

L'utilisation du rayonnement UV-A en contrôle non destructif

Le contrôle par ressuage et par magnétoscopie s'effectue souvent par l'intermédiaire de produits fluorescents, qui permettent un contrôle fiable, même en grande série, même pour la mise en évidence de discontinuités de très petite taille.

Cette technique impose l'emploi de sources UV.

Les buts de cet article sont :

- De rappeler ce que sont les UV.
- De rappeler ce qu'est la fluorescence.
- D'expliquer comment l'oeil humain fonctionne.
- D'étudier succinctement le projet de norme EN-1956.
- D'attirer l'attention sur les problèmes potentiels liés à la mise en oeuvre des rayonnements ultraviolets.

1. Le rayonnement ultraviolet dans le spectre électromagnétique :

Les rayons ultraviolets (UV en abrégé) sont un rayonnement électromagnétique situé entre l'extrémité violette du spectre visible et les rayons X mous.

La norme NF-C-O1-845 les classe en 3 familles :

- Les UV-A, de longueur d'onde comprise entre 315 nm et 400 nm.
- Les UV-B, de longueur comprise entre 280 nm et 315 nm.
- Les UV-C, compris entre 100 nm et 280 nm.

Les UV-A sont encore appelés UV proches ou longs, les UV-B, UV moyens, et les UV-C, UV lointains ou UV courts.

On verra, au paragraphe 5, que l'on divise maintenant les UV-A, pour des raisons essentiellement médicales, en UV-A longs, UV-A moyens et UV-A courts.

En contrôle non destructif par ressuage et magnétoscopie, on se sert des UV-A. Nous nous attacherons donc essentiellement à étudier cette partie du spectre.

2. La fluorescence :

La fluorescence est une propriété qu'ont de très nombreuses molécules d'absorber un rayonnement excitateur et de le transformer en :

- Un rayonnement visible émis de plus grande longueur d'onde.
- Un rayonnement "calorifique", de grande longueur d'onde (dans le domaine infrarouge).

Un colorant fluorescent, recevant par exemple un rayonnement excitateur de longueur d'onde 365 nm (UV-A), réémettra un rayonnement dans le domaine visible (par exemple rouge: donc, de longueur d'onde d'environ 760 à 780 nm), et un rayonnement dans l'infrarouge. Notons que la couleur d'onde réémise variera avec la longueur d'onde excitatrice : le même colorant, soumis à un rayonnement UV-C de 254 nm, peut très bien réémettre dans le jaune.

La fluorescence est un phénomène instantané : elle commence avec l'arrivée du rayonnement excitateur, et elle cesse immédiatement dès l'arrêt du rayonnement excitateur.

Etre recouvert de colorant fluorescent ne permet pas d'être visible la nuit, s'il n'y a pas un rayonnement excitateur qui, lui, peut être invisible. Les nouvelles sources d'éclairage pour voitures, qui existent sur certains

modèles haut de gamme (pour l'instant) émettent des UV-A qui, en excitant la fluorescence des vêtements due aux colorants incorporés dans le tissu, et surtout aux restes d'azurant optique provenant des lessives, rendent beaucoup plus visibles dans la nuit le cycliste, le piéton au bord de la route, etc...

Pour réémettre un rayonnement visible, la molécule doit cependant recevoir un niveau suffisant de rayonnement excitateur. Il faut aussi que le produit fluorescent réémette suffisamment de photons visibles pour que l'élément détecteur (en général l'oeil du contrôleur ou de la contrôlée) les détecte. C'est pourquoi on impose un niveau minimal d'éclairement énergétique UV-A, en dessous duquel la fiabilité peut être fortement affectée.

Il existe très souvent un phénomène de saturation de la fluorescence : même si on accroît l'éclairement énergétique UV-A, on n'accroît plus, ou pratiquement plus, la réémission du colorant. Ce phénomène est particulièrement net en ressuage, où des niveaux UV-A très élevés conduisent à une réémission blanc-bleuté plutôt que jaune-vert: le colorant est saturé, alors que l'azurant optique associé, lui, continue à accroître sa réémission. L'azurant émet en blanc-bleuté, et l'expérience montre qu'un éclairement énergétique UV-A trop élevé dégrade le rapport : signal/bruit (signal = l'indication utile, bruit = toutes les autres réémissions)

3. L'oeil :

Loin de nous l'idée de faire un cours complet sur l'oeil. Néanmoins, il semble indispensable de rappeler quelques paramètres du fonctionnement de l'oeil humain.

