

VALIDATION DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES FILTRES DE SOUDAGE COMMUTABLES

- Soudage
- Filtre
- Efficacité
- Protection individuelle
- Oeil

► *Dominique HAGUENAUER, Patrice MARCHAL, Michel JACQUES*
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

VALIDATION OF TEST METHODS FOR SWITCHABLE WELDING FILTERS

Since the 1980s, manufacturers of welding operator protective equipment have been marketing filters, whose transmittance factor switches automatically. These are clear in the at-rest state but, as soon as a welding arc is triggered, they commutate to a dark state, thereby ensuring protection of the eyes against optical radiation emitted by the arc.

The aim of this study is to check that specifications and testing methods recommended by the EN 379 standard are relevant and take into account the specific characteristics of this type of filter, which is subject to continuous technological development.

Checks were carried out based on standard EN 379 and extended beyond conditions fixed by the standard to determine the changes in filter characteristics:

- light transmittance variation,
- light diffusion,
- switching time between clear and dark states.

This study revealed clearly filter efficiency drops significantly, when the angle of radiation incidence reaches 30° or more to the screen normal.

The standard recommends taking transmission measurements up to 15°, but a welder is likely to work at an estimated maximum angle of 30°. INRS will therefore propose that the radiation angle of incidence be increased to 30°, when standard EN 379 is revised.

- Welding
- Filter
- Efficiency
- Personal protection
- Eye

Les fabricants de matériel de protection pour le soudage commercialisent depuis les années 80, des filtres dont le facteur de transmission commute automatiquement. Clairs à l'état de repos, ils commutent, dès que l'arc de soudage est amorcé, dans un état foncé assurant une protection des yeux contre les rayonnements optiques émis par l'arc.

L'objet de cette étude est de vérifier que les spécifications et méthodes d'essais préconisées par la norme EN 379 sont pertinentes et prennent en compte les spécificités de ce type de filtres en évolution technologique permanente.

Des vérifications ont été effectuées, sur la base de la norme EN 379 et au-delà des conditions normalisées, afin de déterminer l'évolution de caractéristiques de ces filtres :

- variation de la transmission de la lumière,
- diffusion de la lumière,
- temps de commutation entre l'état clair et l'état foncé.

Cette étude a clairement mis en évidence que lorsque l'angle d'incidence des rayonnements atteint des valeurs de 30° ou plus par rapport à la normale de l'écran, l'efficacité des filtres chute très fortement. La norme préconise des mesures de transmission jusqu'à 15°, or un soudeur est susceptible de travailler avec un angle estimé au maximum à 30°. Il sera donc proposé par l'INRS lors de la révision de la norme EN 379 d'augmenter l'angle à 30°.

Les filtres électro-optiques clairs à l'état de repos, permettent au soudeur de voir les pièces à souder et de positionner la torche de soudage. Dès l'apparition de l'arc de soudage, ils commutent instantanément à un état foncé correspondant à une densité optique de 2 à 6 et assurent une protection des yeux contre les rayonnements optiques intenses émis par l'arc. Il existe trois types de filtre. Les premiers ont un état foncé prédéfini par le fabricant. Les seconds permettent à l'utilisateur de choisir un état foncé à l'aide d'un potentiomètre, entre deux limites. Pour les troisièmes, le degré de l'état foncé est automatiquement défini en fonction de l'intensité lumineuse reçue. La filtration des rayonnements ultraviolets (UV) et infrarouges (IR) est assurée par un écran incolore passif placé devant le filtre électro-optique.

La validation des filtres de soudage automatiques commutables s'effectue, dans le cadre de la procédure de certification, sur la base des spécifications de la norme EN 379 [1]. Ces spécifications sont établies en fonction des risques encourus, des limites d'exposition, mais également, des évolutions technologiques de ce type d'équipement de protection individuelle.

Lors de réunions de normalisation du CEN/TC85/WG4 en charge de la révision de la norme EN 379, il a été mis en évidence que la filtration de la lumière sur certains modèles était très variable en fonction de l'angle d'incidence des rayons lumineux.

Nous pouvons également nous interroger sur la tenue dans le temps des filtres électro-optiques soumis à des expositions répétées aux rayonnements

ultraviolets et de leur efficacité lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions de températures extrêmes.

Une étude réalisée par le PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Allemagne) en 1988 [2, 3], avait montré des défauts sur certains modèles liés, en particulier, à des temps de commutation entre l'état clair et l'état foncé trop importants, par rapport aux valeurs recommandées par la norme.

L'objectif de l'étude, objet de cet article, est de faire des mesures sur des produits représentatifs du marché pour évaluer les risques liés à leur utilisation. Ces investigations portent notamment sur l'évolution des caractéristiques de transmission, de diffusion de la lumière et du temps de commutation, en faisant varier l'angle d'incidence des rayonnements sur le filtre, le temps de vieillissement aux rayonnements ultraviolets et la température d'essai. Ceci doit permettre de valider les options prises dans la norme ou, éventuellement, de proposer des ajustements.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES FILTRES ÉLECTRO-OPTIQUES

La lumière est une onde électromagnétique, donc composée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B . L'œil étant insensible à la composante magnétique, nous ne considérerons que la composante électrique.

La direction de polarisation de la lumière est la direction de son champ E :

- pour une lumière naturelle non polarisée, il n'y a pas de direction particulière. Les vecteurs du champ électrique prennent des directions aléatoires ;
- pour une lumière polarisée, tous les vecteurs du champ E sont parallèles.

LES FILTRES ÉLECTRO-OPTIQUES

Si une lumière non polarisée traverse un polariseur, seule la composante parallèle au plan de polarisation est transmise. Lorsque deux polariseurs

FIGURE 1

Filtres de polarisation dans un support isotrope (tel que l'air)
Polarisation filters in an isotropic medium (e.g. air)

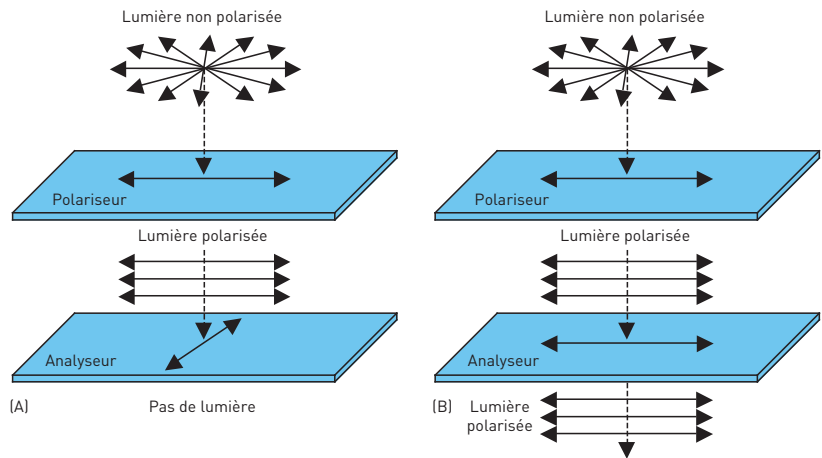
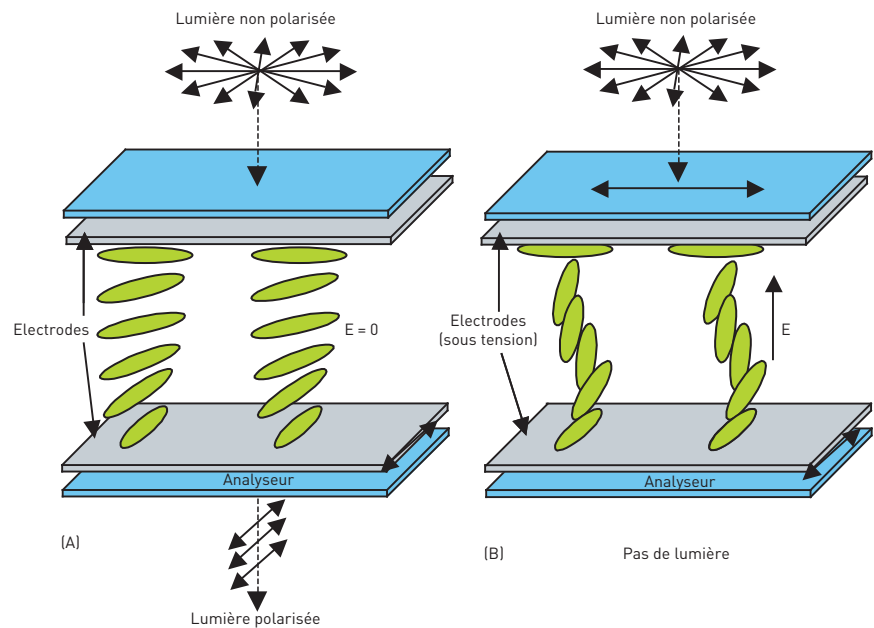


FIGURE 2

La géométrie nématique du dispositif
Nematic geometry of the system



sont superposés, la quantité de lumière transmise par le système dépend de l'orientation relative de l'un par rapport à l'autre (cf. Figure 1).

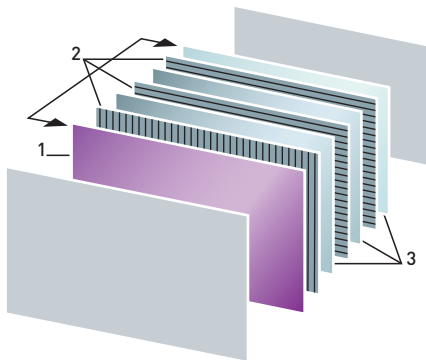
Par exemple, quand les polariseurs sont arrangés de sorte que leurs plans de polarisation soient perpendiculaires entre eux, la lumière est bloquée (cf. Figure 1A). Quand le deuxième filtre (appelé l'analyseur) est parallèle au premier, toute la lumière traversée par le premier filtre est également transmise par le second (cf. Figure 1B).

