel se situent dans l'intervalle de précision des mesures. On peut donc en conclure qu'a priori, le modèle utilisé dans CatRayon 3 permet une approximation correcte des risques dus à l'exposition à des sources de rayonnement optique.

FIGURE 4

Paramètres définissant une zone de travail
Parameters defining a working area

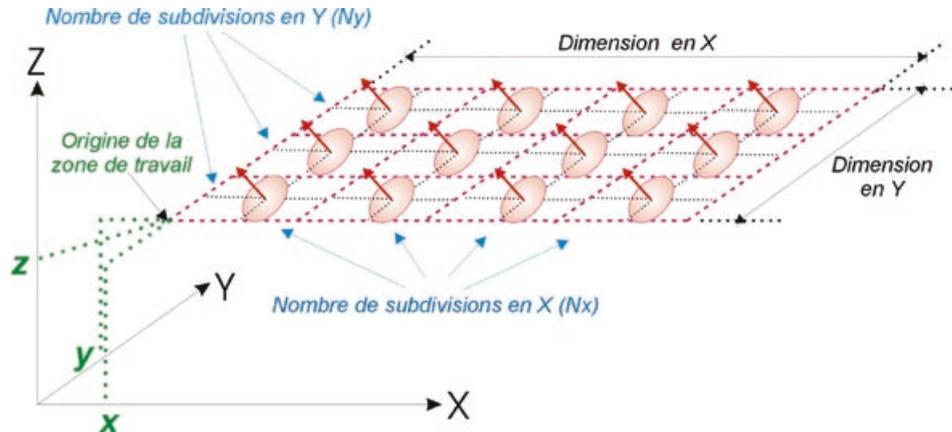
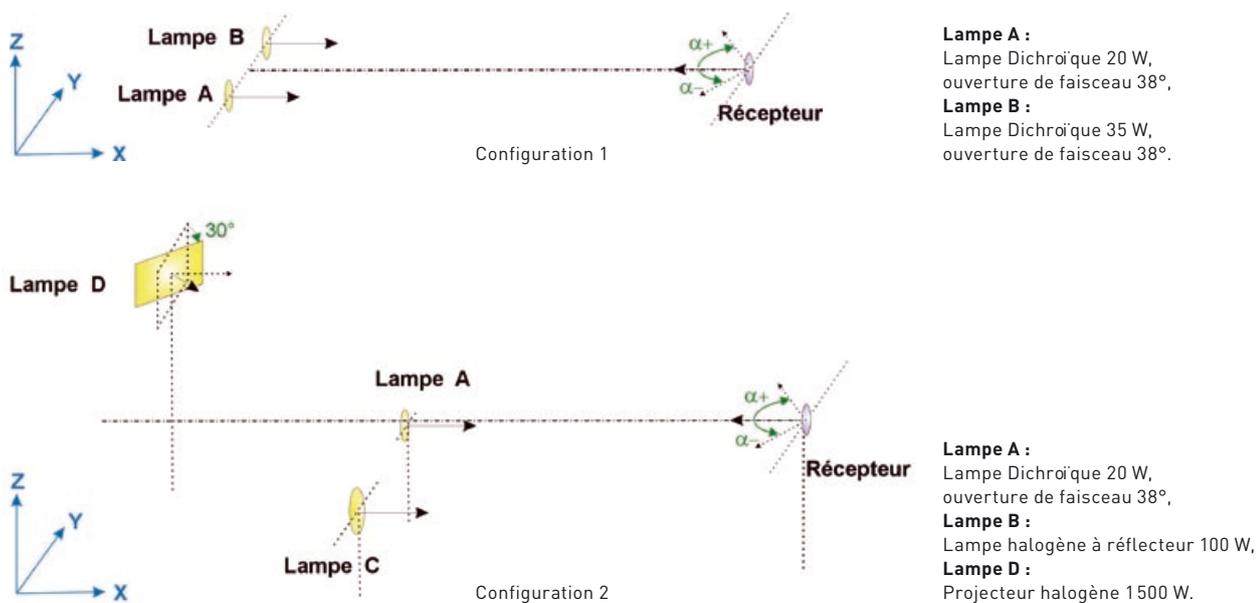


FIGURE 5

Vérification expérimentale du modèle dans les 2 configurations
Experimental model verification in both configurations



CONCEPTION DE CATRAYON 3

ENVIRONNEMENT ET FONCTIONNALITÉS

L'environnement de CatRayon 3 se présente sous forme d'une fenêtre principale (cf. Figure 6) composée :

- d'un menu qui regroupe toutes les fonctionnalités,
- d'une première barre d'icônes pour un accès rapide aux fonctions de

saisie des sources, des postes de travail et des équipements de protection,

■ d'une seconde barre d'icônes permettant de sélectionner directement les fonctions de calcul et d'affichage des risques et des équipements de protection proposés,

■ d'une zone graphique représentant l'implantation des sources, des postes et des zones de travail dans le local,