3.1. Acuité visuelle (pouvoir séparateur) :

L'oeil moyen est capable de distinguer 2 points séparés par une minute d'angle, soit 0,3 mm à 1 mètre. Rappelons que, bien entendu, ce pouvoir séparateur est le même sous éclairage UV-A : en effet l'oeil perçoit les photons jaune-vert émis par les colorants fluorescents utilisés en contrôle non destructif Sa performance est donc identique à ce qu'on obtient en lumière ordinaire.

3.2. Alignement :

L'oeil, détecteur d'informations, et le cerveau, système de traitement de signal, constituent un ensemble très performant pour déterminer, par exemple, que des indications linéaires sont alignées, et en déduire que, selon toute probabilité, on a affaire à une fissure partiellement refermée. Cette capacité à déterminer un alignement est très difficile à reproduire par ordinateur, surtout si les indications sont incurvées.

3.3. Rapport de contraste :

L'oeil est capable de mettre en évidence des rapports de contraste. C'est même là-dessus que l'on joue en ressuage et magnétoscopie : rouge contre blanc, noir contre blanc, jaune-vert fluorescent sur fond très foncé. Ces rapports de contraste sont particulièrement élevés avec des produits fluorescents. Cependant, si le "fond" est fluorescent lui aussi (bruit de fond dû à un rinçage insuffisant en ressuage, dû à l'accumulation de particules magnétiques pour des raisons géométriques en magnétoscopie, etc...), le rapport signal/bruit se dégrade très vite.

Un autre point important : l'oeil est capable de détecter de très faibles variations de luminosité, sous réserve que la luminosité des objets examinés soit faible. C'est pourquoi, par exemple, il est impossible de déterminer une chute de fluorescence de 50 % (entre un pénétrant neuf et un pénétrant en service) en mettant une goutte de chaque pénétrant sur un papier filtre (qui lui-même d'ailleurs est souvent fluorescent). Par contre, en diluant à 1/1000 chacun des pénétrants dans un solvant non fluorescent, on mettra aisément en évidence une différence inférieure à 10 %. Il est crucial de se rappeler deux points :

- L'oeil est très sensible au rapport de contraste, si la quantité de photons qu'il reçoit est faible
- Une indication fluorescente, en ressuage ou magnétoscopie, même si elle semble très brillante dans de bonnes conditions d'observation, émet un nombre de photons assez limité. Si on accroît le nombre de photons "parasites" (qu'ils viennent du bruit de fond sur la pièce, des sources de lumière UV, de fuites de lumière visible à travers un rideau dans une cabine UV, de la lumière visible réémise, en cabine UV, par de la peinture fluorescente sur les murs, ou la feuille blanche de consignes ou le calendrier accrochés sur les parois), il ne sera pas suffisant d'accroître le niveau d'UV-A pour "rétablir la situation" : on dégradera

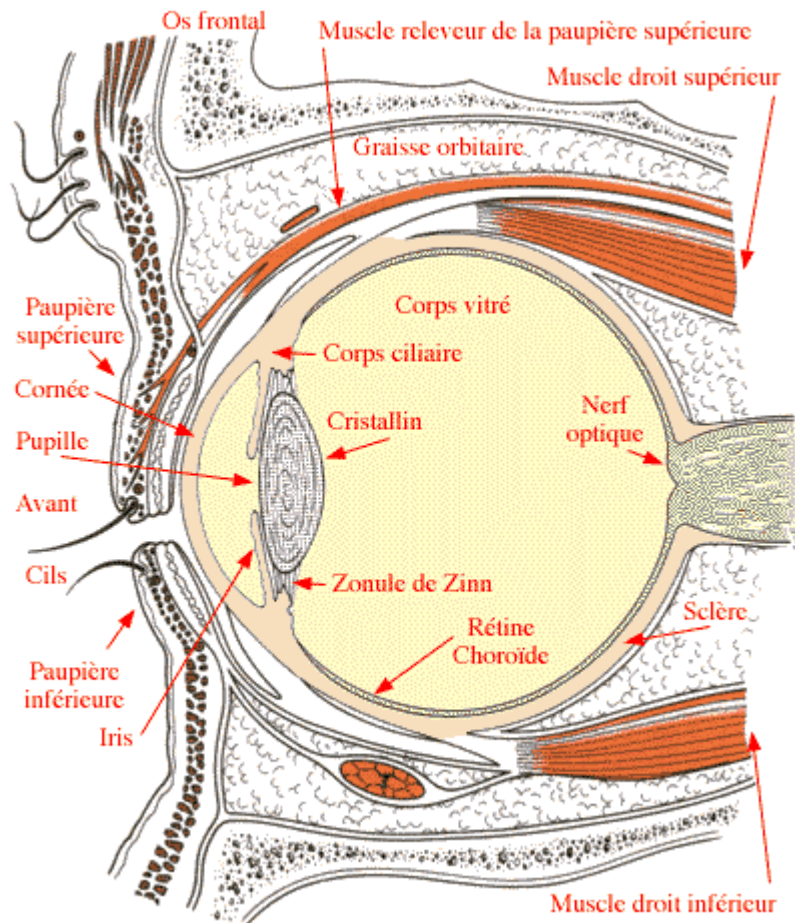
irréremédiablement le rapport signal/bruit, donc l'aptitude de l'opérateur à détecter une indication.