Certains liquides sont constitués de molécules ayant la forme de bâtonnet, plus ou moins allongé et tendent, de ce fait, à s'orienter de façon organisée, dans un récipient. Ces liquides ont des propriétés comparables à celles de certains cristaux ; on parle de cristaux liquides.

Les filtres de soudage électro-optiques les plus répandus sont à base de cristal liquide « nématique » (du grec *néma*, fil, qui qualifie une matière dont les molécules sont allongées et parallèles entre elles) et « en hélice » car elles sont alignées hélicoïdalement avec une

FIGURE 3

Exemples de filtre électro-optique Examples of electro-optical filters



rotation d'une lame de verre à l'autre (cf. Figure 2).

Les filtres de soudage électro-optiques sont des obturateurs variables placés entre l'œil et une source lumineuse.

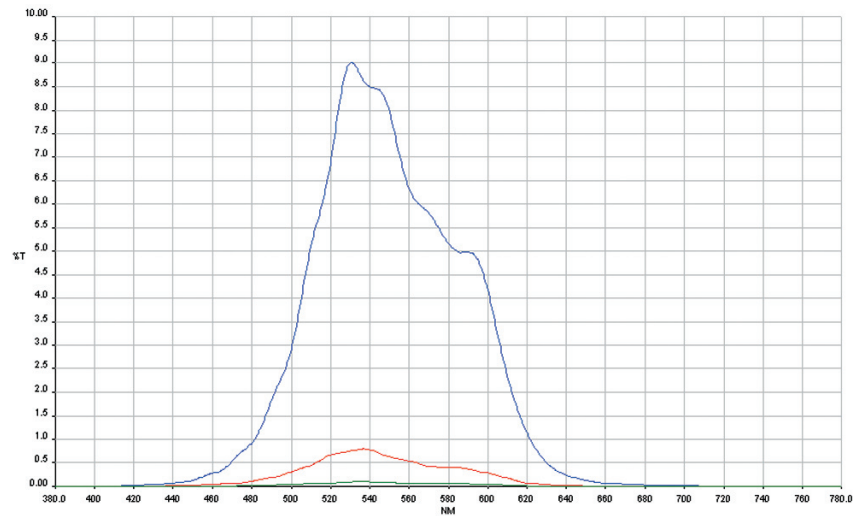
Le principe de fonctionnement consiste à faire varier la transparence d'un milieu qui semble s'opacifier ou, au contraire, s'éclaircir selon le champ électrique et, par conséquent, la tension qui le commande. Ce milieu est constitué de cristaux liquides et remplit un espace (d'environ 10 μm) limité par deux lames de verre métallisées formant les électrodes.

Ces lames sont elles-mêmes comprises entre un polariseur et un analyseur. Leurs plans de polarisation étant croisés, la lumière ne peut pas traverser l'analyseur.

Le rôle des cristaux liquides est justement d'assurer la rotation du champ électrique : ils le font spontanément de par leur propriété. Au repos, les molécules très allongées forment des sortes d'escaliers en colimaçon dont elles seraient les marches. Ces « toboggans » descendent d'une plaque sur l'autre en pivotant d'un quart de tour. Afin d'aligner précisément les premières et les dernières molécules sur les directions passantes du polariseur et de l'analyseur, les deux plaques sont revêtues d'une couche en plastique d'alignement comportant des stries très fines sur lesquelles les molécules extrêmes viennent se loger en s'orientant. La lumière polarisée qui traverse le cristal liquide

FIGURE 4

Spectre de la lumière transmise aux différents états du filtre Light spectrum transmitted at different filter states



— : courbe de transmission à l'état clair correspondant à l'échelon 4.
— : courbe de transmission à l'état commuté le plus clair correspondant à l'échelon 9.
— : courbe de transmission à l'état commuté le plus foncé correspondant à l'échelon 13.

pris en sandwich suit cette hélice et ne sera pas arrêtée par le couple polariseur-analyseur puisque le vecteur lumineux associé subit une rotation de 90°. Cette situation rend l'écran transparent.

Si une tension est appliquée entre les deux électrodes, les molécules situées entre elles perdent leur disposition en hélice et s'orientent dans le sens du champ, c'est-à-dire perpendiculairement aux plaques. Le « toboggan » disparaissant, la lumière conserve la direction de polarisation du polariseur. Le polariseur et l'analyseur ayant des orientations perpendiculaires, la lumière est stoppée par l'analyseur.

À la disparition du champ, les molécules se replacent en hélice en un temps variable dépendant du type de cristal liquide et de la température.

Chaque filtre de soudage se compose généralement d'un feuillet de sept couches (cf. Figure 3) :

- un écran filtrant les rayonnements ultraviolets et infrarouges, appelé filtre UV/IR (1),
- trois filtres de polarisation (2),
- trois éléments à cristaux liquides (3).

Le nombre de ces différents éléments peut varier d'un fabricant ou d'un filtre à l'autre, mais le principe reste le même. Le filtre UV/IR (appelé filtre passif) arrête en permanence les rayonnements nocifs que le filtre de soudage soit en position « marche » ou « arrêt », et dans les états clair ou foncé.

Grâce à un système électronique, les éléments à cristaux liquides, appelés filtre actif, fonctionnent comme des obturateurs. Ils réagissent à l'arc de soudage en se mettant immédiatement en position « clair » ou « foncé » selon les besoins. Ils filtrent uniquement le rayonnement optique visible (longueur d'onde comprise entre 380 nm et 780 nm), avec une prépondérance entre 500 et 600 nm (lumière jaune et verte), ce qui permet de limiter la quantité importante de lumière bleue. La Figure 4 donne les courbes de transmission de la lumière entre 405 et 720 nm aux états clair, commuté le plus clair et commuté le plus foncé.

Le niveau de transmission des filtres est caractérisé par un numéro d'échelon défini dans la norme EN 165 [4]. Pour les filtres de soudage, la norme EN 169 [5] spécifie une vingtaine de numéros d'échelon et, pour chacun d'eux, les

limites de transmission dans les différentes gammes de longueurs d'onde et les types d'utilisation prévus. Les trois états mesurés sur le filtre commutable correspondent respectivement aux échelons 4, 9 et 13.

Le déclenchement des filtres est obtenu à l'apparition de l'arc de soudage grâce à 2 ou 4 cellules photo-détectrices selon les modèles, situées autour de l'écran.

Selon les filtres, différents paramètres peuvent être réglés soit par l'opérateur, soit de manière automatique. Ils concernent la sensibilité du déclenchement de l'état clair à l'état foncé en fonction de l'intensité de l'arc, sur la durée du maintien à l'état foncé après extinction de l'arc et sur le niveau d'obscurcissement.

L'alimentation électrique des filtres de soudage commutables est assurée :

- soit uniquement par des piles,
- soit par des cellules voltaïques placées au-dessus de l'écran, activées par les rayonnements de soudage. Des batteries tampons permettent le premier déclenchement et une meilleure régulation de l'alimentation.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Des vérifications ont été effectuées, sur la base de la norme EN 379, afin de déterminer l'évolution des caractéristiques des filtres de soudage en fonction des différentes conditions d'essais :

- variation de la transmission de la lumière, lorsque l'angle d'incidence des rayonnements sur le filtre varie à l'intérieur d'un angle solide de 15° par rapport à la normale,
- variation de la diffusion et de la transmission de la lumière, après un vieillissement de 50 heures par les rayonnements ultraviolets (UV),
- variation du temps de commutation entre l'état clair et l'état foncé, aux températures de + 50°C et + 10°C.

La présente étude a été conduite pour évaluer sur ces mêmes paramètres, l'influence :

- de l'angle d'incidence au-delà de la valeur normalisée. Des mesures de transmission ont été effectuées dans toutes les directions correspondant à l'angle solide du champ de vision donné par la cagoule de soudage ;
- des expositions aux rayonnements UV de 50 heures répétées qui sont susceptibles d'induire un vieillissement et une diminution des performan-

ces de transmission et de diffusion du filtre. Entre chaque exposition, la transmission et la diffusion ont été mesurées, afin d'estimer leurs évolutions ;

- du déclenchement de la commutation en fonction de l'angle d'incidence de l'arc par rapport au filtre ;
- des utilisations dans des conditions de températures extrêmes. Des mesures du temps de commutation ont été effectuées à des températures inférieures à 0°C.

Quatre modèles de filtres électro-optiques ont été testés. L'analyse de la notice d'utilisation a permis de répertorier les caractéristiques annoncées par chaque fabricant (cf. *Tableau 1*).

RÉSULTATS

TRANSMISSION DE LA LUMIÈRE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DE LA SOURCE DE RAYONNEMENT

L'objectif de l'essai est d'évaluer l'influence de l'angle d'incidence du rayonnement, sur la transmission du filtre. Ces mesures couvrent toutes les incidences possibles dans le champ de vision de l'opérateur, en faisant varier l'inclinaison et l'azimut du rayonnement.