■ d'une zone de choix des options graphiques,

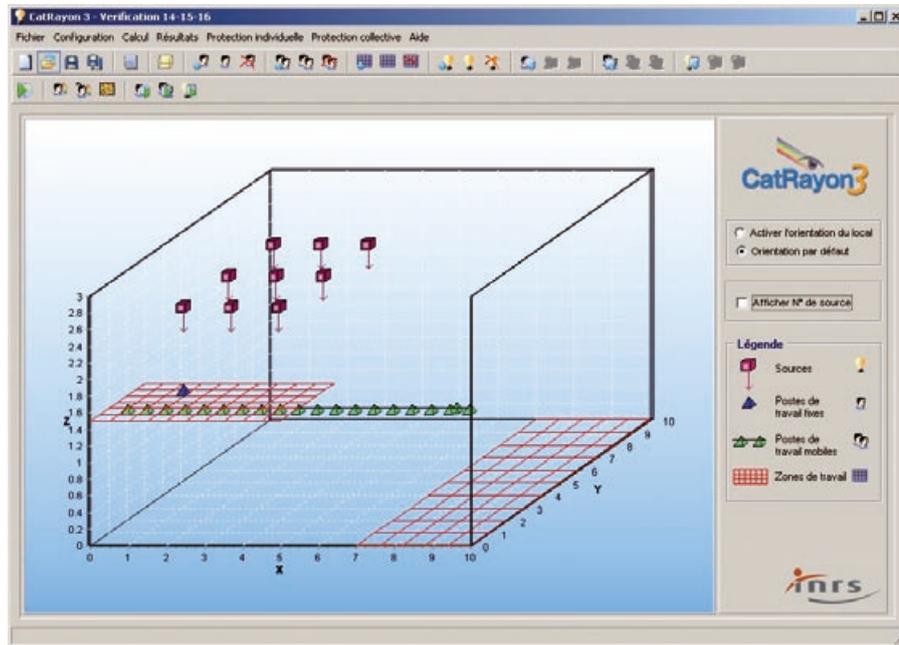
■ d'une aide en ligne disponible à tous les niveaux de saisie.

Toutes les données saisies et calculées sont regroupées dans un projet qui peut être sauvegardé pour une utilisation ultérieure. Pour construire un projet dans CatRayon 3, il est nécessaire de :

- choisir, positionner et orienter les sources présentes dans le local,
- décrire les postes de travail fixes et mobiles,
- définir les zones de travail de taille et maillage variables,
- choisir et disposer les éventuels équipements de protection.

FIGURE 6

Environnement de CatRayon 3
CatRayon 3 environment



Après calcul des expositions, il est alors possible de visualiser, de manière interactive en fonction de l'orientation de l'axe de vision des opérateurs (postes fixes) ou des cellules réceptrices (zones de travail) :

- les domaines spectraux à l'origine des risques ainsi que les effets physiologiques associés,
- les indices de risques dans chaque domaine spectral sous forme de graphique ou de tableau.

Si les configurations étudiées présentent des risques, CatRayon 3 offre la possibilité d'établir automatiquement une liste :

- d'équipements de protection collective (filtres placés au niveau de la source) permettant de supprimer les risques dans une zone de travail considérée,
- d'équipements de protection individuelle efficaces au niveau des postes de travail fixes ou mobiles.

L'ensemble des données et résultats du projet peut être consigné dans un rapport d'analyse.

Remarque : un aperçu des principales fonctionnalités de CatRayon 3 sont décrites ci-après. Pour une description plus complète des fonctionnalités, il suffit de se reporter au guide d'utilisation du logiciel [19].

SAISIE DES SOURCES

Les données relatives à l'implantation des sources sont regroupées dans la fenêtre présentée à la Figure 7.

Les sources disponibles sont réparties dans cinq bases de données :

- les lampes à usage spécifique qui émettent des rayonnements ultraviolet et/ou infrarouge,
- les lampes à usage général principalement destinées à l'éclairage et trois bases de données de sources industrielles,
- les arcs de soudage produits par différents procédés de soudage : électrodes enrobées, fils pleins, fils fourrés,
- les fours utilisés dans divers secteurs d'activité : verreries, forges, aciéries, pour fondre des produits ou réchauffer des pièces,
- les autres sources industrielles.

Pour chaque source sélectionnée, il est possible de visualiser les caractéristiques générales et spectrales.

La source sélectionnée est ensuite positionnée dans le local en entrant ses coordonnées x, y, z. Son orientation dans l'espace est donnée à l'aide des angles de rotation autour des trois axes. Les représentations graphiques de la source sont mises à jour au fur et à mesure de la saisie.

SAISIE DES POSTES DE TRAVAIL FIXES ET MOBILES

La position du poste de travail fixe dans le local est repérée à l'aide de ses coordonnées x, y, z définies dans le repère du local. La durée d'exposition journalière est saisie en heures, minutes et secondes.

Un poste de travail mobile est composé d'une succession de points qui marquent les différentes étapes du parcours de l'opérateur. À chaque point sont associées : les coordonnées x, y, z du point dans le repère du local, la durée d'exposition journalière, la direction de l'axe du regard de l'opérateur repéré par la flèche rouge (cf. Figure 8). Le plan XY (flèches verte et bleue) matérialise le plan du visage de l'opérateur. L'axe de vision est orienté par rotation autour des axes XYZ. Ainsi, toutes les données affichées dans la fenêtre présentée Figure 8 concernent le point en cours. L'opération est répétée pour chaque point composant le parcours.

SAISIE DES ZONES DE TRAVAIL

Une zone de travail est définie comme décrit Figure 9, par : les coordonnées x et y de son origine, sa hauteur z, ses dimensions en X et en Y, le nombre de subdivisions du quadrillage en X et en Y, la durée d'exposition journalière.

ÉVALUATION DES RISQUES – RÉSULTATS

Après lancement du module de calcul, il est alors possible d'afficher les résultats correspondants aux postes de travail fixes et mobiles et aux zones de travail. Les résultats sont présentés sous forme de deux volets :

- l'un se rapporte aux aspects qualitatifs du risque, à savoir la nature

FIGURE 7

Implantation d'une source Location of a source

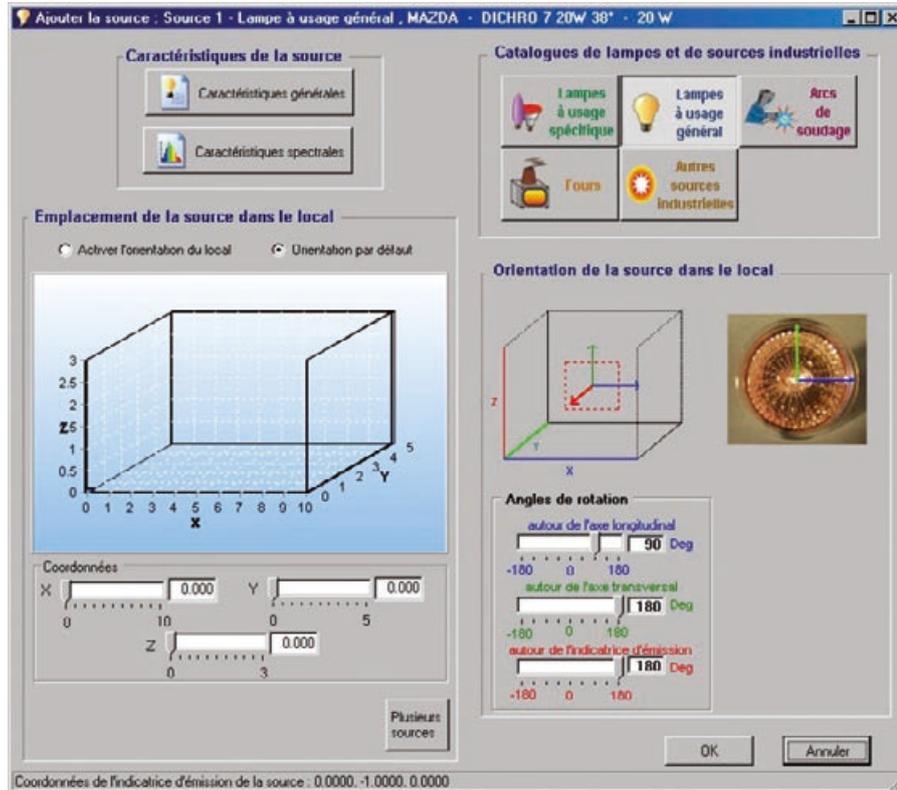
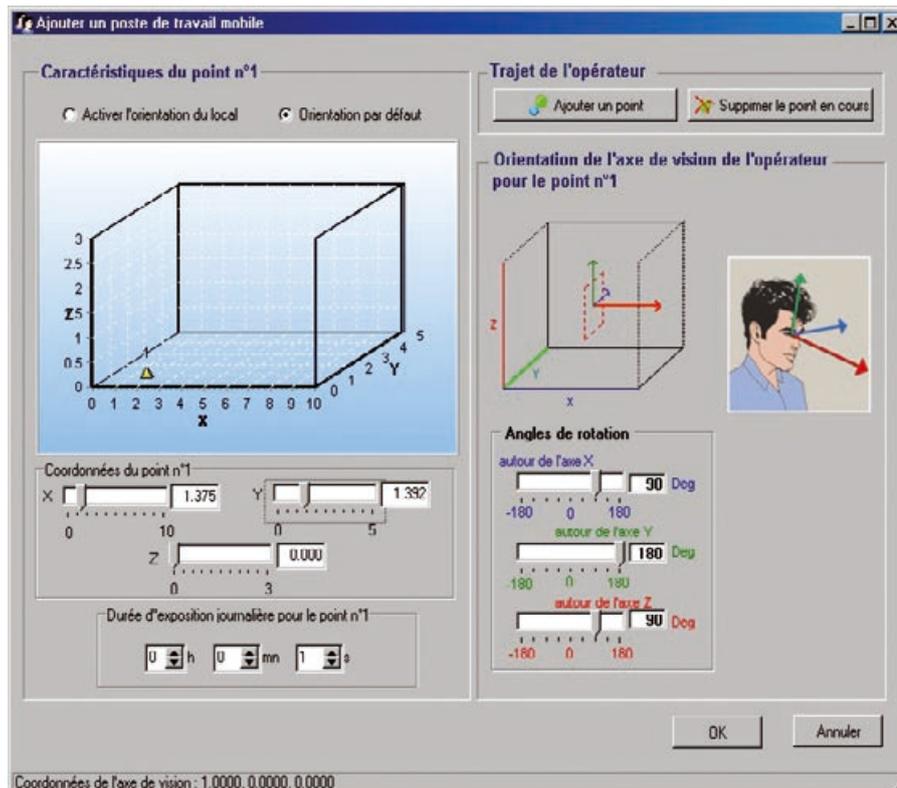


FIGURE 8

Implantation d'un poste de travail mobile Location of a moving workstation



du rayonnement en cause : ultraviolet, visible, infrarouge ainsi que les effets physiologiques associés,

■ l'autre concerne les aspects quantitatifs et donne sous forme graphique, les valeurs des indices de risque dans chaque domaine spectral.

Les résultats relatifs à l'aspect quantitatif des risques (cf. Figures 10, 11 et 12) se présentent tous de la même manière, qu'il s'agisse de postes de travail fixes ou mobiles ou de zones de travail. Dans la partie gauche du cadre, les rayonnements à l'origine des risques sont affichés. Un clic sur l'un des rayonnements fait apparaître une fenêtre explicative. Les effets physiologiques associés sont présentés sous forme de boutons. Seuls les boutons correspondant aux risques en cause sont activés et permettent d'afficher une fenêtre donnant une description détaillée des effets.