TABLEAU 1

Caractéristiques des filtres testés Characteristics of filters tested

| Filtre en essai | Alimentation | Réglage de l'échelon foncé | Réglage de la sensibilité | Déclenchement | Classes du filtre (*) | Divers |
|-----------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|-----------------------|---|
| Modèle 1 | Piles LR03 | 9 à 13 | Par potentiomètre | 4 cellules | 2/3/2 | Bouton de forçage à l'état foncé |
| Modèle 2 | Cellules silicium + batterie tampon | 9 à 13 | Par potentiomètre | 2 cellules | 1/1/1 | |
| Modèle 3 | Cellules silicium + batterie tampon | 9 à 13 | Par potentiomètre | 2 cellules | 1/3/1 | Réglage sur satellite déporté sur le côté de la cagoule |
| Modèle 4 | Cellules silicium + batterie tampon | 5 à 9 ou 9 à 13 | Par potentiomètre | 2 cellules | 1/1/1 | Réglage du temps de retour à l'état clair |

(*) La norme EN 379 spécifie des classes (de 1 pour la meilleure à 3 pour la moins bonne) pour trois caractéristiques des filtres commutables.

Les trois chiffres correspondent respectivement à :

- la classe de diffusion de la lumière,
- la classe de variation du facteur de transmission dans le visible,
- la classe de dépendance angulaire du facteur de transmission dans le visible.

FIGURE 5

Montage pour évaluer le champ de vision
Visual field testing assembly



La méthode de mesure des filtres a été définie comme suit :

- ▣ définition du champ visuel de l'opérateur lorsqu'il porte une cagoule de soudage. L'objectif est de déterminer les angles d'incidence maximum (en inclinaison et en azimut) des rayonnements de soudage pouvant atteindre l'œil ;

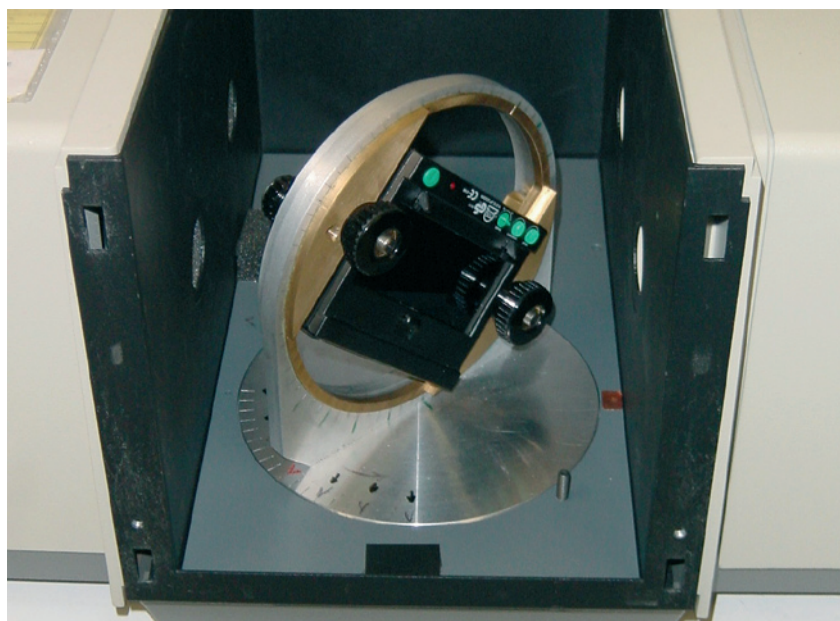
- ▣ mesure spectrale au centre des écrans, avec le faisceau de mesure perpendiculaire à la surface du filtre. Elle est effectuée avec le filtre à l'état foncé le plus clair. C'est la mesure de référence. Elle permet en outre de déterminer le numéro d'échelon du filtre ;

- ▣ détermination de la longueur d'onde dans le visible où la transmission est la plus élevée à l'aide de la courbe spectrale mesurée précédemment ;

- ▣ à la longueur d'onde définie précédemment, mesure de la transmission de la lumière, avec le faisceau ayant une inclinaison variant de 0° à 45° par pas de 15° , et un azimut variant de 0° à 360° par pas de 15° . Cela représente des cônes de mesures tous axés sur le même point de l'écran. Seules les positions comprises à l'intérieur du champ de vision seront conservées. La variation de la transmission pour ces différentes incidences est calculée par rapport à la valeur de référence (incidence normale) ;

FIGURE 6

Filtre sur le support de positionnement
Filter on positioning support



- ▣ tracé des courbes de transmission en coordonnées polaires (1 courbe par angle d'inclinaison) ;

- ▣ mesure spectrale des écrans pour les positions donnant des valeurs extrêmes. Ces transmissions sont comparées à la valeur de référence mesurée avec une incidence perpendiculaire.

Le champ visuel est évalué de la façon suivante : les filtres de soudage commutable de dimension standard (110 mm x 90 mm) présentent une fenêtre active (zone de vision) de 95 mm x 40 mm. La Figure 5 permet de visualiser cette zone. La cagoule étant positionnée sur la tête factice, il est possible de mesurer la distance entre l'œil et le filtre. Connaissant les dimensions du filtre, nous déterminons, par calcul, les angles maximums du champ visuel, verticalement et horizontalement, puis dans toutes les directions. Ces calculs ont été vérifiés par mesure sur le banc d'essais d'étendue de protection, défini dans la norme EN 168 [6].

Les mesures de transmission ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre Perkin-Elmer® de type Lambda 900 sur chacun des 4 modèles. Les numéros d'échelon des filtres à l'état clair et à l'état commuté le plus clair ont été déterminés conformément à la norme EN 169.

Un support d'échantillons (cf. Figure 6) a permis de positionner le filtre, en inclinaison et en azimut, dans le faisceau de mesure.

Du fait de l'importance de la polarisation pour la mesure des filtres, un faisceau dépolarisé a été utilisé.

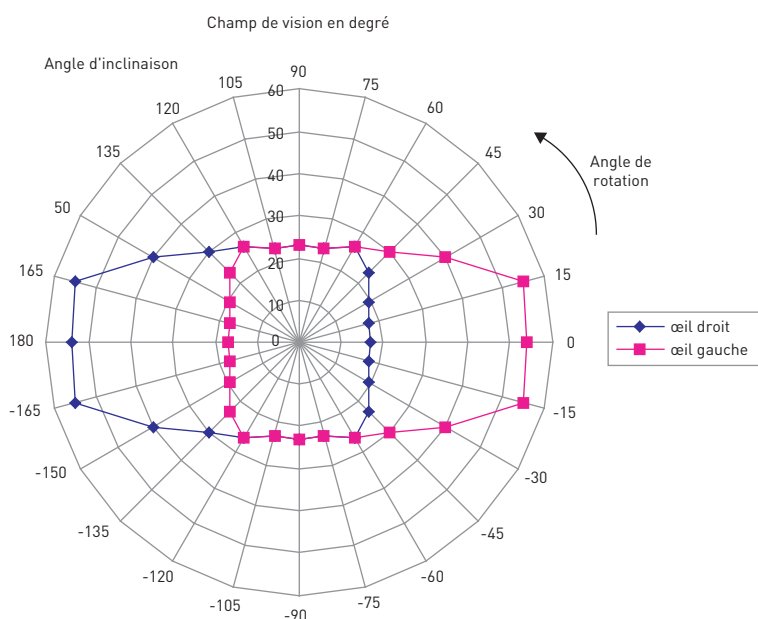
Détermination du champ visuel

La mesure du champ visuel a permis de déterminer que l'angle d'incidence d'un rayon pouvant atteindre l'œil varie entre $\pm 20^\circ$ verticalement et -15° à $+55^\circ$ horizontalement, avec des incidences maximales comprises entre $+55^\circ$ et $+60^\circ$, toutes directions confondues. Pour chaque œil, la Figure 7 donne l'incidence maximale en coordonnées polaires, en fonction de l'angle du rayon en azimut ; 0° et $+180^\circ$ correspondent aux positions horizontales, $+90^\circ$ et -90° aux positions verticales.

Parallèlement, un calcul a permis d'évaluer la zone balayée par le regard pour des angles de $+15^\circ$ et $+30^\circ$. En tenant compte de la distance inter-pupillaire normalisée de 64 mm et de la distance entre l'arc de soudage et l'œil estimée à 50 cm, un angle de 15° correspond à un balayage latéral d'environ 10 cm, et un angle de 30° à environ 25 cm. L'angle de 15° peut donc facilement être dépassé

FIGURE 7

Champ de vision pour chaque œil
Visual field for each eye



dans des situations normales de travail et l'angle de 30° paraît être une limite raisonnable.

Détermination de la variation de la transmission

En premier lieu une mesure spectrale des filtres a été effectuée, avec le faisceau de mesure perpendiculaire à la

surface de l'écran. Les résultats se trouvent dans le *Tableau II*, colonnes 2 et 3. Ces mesures ont également permis de définir la longueur d'onde où la transmission est la plus élevée. La valeur retenue pour les 4 filtres est 520 nm.

En second lieu, la transmission du filtre a été mesurée à cette longueur d'onde à l'état commuté le plus clair, en

chaque position correspondant à une inclinaison de 0°, 15°, 30°, 45° et à une rotation du filtre sur lui-même par pas de 15°.

Les *Figures 8 à 11* présentent les résultats de ces mesures. Elles donnent des courbes en échelle logarithmique de la transmission du filtre (en %), en fonction de l'angle de rotation du filtre sur lui-même (coordonnées polaires). Chaque figure présente quatre courbes correspondant respectivement aux inclinaisons de 0°, 15°, 30° et 45°.

Enfin, aux points de transmission minimale et maximale, une mesure spectrale à l'état commuté le plus clair a été effectuée. Les *Figures 12 à 17* donnent les spectres de transmission minimaux et maximaux pour les filtres 2, 3 et 4. Cela a permis de calculer, pour ces valeurs extrêmes, le facteur global de transmission dans le visible et de déterminer le numéro d'échelon correspondant. Les résultats se trouvent dans le *Tableau II*, colonnes 4 et 5.

Les *Figures 8 à 17* et le *Tableau II* montrent une grande variation de la transmission en fonction de l'angle d'inclinaison. En effet, selon l'azimut, pour une inclinaison non nulle, la transmission varie selon l'axe de polarisation du filtre. Cette dissymétrie est due au positionnement des cristaux liquides et varie en fonction de la technologie appliquée.

TABEAU II

Transmission des filtres
Filter transmission

| | | État clair | | État foncé | |
|----------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| | | τ_v normal | τ_v normal | τ_v maximal | τ_v minimal |
| Filtre 1 | Inclinaison / Azimut (en °) | 0/0 | 0/0 | 45/0 | 45/75 |
| | Transmission (en %) | 4,6 (Échelon 4) | 0,08 (Échelon 9) | 1,2 (Échelon 4) | 0,00086 (Échelon 13) |
| Filtre 2 | Inclinaison / Azimut (en °) | 0/0 | 0/0 | 45/225 | 45/120 |
| | Transmission (en %) | 6,1 (Échelon 4) | 0,027 (Échelon 9) | 0,31 (Échelon 7) | 0,0020 (Échelon 12) |
| Filtre 3 | Inclinaison / Azimut (en °) | 0/0 | 0/0 | 45/45 | 45/135 |
| | Transmission (en %) | 9,2 (Échelon 3) | 0,009 (Échelon 10) | 0,65 (Échelon 6) | 0,0010 (Échelon 13) |
| Filtre 4 | Inclinaison / Azimut (en °) | 0/0 | 0/0 | 45/270 | 45/0 |
| | Transmission (en %) | 5,0 (Échelon 4) | 0,038 (Échelon 9) | 0,81 (Échelon 6) | 0,00014 (Échelon 15) |

FIGURE 8

Transmission du filtre 1 en fonction de l'angle d'incidence du faisceau
 Filter 1 transmission with respect to beam angle of incidence

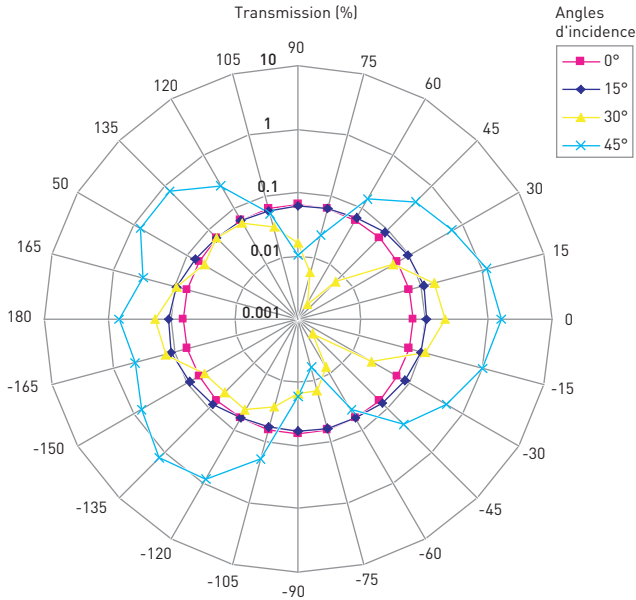


FIGURE 9

Transmission du filtre 2 en fonction de l'angle d'incidence du faisceau
 Filter 2 transmission with respect to beam angle of incidence

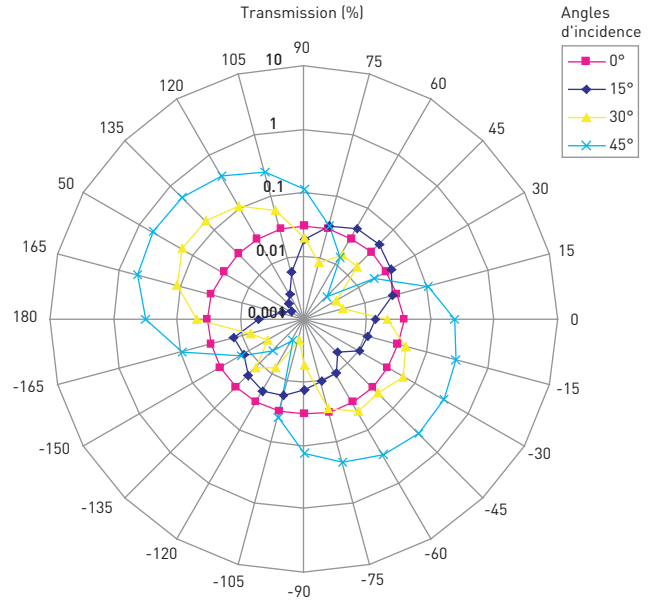


FIGURE 10

Transmission du filtre 3 en fonction de l'angle d'incidence du faisceau
 Filter 3 transmission with respect to beam angle of incidence

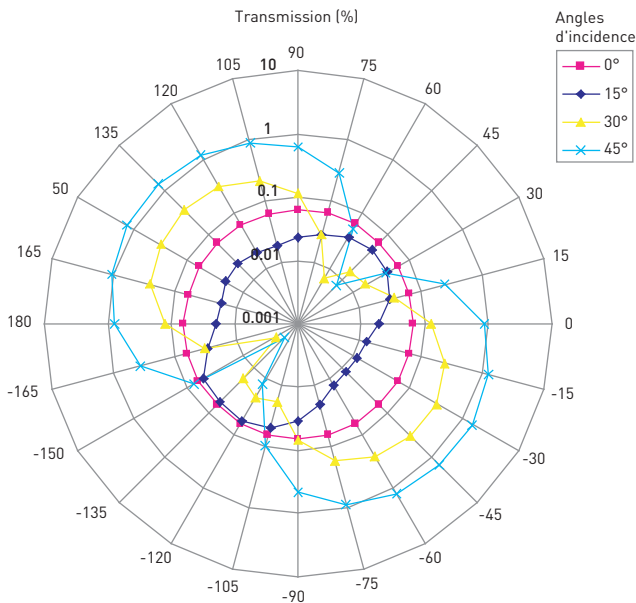


FIGURE 11

Transmission du filtre 4 en fonction de l'angle d'incidence du faisceau
 Filter 4 transmission with respect to beam angle of incidence