Les résultats relatifs à l'aspect quantitatif sont affichés sous forme graphique. Les représentations graphiques des indices de risque diffèrent selon qu'il s'agit de postes fixes ou mobiles ou de zones de travail, mais le mode de sélection du domaine de risque à afficher est le même. En effet, toutes les zones graphiques comportent des boutons numérotés de 1 à 8 et un bouton intitulé « Tous » (cf. Figure 10). Les numéros affectés aux boutons de ce cadre correspondent à ceux indiqués sur les boutons de la zone « Effets ». Ils permettent de tracer les indices de risque relatifs aux effets identifiés. Afin de visualiser rapidement les postes ou les zones qui présentent un risque, les icônes correspondantes sont colorées en rouge si l'indice de risque est supérieur à 1 et en vert s'il est inférieur à 1.

RÉSULTATS SPÉCIFIQUES AUX POSTES DE TRAVAIL FIXES

Les résultats de tous les postes fixes présents dans le local sont rassemblés dans une fenêtre unique (cf. Figure 10) qui permet :

■ de sélectionner le poste fixe ;
■ de modifier la direction de l'axe de vision ou de l'orienter dans une direction prédéfinie. Le module disposé dans le coin supérieur droit de la fenêtre permet d'orienter dans l'espace l'axe du regard de l'opérateur. Chaque déplacement de l'un des curseurs ou modification de l'une des valeurs saisies

FIGURE 9

Implantation d'une zone de travail
Location of a working area

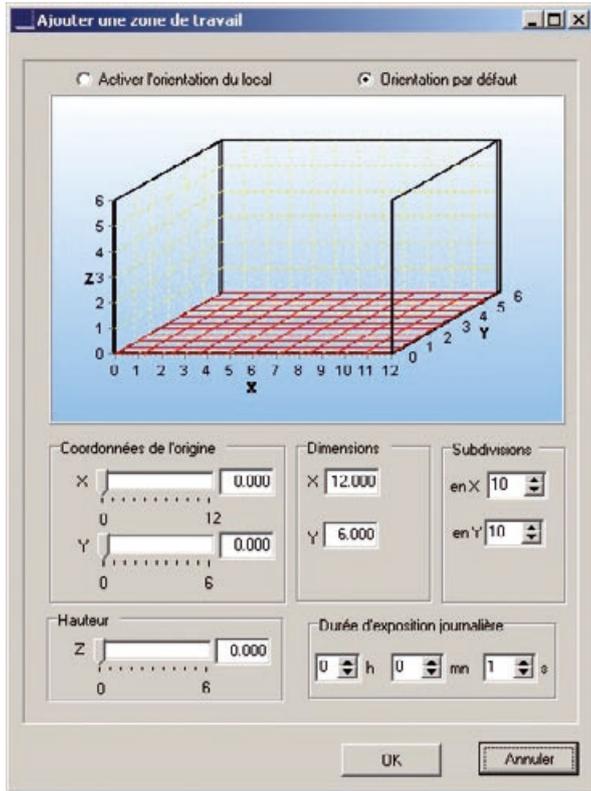
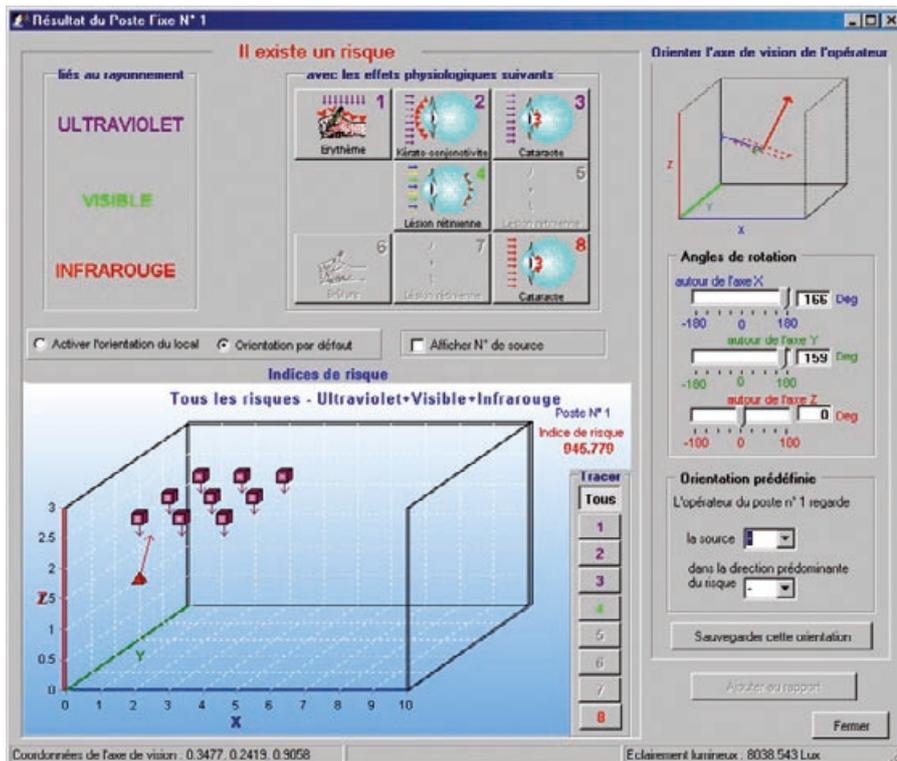


FIGURE 10

Résultats relatifs aux postes de travail fixes
Fixed workstation results



entraîne l'affichage en temps réel des résultats correspondants à la direction choisie. Afin de faciliter la saisie de l'orientation de l'axe de vision, un module intitulé « Orientation prédéfinie », permet d'orienter directement le regard de l'opérateur, soit en direction d'une source choisie, soit dans la direction présentant l'indice de risque maximal pour le risque choisi ;

■ de visualiser, sur le graphique, l'indice de risque correspondant au domaine spectral concerné dans la direction de l'axe de vision sélectionnée.