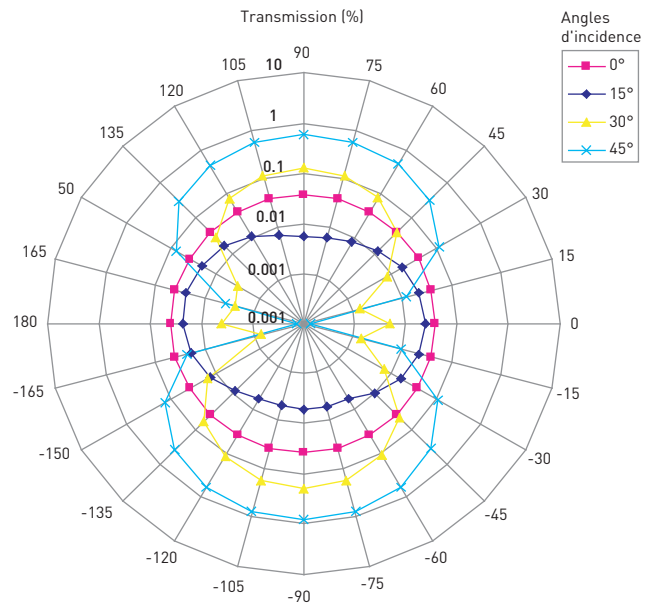


FIGURE 12

Filtre 2 – Transmission maximale
Filter 2 – Maximum transmission

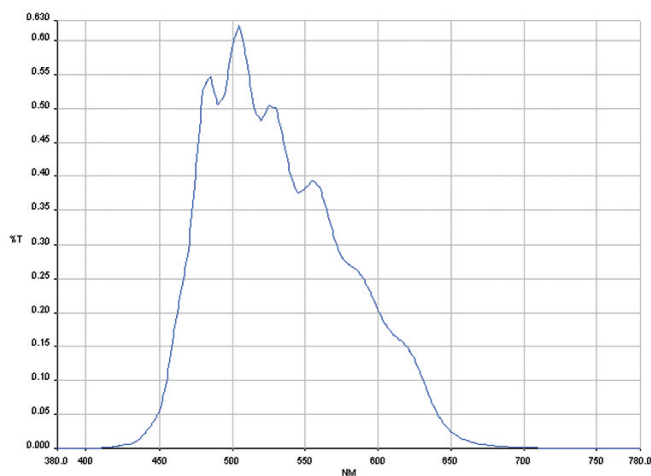


FIGURE 13

Filtre 2 – Transmission minimale
Filter 2 – Minimum transmission

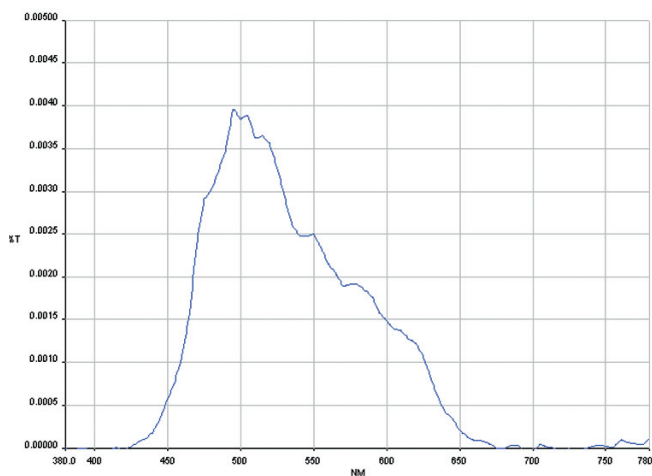


FIGURE 14

Filtre 3 – Transmission maximale
Filter 3 – Maximum transmission

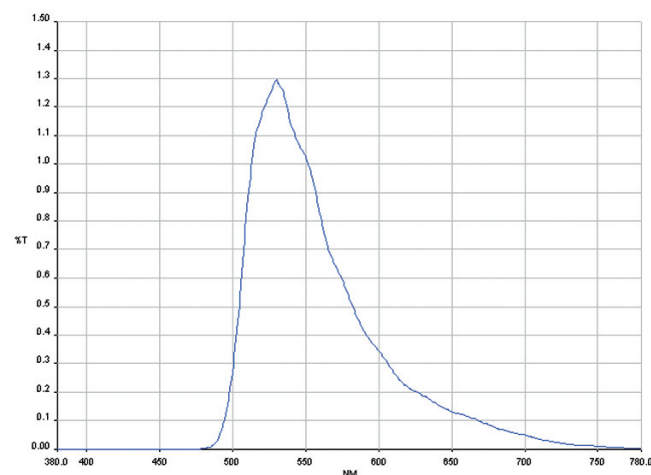


FIGURE 15

Filtre 3 – Transmission minimale
Filter 3 – Minimum transmission



Pour une inclinaison de 15°, la variation de la transmission reste dans la limite de la norme EN 169. Pour les filtres 3 et 4, la transmission diminue, ce qui va dans le sens d'une meilleure protection.

Pour une inclinaison de 30°, cette variation atteint des valeurs importantes, et modifie de façon sensible le niveau de protection de l'utilisateur. Selon les azimuts, soit la transmission diminue, les rayonnements arrivant sous cette incidence étant d'autant mieux filtrés, soit, au contraire, elle augmente, les rayonnements étant alors moins filtrés qu'en incidence normale.

Pour une inclinaison de 45°, la variation est très importante. Mais, dans le champ visuel de l'opérateur, il y a peu de positions où l'angle d'incidence est supérieur à 30°. Ces quelques positions coïncident avec un regard sur le côté mais ne correspondent pas à une position naturelle et soutenue du regard.

Il est donc nécessaire de vérifier la transmission des filtres selon des incidences correspondant à des angles naturels du regard, c'est-à-dire avec une inclinaison de 0 à 30° et selon tous les azimuts.

VARIATION DE LA TRANSMISSION EN FONCTION DU VIEILLESSEMENT AUX ULTRAVIOLETS

L'objectif de l'essai est d'évaluer l'influence du vieillissement aux ultraviolets sur la transmission du filtre. Cet essai a été réalisé conjointement avec l'essai de variation de la diffusion après vieillissement aux UV, décrit au paragraphe suivant.

Nous avons recherché un modèle de lampe susceptible d'être utilisée comme source de vieillissement. La lampe de type Xénon haute pression XBO-450 W/4 de 450 W à enveloppe de silice fon-

FIGURE 16

Filtere 4 – Transmission maximale

Filter 4 – Maximum transmission

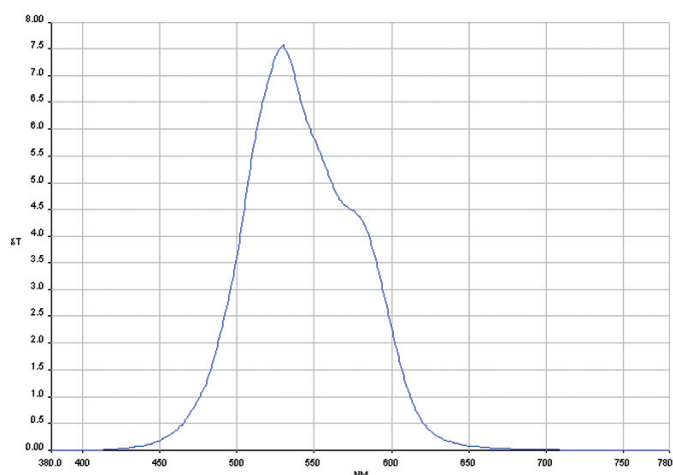
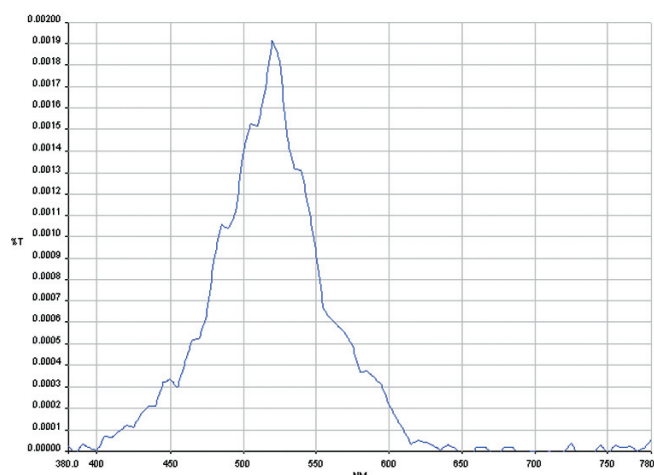


FIGURE 17

Filtere 4 – Transmission minimale

Filter 4 – Minimum transmission



due, déjà utilisée dans plusieurs normes pour des essais de vieillissement (dont les normes s'appliquant aux protecteurs de l'œil), est apparue comme la mieux adaptée. En effet, cette lampe émet des rayonnements UVC et elle est appropriée pour simuler certains procédés industriels, tels que la soudure.

La méthode de mesure des filtres a été définie comme suit :

- 1^{ère} mesure de la transmission des écrans au centre (inclinaison et azimut à 0°) ;
- 1^{ère} mesure de la diffusion des écrans ;
- 1^{er} vieillissement UV de 50 h ;
- 2^e mesure de la transmission,
- 2^e mesure de la diffusion des écrans ;
- 2^e vieillissement UV de 50 h ;
- 3^e mesure de la transmission ;
- 3^e mesure de la diffusion des écrans.

Les mesures ont été effectuées sur chacun des quatre filtres, dépourvus de leur écran de garde, afin de vérifier la tenue intrinsèque des filtres à cristaux liquides.

Les vieillissements ont été effectués dans un banc d'essai équipés de la lampe Xénon haute pression. Les filtres étaient disposés à 300 mm de la lampe et soumis au rayonnement pendant une durée de 50 heures. Ce cycle a été répété jusqu'à ce que les caractéristiques mesurées n'évoluent plus.

La transmission a été mesurée avant exposition aux UV, puis après expositions de 50 h et 100 h. Les *Tableaux III à V* donnent le facteur global de transmission dans le visible, aux états clair, commuté le plus clair et commuté le plus foncé, pour les filtres 1 à 3.

Les *Figures 18, 20 et 22* montrent les spectres de transmission, à l'état commuté le plus clair, avant et après vieillissements UV de 50 h et 100 h, respectivement pour les filtres 1, 2 et 3. Les *Figures 19 et 21* montrent ces spectres, pour le filtre 2 à l'état clair et à l'état commuté le plus foncé.

Après plusieurs expositions de 50 heures, les écrans 1 et 2 protégés par un verre minéral montrent une évolution très faible ou nulle de la transmission.

Concernant le filtre 3, protégé par un verre minéral recouvert d'un filtre en matière organique, la transmission diminue dans le visible de l'ordre de 50 % avec un affaiblissement plus marqué entre 500 et 530 nm. Cela va dans le sens d'une protection accrue et ces valeurs restent dans les limites de l'échelon de protection défini par la norme EN 169.

Les écrans en verre minéral protègent la partie active du filtre. La variation de la transmission observée sur le filtre 3 est due au vieillissement du filtre organique positionné en face avant.

VARIATION DE LA DIFFUSION APRÈS VIEILLISSEMENT AUX ULTRAVIOLETS

L'objectif de l'essai est d'évaluer l'influence du vieillissement aux UV sur la diffusion du filtre. Le protocole est décrit dans le paragraphe ci-dessus.

Les mesures de diffusion ont été effectuées sur chacun des 4 filtres, à l'état neuf et après expositions aux UV de 50 h et de 100 h.

Le *Tableau VI* donne la diffusion de la lumière, pour les filtres 1 à 3, mesurée avant exposition aux UV, puis après une exposition de 100 h. Les valeurs après 50 h ne sont pas présentées, car aucune évolution n'a été constatée.

Sur les filtres 1 et 2, aucune évolution notable de la diffusion n'a été constatée. Ils restent dans la même classe de diffusion (cf. *Tableau I*). Sur ces filtres, la surface exposée au rayonnement est en verre minéral. Celui-ci résiste aux rayonnements UV et en filtre une grande partie. Les éléments internes du filtre sont ainsi protégés.

Le filtre 3 présente une augmentation de la diffusion. Il change de classe de diffusion mais reste dans les limites de la norme EN 379. Cette augmentation provient probablement du vieillissement du filtre organique extérieur.

TABEAU III

Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état clair en fonction du temps d'exposition aux UV
 Change in transmission factor (%) in clear state with respect to UV exposure time

| Modèle de filtre | τ_v avant Vieillessement | τ_v après 50 heures | τ_v après 100 heures |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Filtre 1 | 9,1 | 8,8 | 8,7 |
| Filtre 2 | 6,1 | 6,1 | 6,1 |
| Filtre 3 | 10,7 | 10,0 | 9,9 |

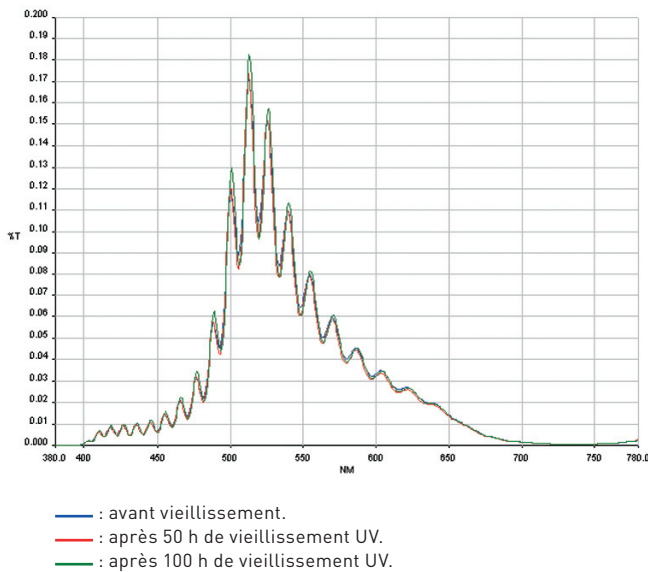
TABEAU V

Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état commuté le plus foncé en fonction du temps d'exposition aux UV
 Change in transmission factor (%) in darkest switched state with respect to UV exposure time

| Modèle de filtre | τ_v avant Vieillessement | τ_v après 50 heures | τ_v après 100 heures |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Filtre 1 | 0,0017 | 0,0017 | 0,0017 |
| Filtre 2 | 0,00042 | 0,00047 | 0,00031 |
| Filtre 3 | 0,00079 | 0,00062 | 0,00042 |

FIGURE 18

Filtre 1 - Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état commuté le plus clair en fonction du vieillissement UV
 Filter 1 - Change in transmission factor (%) in clearest switched state with respect to UV aging



TABEAU IV

Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état commuté le plus clair en fonction du temps d'exposition aux UV
 Change in transmission factor (%) in clearest switched state with respect to UV exposure time

| Modèle de filtre | τ_v avant Vieillessement | τ_v après 50 heures | τ_v après 100 heures |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Filtre 1 | 0,061 | 0,064 | 0,063 |
| Filtre 2 | 0,039 | 0,035 | 0,033 |
| Filtre 3 | 0,046 | 0,038 | 0,024 |

TABEAU VI

Mesure de diffusion après un vieillissement de 100 heures
 Diffusion measurement after 100-hour aging

| Mesure de diffusion en $cd/(m^2 \cdot lx)$ | | |
|--|----------------------|------------------|
| Modèle de filtre | Avant vieillissement | Après 100 heures |
| Filtre 1 | 1,40 | 1,42 |
| Filtre 2 | 0,30 | 0,31 |
| Filtre 3 | 0,86 | 1,51 |

FIGURE 19

Filtre 2 - Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état clair en fonction du vieillissement UV
 Filter 2 - Change in transmission factor (%) in clear state with respect to UV aging

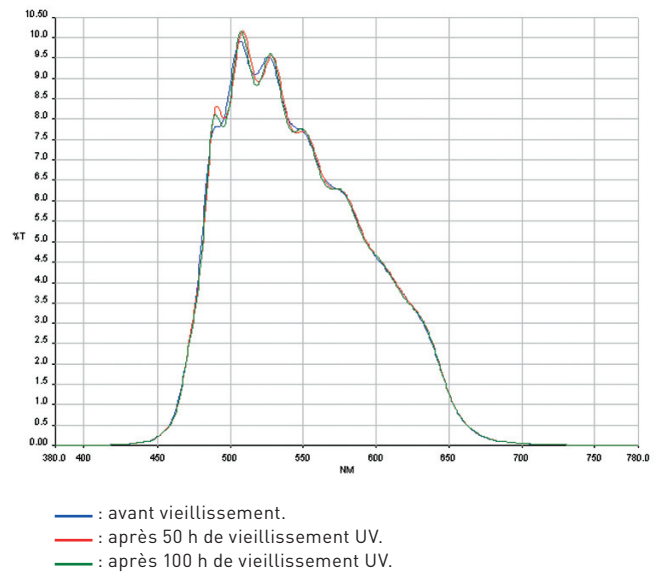


FIGURE 20

Filter 2 – Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état commuté le plus clair en fonction du vieillissement UV
 Filter 2 – Change in transmission factor (%) in clearest switched state with respect to UV aging

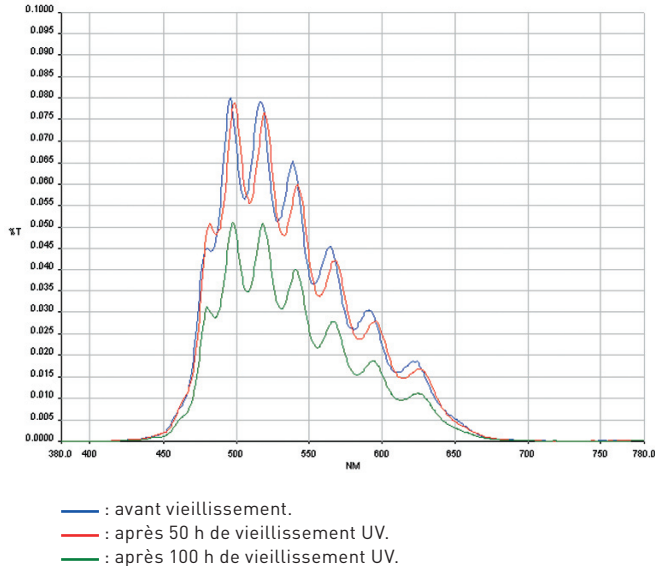


FIGURE 21

Filter 2 – Evolution du facteur de transmission (en %) à l'état commuté le plus foncé en fonction du vieillissement UV
 Filter 2 – Change in transmission factor (%) in darkest switched state with respect to UV aging

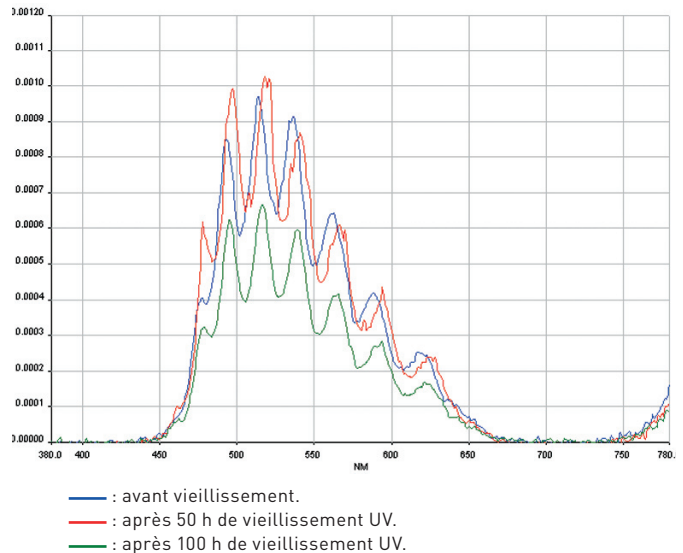


FIGURE 22

Évolution du facteur de transmission (en %) à l'état commuté le plus clair en fonction du vieillissement UV
 Change in transmission factor (%) in clearest switched state with respect to UV aging

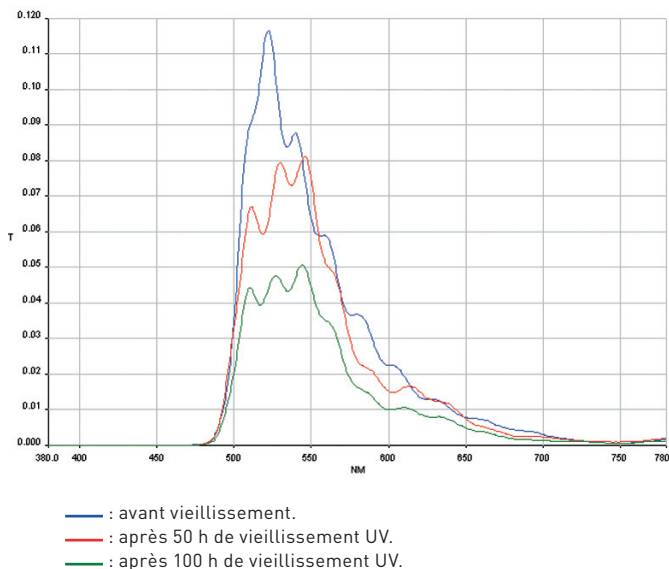


TABLEAU VII

Diffusion des filtres avant et après conditionnement en température
 Filter diffusion before and after temperature conditioning

| Modèle de filtre | Mesure de diffusion en $cd/(m^2 \cdot lx)$ | | |
|-----------------------|--|-------------------------------|------------------------------|
| | Avant conditionnement | Après conditionnement à +55°C | Après conditionnement à -5°C |
| Filtre 1 - état clair | 1,50 | 1,49 | 1,29 |
| Filtre 1 - échelon 9 | 1,41 | 1,44 | 1,40 |
| Filtre 1 - échelon 12 | 1,60 | 1,78 | 1,73 |
| Filtre 2 - état clair | 0,31 | 0,36 | 0,32 |
| Filtre 3 - état clair | 0,86 | 0,89 | 0,82 |
| Filtre 4 - état clair | 0,13 | 0,13 | 0,19 |

VARIATION DE LA DIFFUSION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

L'objectif de cet essai est d'évaluer l'influence de la température sur la diffusion du filtre.