Résultats spécifiques aux postes de travail mobiles

La fenêtre « Résultats d'un poste de travail mobile » (cf. Figure 11) présente, par domaine spectral :

■ les indices de risque cumulés sur tout le parcours,

■ les indices de risque en chaque point du parcours. Les différents points qui composent le trajet suivi par l'opérateur sont représentés dans la zone graphique,

■ les différents indices de risque sous forme de tableau.

Résultats spécifiques aux zones de travail

La fenêtre « Résultats d'une zone de travail » (cf. Figure 12) permet :

■ d'orienter dans l'espace les surfaces réceptrices fictives situées au centre de chaque maille de la zone de travail. La normale à la surface représentée par la flèche rouge simule l'axe de vision d'un opérateur placé au centre de la maille. Les axes vert et bleu disposés dans le plan de la surface réceptrice matérialisent le plan du visage de l'opérateur ;

■ d'afficher, sous forme graphique, les indices de risque de chaque maille de la zone de travail. La zone de travail quadrillée est représentée dans le plan XY. Les mailles sont colorées en vert si l'indice de risque est inférieur à 0,8, en blanc si l'indice de risque est compris entre 0,8 et 1 et selon un dégradé de couleur rouge dont l'intensité varie avec la valeur de l'indice de risque si celui-ci est supérieur à 1. Plus l'indice est élevé plus le rouge est intense,

■ de visualiser les résultats sous forme de tableau (cf. Figure 13).

FIGURE 11

Résultats relatifs aux postes de travail mobiles
Moving workstation results

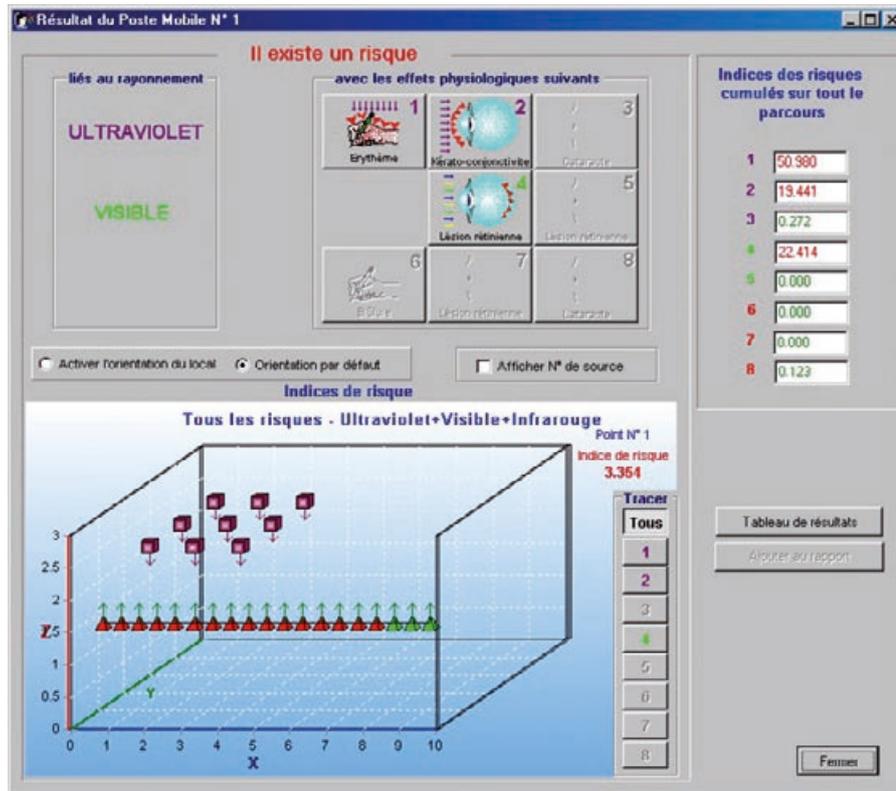
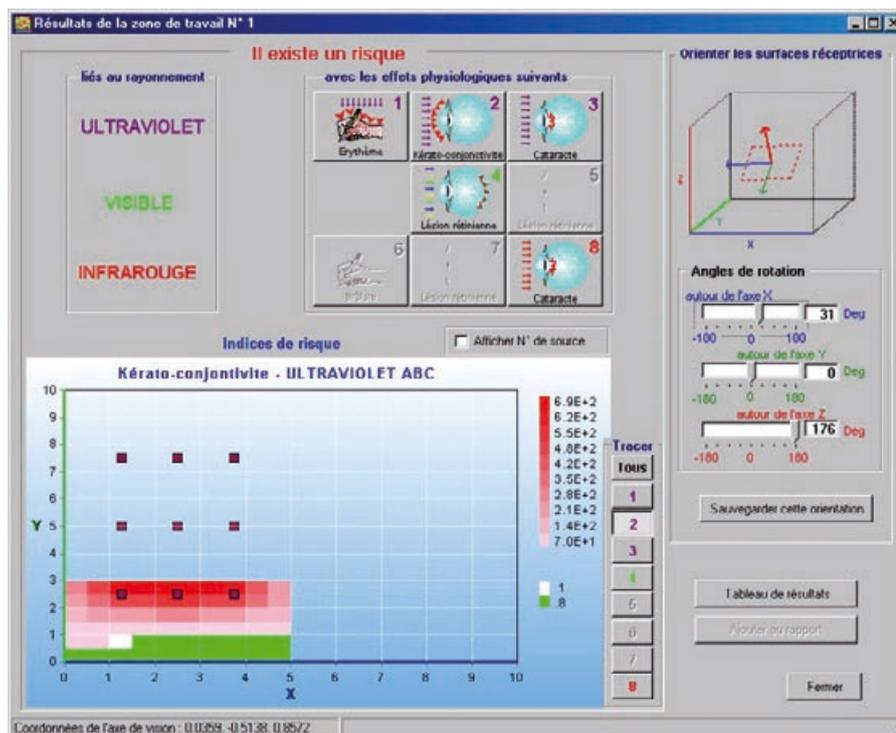