Des filtres neufs ont été conditionnés à des températures de +55°C ou -5°C pendant 60 minutes. Comme pour le vieillissement UV, les essais ont été réalisés sans les écrans de garde. La mesure de diffusion a été réalisée dès la sortie de l'enceinte climatique. L'exiguïté

de la chambre de mesure du banc de diffusion, empêche le déclenchement de la commutation des filtres. Toutes les mesures ont donc été réalisées à l'état clair, sauf pour le filtre 1 pouvant être forcé manuellement à l'état foncé.

Les résultats se trouvent dans le *Tableau VII*.

Aucune évolution significative de la diffusion en fonction de la température n'est constatée.

VARIATION DU TEMPS DE COMMUTATION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

L'objectif de cet essai est d'évaluer la variation du temps de commutation des filtres en fonction de la température.

La norme EN 379 définit le temps de commutation t_s d'un filtre de soudage automatique par l'intégrale suivante :

$$t_s = \frac{1}{\tau_1} \int_{t_0}^{t_1} \tau(t) dt$$

où :

τ_1 est le facteur de transmission dans le visible à l'état clair,

t_0 est le moment d'amorçage de l'arc,

t_1 est le moment où le facteur de transmission dans le visible devient égal à 3 fois le facteur de transmission dans le visible à l'état le plus foncé.

$\tau(t)$ est le facteur de transmission dans le visible à un moment t après l'amorçage de l'arc de soudage. Le facteur de transmission est le rapport du flux lumineux transmis par le filtre sur le flux lumineux incident.

Dans cette étude, nous évaluons la variation, en fonction de la température, du temps entre le déclenchement de l'arc et le moment où le filtre atteint une valeur de transmission égale à trois fois celle de son état foncé lorsqu'il est stabilisé. Les essais ont été effectués aux températures de -5°C , $+5^\circ\text{C}$, $+10^\circ\text{C}$, $+23^\circ\text{C}$, $+30^\circ\text{C}$ et $+55^\circ\text{C}$, sur les filtres 1, 2 et 3.

Le temps de commutation des filtres a été mesuré à l'aide du banc d'essai décrit ci-après raccordé à une enceinte climatique (cf. *Figure 25*) utilisée pour maintenir les filtres à la température désirée.

La *Figure 23* donne le schéma de principe du banc de commutation.

Le banc est constitué d'un premier faisceau comprenant une première source de lumière, le filtre commutable et un premier détecteur mesurant la quantité de lumière traversant le filtre.

FIGURE 23

Schéma de principe du banc de commutation Flow diagram of switching bench

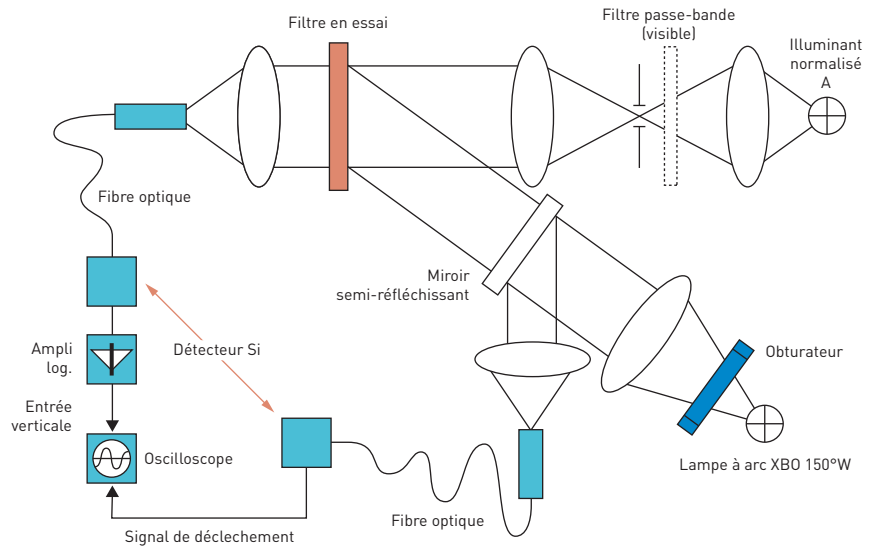
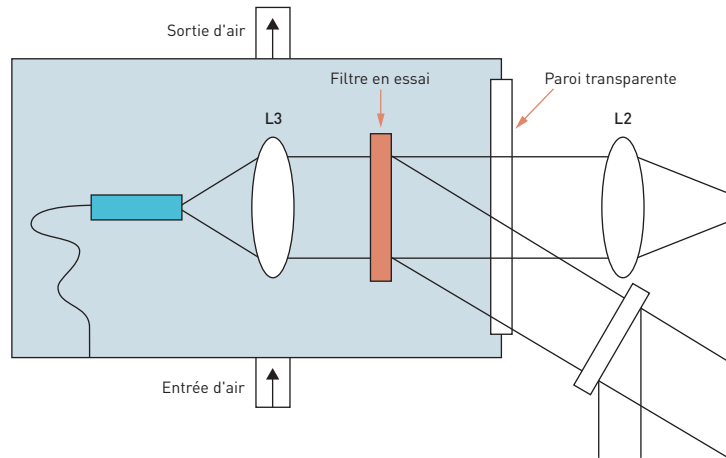


FIGURE 24

Schéma de la chambre de mesure Diagram of measuring chamber



Le très faible niveau du signal mesuré, par rapport à la lumière ambiante, a nécessité un encoffrement complet de cette partie du banc (source - filtre - détecteur).

Un deuxième faisceau est destiné à faire commuter le filtre. Il est composé d'une deuxième source de lumière et d'un obturateur, alignés sur les cellules de détection du filtre. Un diaphragme, positionné derrière l'obturateur, permet de limiter la taille du faisceau et, ainsi, d'obtenir une commutation rapide et franche. Du fait des contraintes de confinement des échantillons, la partie

électronique de l'écran de soudage a été désolidarisée de la chambre de mesure. Un miroir semi-réfléchissant renvoie une partie du faisceau sur le deuxième détecteur.

Le temps de commutation est mesuré à l'aide d'un oscilloscope numérique. Il relève la courbe de déclenchement de l'obturateur donnée par le deuxième détecteur et la courbe de transmission du filtre mesurée par le premier détecteur. Un premier marqueur est positionné sur le front de déclenchement de l'obturateur. La détermination préalable du niveau de signal correspondant

FIGURE 25

Vue du banc relié à l'enceinte climatique

View of switching bench connected to climatic enclosure

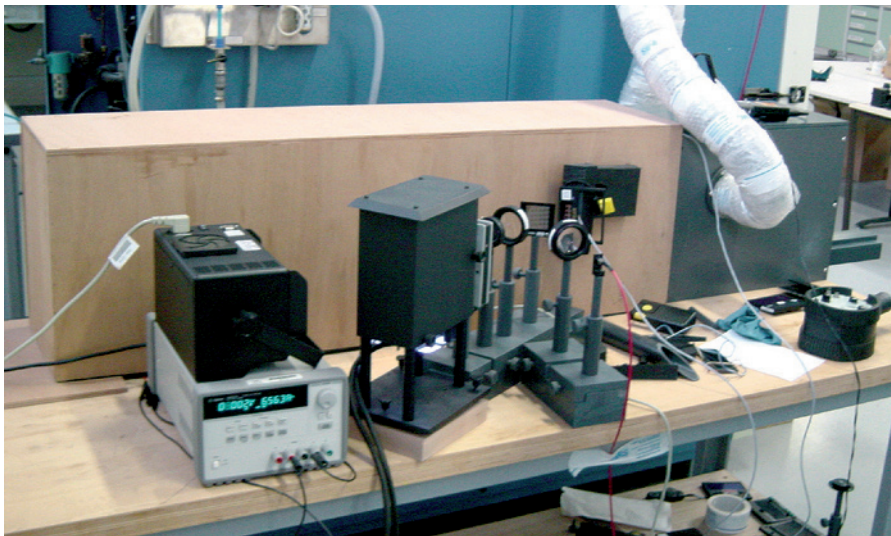
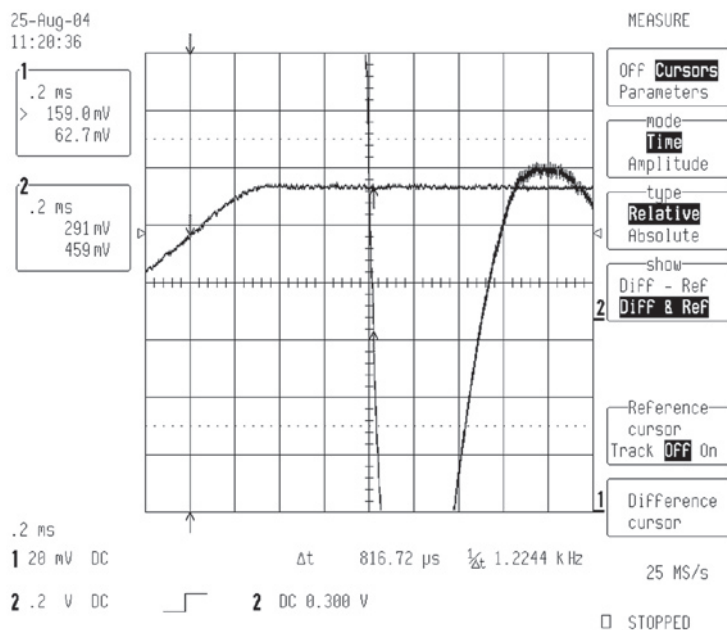


FIGURE 26

Mesure de la variation du temps de commutation

Measurement of switching time variation



à l'état foncé, permet de positionner le second marqueur à une valeur de transmission spécifiée dans la norme EN 379, c'est-à-dire 3 τ de l'état foncé. Le temps de commutation est calculé par la différence d'abscisses des deux marqueurs.

Le calibrage du signal de la courbe de transmission du filtre est effectué à

l'aide de filtres minéraux d'échelon 3 à 13 mesurés préalablement avec le spectrophotomètre. Ils permettent d'établir une correspondance entre le niveau de signal et le gain sur l'oscilloscope, d'une part, et la valeur de transmission dans le visible, d'autre part.

Pour mesurer les temps de commutation dans les différentes conditions de

température, l'écran se trouve dans une chambre de mesure (cf. Figure 24) conditionnée en température. Celle-ci est branchée sur une enceinte climatique générant un flux d'air à la température souhaitée. Elle est en PVC rigide et isolée par un habillage constitué d'une couche de polystyrène expansé recouverte de mousse de PVC de couleur noire évitant au maximum les réflexions lumineuses. L'éloignement de la source de température nécessite une isolation de la tuyauterie. La température de conditionnement dans la chambre est vérifiée à l'aide d'un thermomètre.

Pour éviter la formation de la condensation sur les surfaces vitrées de la chambre d'essais lors des tests aux températures basses jusqu'à -5°C , nous avons utilisé des produits tensioactifs (savon liquide).

Les différents essais ont tous été réalisés pour une commutation de l'état clair (échelon 3 ou 4) à l'état commuté le plus clair (échelon 9 ou 10). Les limites des instruments (vitesse de l'obturateur et dynamique d'amplification des détecteurs) n'ont pas permis de faire cette même mesure lors de la commutation à l'état le plus foncé (échelon 13).

La Figure 26 donne le relevé d'une mesure de temps de commutation. La courbe supérieure montre la lumière reçue par la cellule lors du déclenchement de l'obturateur. La courbe inférieure donne l'évolution de la lumière transmise par le filtre au moment de la commutation. Le temps de commutation mesuré correspond à la différence de temps entre les déclenchements de l'obturateur et du filtre.

Le Tableau VIII présente les temps de commutation mesurés sur les filtres 1 à 3, à six températures différentes

Sur les filtres 1 et 2, nous constatons une légère augmentation du temps de commutation des filtres à cristaux liquides avec la baisse de la température, mais largement inférieure à la spécification de la norme EN 379, soit 200 ms pour un passage d'un échelon 4 à 9.

Le filtre 3 ne commute plus aux températures de $+5^{\circ}\text{C}$ et -5°C .

TABLEAU VIII

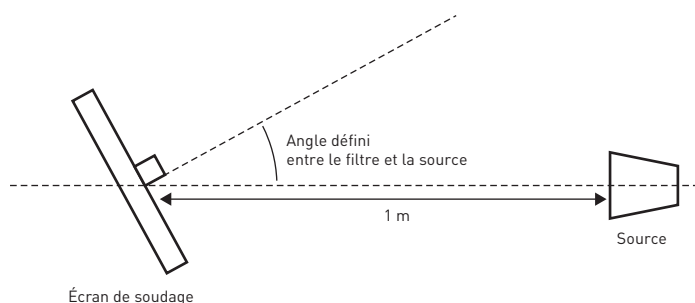
Temps de commutation en fonction de la température
Switching time with respect to temperature

| Températures d'exposition | + 55°C | + 30°C | + 23°C | + 10°C | + 5°C | - 5°C |
|---------------------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| Filtre 1 | 0.495 ms | 0.680 ms | 0.863 ms | 1,10 ms | 1,75 ms | 2,60 ms |
| Filtre 2 | 0.673 ms | 0.800 ms | 0.770 ms | 1,08 ms | 1,30 ms | 1,85 ms |
| Filtre 3 | 1.8 ms | 2.14 ms | 3,03 ms | 3,14 ms | NC | NC |

NC : le filtre ne commute plus aux températures de + 5°C et - 5°C.

FIGURE 27

Représentation schématique du montage
Diagrammatic representation of set-up



MESURES DU DÉCLENCHEMENT
DU FILTRE EN FONCTION DE L'ANGLE
D'INCIDENCE DE L'ARC

L'objectif est de déterminer l'angle d'incidence des rayons lumineux (arc de soudage) par rapport à la surface de l'écran, à partir duquel le filtre ne se déclenche plus, c'est-à-dire ne bascule plus de l'état clair à l'état foncé (cf. Figure 27).

Le filtre est disposé à une distance de 1 m d'une source de lumière pulsée, soit une valeur supérieure à la distance normale entre le filtre et l'arc lors d'opérations de soudage.

La source devant générer le déclenchement est un stroboscope Perkin-Elmer® de type MVS-5410-01. Il permet un réglage compris entre 35% et 100% de la valeur nominale de décharge de 1 J. L'énergie est fixée au minimum, soit 0,35 J, énergie très inférieure à celle d'un arc de soudage. Les essais ont été effectués dans le noir, dans une position limitant au maximum les réflexions de l'éclair, à la fréquence de 1 Hz pour

permettre une commutation de l'écran entre chaque flash.

Les essais réalisés sous 3 angles, +/- 45°, +/- 90°, 180° (de dos) ont permis de déclencher les trois modèles de filtres 1, 3 et 4 avec leur sensibilité réglée au minimum.

Les filtres 1, 3 et 4 déclenchent quel que soit l'angle, y compris à 180° (dos à la source), en raison des réflexions de l'environnement.

Avec le filtre 2, le déclenchement s'effectue correctement jusqu'à un angle de +/- 55° avec la normale, quel que soit le réglage de sensibilité. Mais cet angle est supérieur à la limite normale d'utilisation définie au maximum à 45°.

En conclusion, les différents systèmes de déclenchement présents sur les filtres sont suffisamment sensibles et performants pour garantir la sécurité des soudeurs.

CONCLUSION

L'objectif de l'étude, objet de cet article, était de vérifier l'efficacité des filtres de soudage commutables pour protéger contre les risques encourus lors des travaux de soudage, et de valider les spécifications de la norme EN 379. L'étude a porté plus particulièrement sur l'évolution des caractéristiques de transmission, de diffusion et du temps de commutation dans différentes conditions d'essais.

L'analyse bibliographique a permis de décrire précisément la composition des filtres de soudage commutables. Ils sont constitués d'un filtre dit passif coupant les rayonnements infrarouges et ultraviolets, d'une part, et d'un filtre dit actif coupant les rayonnements visibles, d'autre part.

La diffusion des écrans testés ne varie pas après un conditionnement thermique à - 5°C et + 55°C. Elle augmente sensiblement après un vieillissement UV. Mais cette augmentation est suffisamment faible pour ne pas entraîner de dépassement des spécifications de la norme EN 379.

Sur les filtres protégés par un verre minéral, aucune variation des caractéristiques de la transmission n'a été observée après vieillissement UV. Sur un filtre muni d'un écran de protection en matière organique, une légère variation a été constatée, mais tout en restant dans les limites de l'échelon du filtre.

Le déclenchement du passage de l'état clair à l'état foncé, commandé par les 2 ou 4 cellules selon les modèles, est très performant. Seul un modèle ne bascule pas si l'angle entre la surface de l'écran et la source (arc de soudage) est supérieur à 55°. Mais cette valeur ne présente pas de risque particulier pour l'opérateur puisqu'elle est très supérieure aux conditions d'utilisation normale.

Sur deux filtres, le temps de commutation augmente sensiblement avec la diminution de température et inversement. Mais dans les conditions d'essai de cette étude (commutation de l'état clair, à un échelon 4 ou 5, à l'état foncé correspondant à un échelon 9), le temps de commutation aux basses températures reste très inférieur aux limites prévues dans la norme EN 379.

En revanche, un troisième filtre ne commute plus aux températures de + 5°C et - 5°C.

Cette étude a mis en évidence la très forte chute d'efficacité des filtres lorsque l'angle d'incidence des rayonnements atteint des valeurs de 30° ou plus. La norme préconise des mesures de transmission avec des incidences jusqu'à 15°, valeur pouvant être facilement dépassée dans des conditions normales de travail ;

un soudeur est susceptible de travailler avec un angle estimé au maximum à 30°. Il est donc nécessaire de vérifier la transmission des filtres avec des angles d'incidence jusqu'à 30° et de réviser la norme EN 379 dans ce sens.

Reçu le : 05/04/2007

Accepté le : 05/07/2007

BIBLIOGRAPHIE

[1] EN 379 : 2003 – Protection individuelle de l'œil – Filtres de soudage automatique, CEN, septembre 2003, 25 p.

[2] SUTTER E., MOLLER W. – Starting times of electro-optical filters, *Zbl Arbeitsmed* 38, 1988, pp. 36-45.

[3] MAYER A., GROS P. – Filtres de soudage électro-optiques - Temps de réponse et limites d'emploi, *Cahier de notes documentaires N° 131*, 1988, pp. 303-313.

[4] EN 165 : 2005 – Protection individuelle de l'œil – Vocabulaire, CEN, novembre 2005, 77 p.

[5] EN 169 : 2002 – Protection individuelle de l'œil – Filtres pour le soudage et les techniques connexes – Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée, CEN, novembre 2002, 16 p.

[6] EN 168 : 2001 – Protection individuelle de l'œil – Méthodes d'essais autres qu'optiques, CEN, novembre 2001, 34 p.