FIGURE 12

Résultats relatifs à une zone de travail
Working area results



PROTECTION INDIVIDUELLE ET COLLECTIVE

CatRayon 3 propose deux solutions pour choisir un équipement de protection collective ou individuelle, soit en le sélectionnant directement dans la base de données de filtres, soit en déterminant automatiquement une liste de filtres efficaces.

Sélection d'un équipement de protection dans la base de données

Dans le cas d'une sélection directe du filtre, une fenêtre affichant la liste des postes de travail ou des sources permet de sélectionner tout d'abord le numéro du poste de travail ou de la source devant lequel le filtre choisi sera placé. Puis, une fenêtre se rapportant au traitement des filtres de protection permet de sélectionner un filtre dans la base de données et d'afficher les caractéristiques générales et spectrales du filtre choisi (cf. Figure 14).

Sélection d'un équipement de protection dans une liste de filtres efficaces déterminés automatiquement par le logiciel

Les postes de travail ou les sources apparaissent dans une liste déroulante. Après sélection d'un poste ou d'une source dans cette liste, le nombre de filtres efficaces et la liste de ces filtres s'affichent (cf. Figure 15). Un filtre, choisi dans la liste proposée, peut être ajouté directement au poste de travail ou devant la source en cours de traitement. À ce niveau, il est également possible de faire apparaître les caractéristiques générales et spectrales du filtre choisi (cf. Figure 14).

ÉDITION D'UN RAPPORT D'ANALYSE

Toutes les données et les résultats qui constituent le projet peuvent être consignés dans un rapport d'analyse. CatRayon 3 permet de créer plusieurs rapports pour un même projet.

Une représentation graphique du local, comprenant les sources, les postes et les zones de travail, est enregistrée et ajoutée automatiquement au rapport d'analyse. Tous les résultats relatifs à l'analyse des risques et à la protection individuelle et collective peuvent ensuite être insérés dans ce rapport.

FIGURE 13

Tableau de résultat relatif à une zone de travail
Working area results table

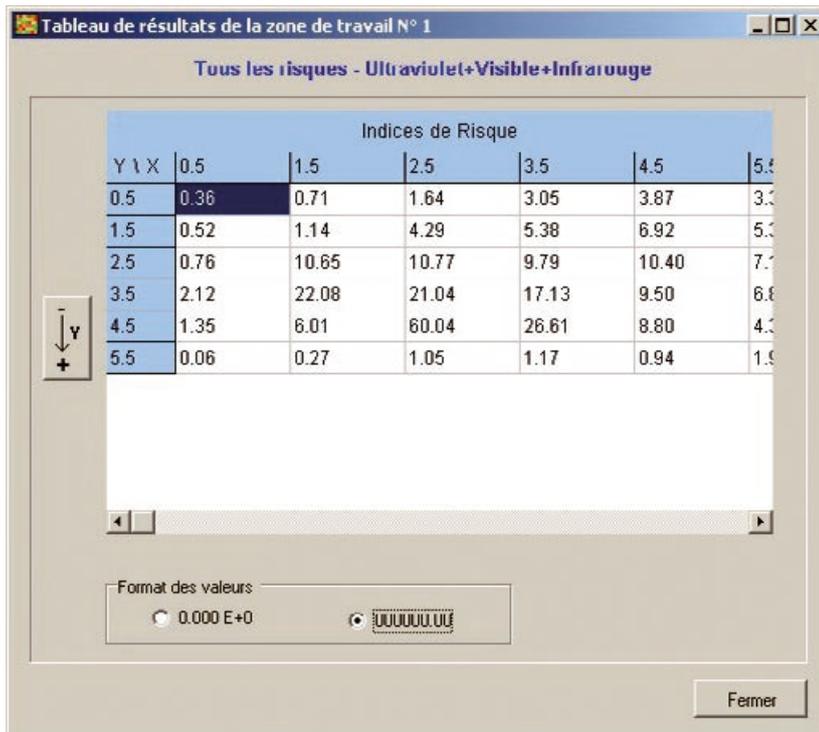


FIGURE 14

Représentation du facteur spectral de transmission d'un filtre
Spectral transmittance diagram for a filter

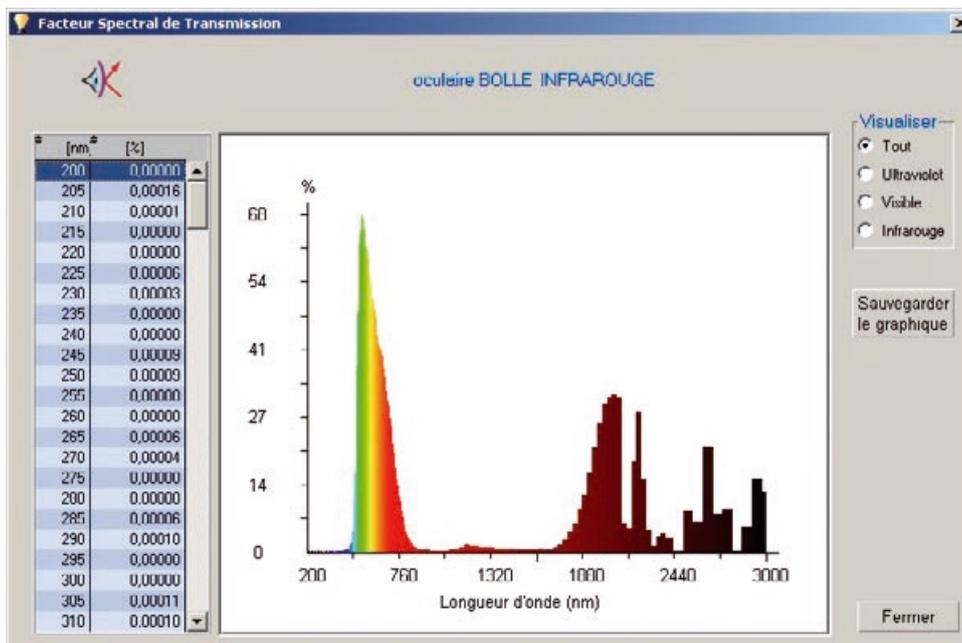
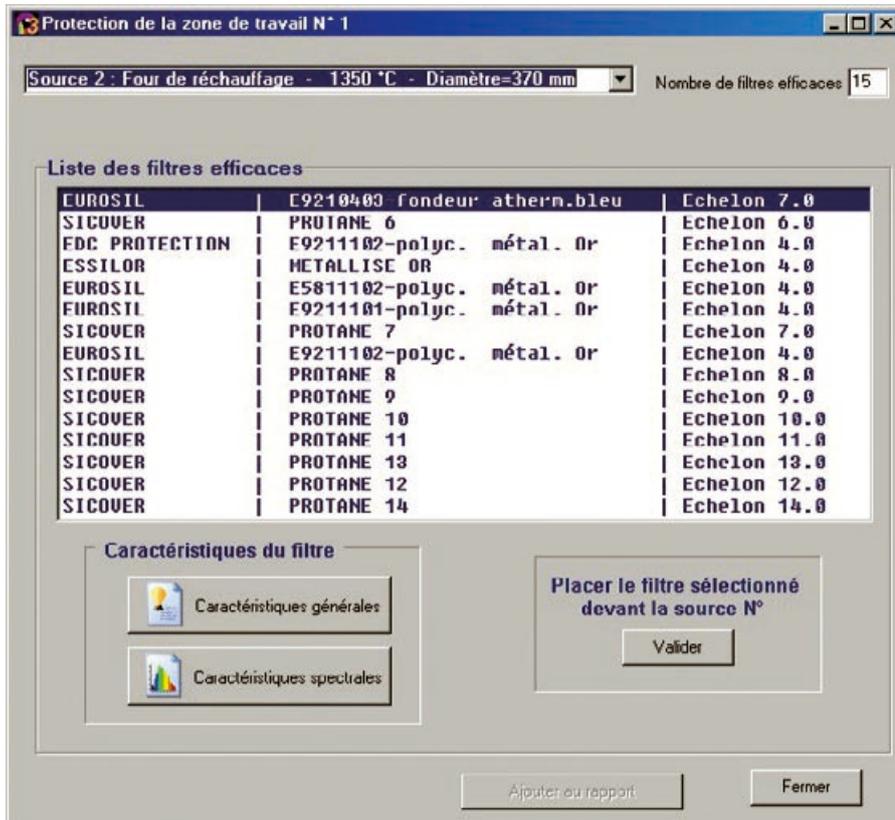


FIGURE 15

Détermination automatique des filtres efficaces devant une source Automatic determination of filters effective in front of a source



Liste des filtres efficaces			
EUROSIL	E9210403	fondeur atherm.bleu	Echelon 7.0
SICOVER	PROTANE 6		Echelon 6.0
FDC PROTECTION	E9211102	polyc. métal. Or	Echelon 4.0
ESSILOR	METALLISE OR		Echelon 4.0
EUROSIL	E5811102	polyc. métal. Or	Echelon 4.0
FHROSIL	E9211101	polyc. métal. Or	Echelon 4.0
SICOVER	PROTANE 7		Echelon 7.0
EUROSIL	E9211102	polyc. métal. Or	Echelon 4.0
SICOVER	PROTANE 8		Echelon 8.0
SICOVER	PROTANE 9		Echelon 9.0
SICOVER	PROTANE 10		Echelon 10.0
SICOVER	PROTANE 11		Echelon 11.0
SICOVER	PROTANE 13		Echelon 13.0
SICOVER	PROTANE 12		Echelon 12.0
SICOVER	PROTANE 14		Echelon 14.0

CONCLUSION – PERSPECTIVES

La diffusion relativement large de la première version de CatRayon, son référencement dans le projet de norme européenne [12] et son utilisation par les différents homologues européens de l'INRS travaillant sur le rayonnement optique, ont montré qu'il répondait à une réelle demande. En prenant en compte l'exposition de plusieurs personnes à plusieurs sources, tout en restant d'une utilisation simple, cette nouvelle version de CatRayon permet désormais de simuler des situations réelles d'exposition dans les locaux de travail et devrait ainsi mieux satisfaire cette demande.

Cependant, pour continuer à fournir des réponses adaptées aux besoins des utilisateurs, d'autres perspectives

d'évolution peuvent d'ores et déjà être envisagées. En effet, l'adoption de la directive européenne relative au rayonnement optique [7] devrait se traduire par une augmentation du nombre de contrôles dans les entreprises. Il sera alors nécessaire de mettre à la disposition des organismes chargés de ces contrôles, un outil d'évaluation des risques en temps réel.

Reçu le : 05/03/2007

Accepté le : 13/04/2007

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CatRayon – Cd-Rom interactif pour l'évaluation des risques relatifs aux sources de rayonnement optique. *Éditions INRS CD 006, juin 2000.*
- [2] A. BARLIER SALS, S. SALS, A. KLINGLER – Réalisation d'un catalogue informatisé interactif pour l'évaluation des risques relatifs aux sources de rayonnement optique. *Notes Scientifiques et techniques de l'INRS, 1999, 175, 77 p.*
- [3] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths 180 nm to 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics, 2004, 87, pp. 171-186.*
- [4] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3 μm). *Health Physics, 1997, 73 (3), pp. 539-554.*
- [5] Vocabulaire international de l'éclairage. Paris, Commission Internationale de l'Éclairage, 1987, document CIE N° 17.4, 365 p.
- [6] CatRayon 3 – Évaluation de l'exposition au rayonnement optique dans les locaux de travail – Détermination des risques et des moyens de protection. *Guide d'utilisation. Édition INRS CD 006, 2^{ème} édition, septembre 2006.*
- [7] 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 (rayonnement optique artificiel) (dix-neuvième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe, de la directive 89/391/CEE). *J.O. de l'Union Européenne du 27 avril 2006. L114, pp 38-59.*
- [8] A. BARLIER SALS, S. SALS - Éclairage énergétique produit par une source de rayonnement optique plane de forme complexe dans une direction quelconque - Calcul du facteur de configuration par la méthode des éléments finis. *Notes Scientifiques et Techniques de l'INRS, 1996, 140, 60 p.*
- [9] A. BARLIER SALS, S. SALS - CatRayon 3 : Un logiciel pour évaluer l'exposition aux rayonnement optique dans les locaux de travail et déterminer les moyens de protection. *Notes Scientifiques et Techniques de l'INRS, 2007, 265, 57 p.*
- [10] Illuminating Engineering Society of North America - Lighting Handbook, Reference & Application. 8th edition, 1993, pp. 383-392.
- [11] Commission Internationale de l'Éclairage – The Photometry and gonio-photometry of luminaires. *CIE 121, 1996, 43 p.*
- [12] prEN 14255-1. Mesure 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. *Octobre 2004.*

ANNEXE A

LIMITES D'EXPOSITION (LE)
EXPOSURE LIMITS (LE)

Domaine spectral	Effets du rayonnement	Grandeurs énergétiques calculées	Limites d'exposition (LE)
180 – 400 nm	Peau : Erythème, effets cancérogènes	$H_{UV} = \sum_{180}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$	30 J.m ⁻²
	Yeux : Kératites, conjonctivites	$H_{UV} = \sum_{180}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$	30 J.m ⁻²
315 – 400 nm	Yeux : Cataractes	$H_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$	10 ⁴ J.m ⁻²
300 – 700 nm	Yeux : Lésions rétinienne par effet photochimique	Sources étendues : $\alpha \geq 0,011$ rd	
		$L_{VIS} \cdot t = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$ pour $t \leq 10^4$ s	10 ⁶ J.m ⁻² .sr ⁻¹
		$L_{VIS} = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$ pour $t > 10^4$ s	10 ² W.m ⁻² .sr ⁻¹
		Sources ponctuelles : $\alpha < 0,011$ rd	
		$H_{VIS} = \sum_{300}^{700} E_{\lambda} \cdot B_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$ pour $t \leq 10^4$ s	10 ² J.m ⁻²
		$E_{VIS} = \sum_{300}^{700} E_{\lambda} \cdot B_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$ pour $t > 10^4$ s	10 ⁻² W.m ⁻²
380 – 1400 nm	Yeux : Lésions rétinienne par effet thermique (visible+IR)	$L_{VISIRA} = \sum_{380}^{1400} L_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$	$\frac{5 \cdot 10^4}{\alpha t^{1/4}}$ pour $10^{-5} \text{ s} \leq t \leq 10 \text{ s}$ et $0,0017 \text{ rd} \leq \alpha \leq 0,1 \text{ rd}$ (1)
780 – 1400 nm	Yeux : Lésions rétinienne par effet thermique (IR)	$L_{IRA} = \sum_{780}^{1400} L_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$	$\frac{6 \cdot 10^3}{\alpha}$ pour $t > 10 \text{ s}$ et $0,011 \text{ rd} \leq \alpha \leq 0,1 \text{ rd}$ (2)
780 – 3000 nm	Yeux : Lésions de la cornée, cataractes	$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$	18.10 ⁴ .t ^{-3/4} W.m ⁻² pour $t < 10^3$ s 10 ² W.m ⁻² pour $t \geq 10^3$ s
380 – 3000 nm	Peau : Brûlures	$H_{VISIR} = \sum_{380}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$	20000.t ^{1/4} J.m ⁻² pour $t < 10 \text{ s}$

(1) Si $t < 10^{-5}$ s ou $t > 10$ s, LE est calculée en prenant respectivement $t = 10^{-5}$ s ou $t = 10$ s.

Si $\alpha < 0,0017$ rd ou $\alpha > 0,1$ rd, LE est calculée en prenant respectivement $\alpha = 0,0017$ rd ou $\alpha = 0,1$ rd.

(2) Si $\alpha < 0,011$ rd ou $\alpha > 0,1$ rd, LE est calculée en prenant respectivement $\alpha = 0,011$ rd ou $\alpha = 0,1$ rd.

S_{λ} , B_{λ} , R_{λ} : efficacités relatives spectrales des rayonnements [3,4]