3.4. Sensibilité :

Contrairement à ce que pensent beaucoup, l'oeil humain est un des plus sensibles du règne animal : 3 à 4 photons suffisent à déclencher une information, si l'oeil est resté dans l'obscurité pendant une vingtaine de minutes.

Il est nécessaire de décrire l'oeil, et son fonctionnement, afin de comprendre pourquoi on doit par exemple respecter des durées d'adaptation, en entrant en cabine UV, pourquoi il ne faut pas augmenter inconsidérément l'éclairement énergétique UV-A, pourquoi il faut protéger l'oeil des UV-A.

3.4.1. Schéma de l'oeil :



3.4.2. Le cristallin :

Le cristallin est constitué de protéines, transparentes, capables de se déformer sous l'effet de muscles afin d'adapter la vergence (la " puissance optique ") de cette véritable lentille variable à la distance des objets à observer.

Au fil des ans, les protéines ont tendance à se polymériser, en donnant des macro molécules, qui deviennent plutôt translucides que transparentes, et sont moins souples que les protéines non polymérisées. Le cristallin est de moins en moins capable de se raccourcir et de s'épaissir pour accroître la vergence.

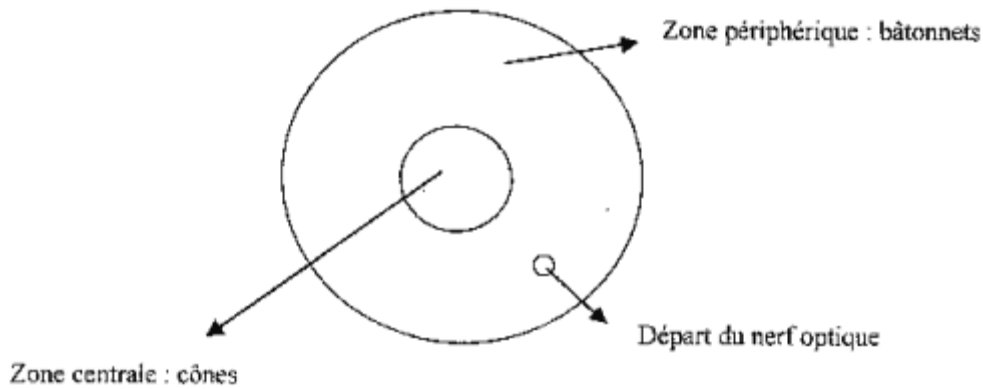
Le premier phénomène (polymérisation et perte de transparence) conduit à la cataracte.

Le second phénomène conduit à la presbytie (on ne peut plus voir de près).

3.4.3. La rétine :

La rétine comprend plusieurs zones

Rétine d'un oeil droit (vue de face)



Les deux zones qui nous intéressent particulièrement ici sont la zone centrale et la zone périphérique.

La zone centrale contient des cellules appelées cônes (en raison de leur forme), qui déterminent notre aptitude à différencier les couleurs. Trois types de cellules sont sensibles à trois couleurs différentes (mais pas selon les trois couleurs fondamentales). Les cônes sont relativement peu sensibles à la lumière il faut un nombre relativement important de photons pour exciter les cônes afin qu'ils produisent suffisamment de "réactifs" qui assureront la cascade de réactions chimiques entraînant finalement le signal de dépolarisation transmis par le nerf optique.

La zone périphérique contient des cellules appelées bâtonnets (là encore, en raison de leur forme).

Les bâtonnets sont très sensibles à la lumière, mais ne donnent qu'une vision en noir et blanc : nous sommes incapables de distinguer les couleurs s'il n'y a pas assez de photons. La nuit, tous les chats sont gris, c'est bien connu !

3.4.4. Adaptation :

Lorsque l'on passe d'une zone fortement éclairée à une zone faiblement éclairée, pendant un certain temps, on perçoit mal, voire pas du tout, les détails qui nous entourent: on se cogne dans une table, on se prend les pieds dans un obstacle. Puis, petit à petit, la "vision revient", et l'on perçoit très bien notre environnement.

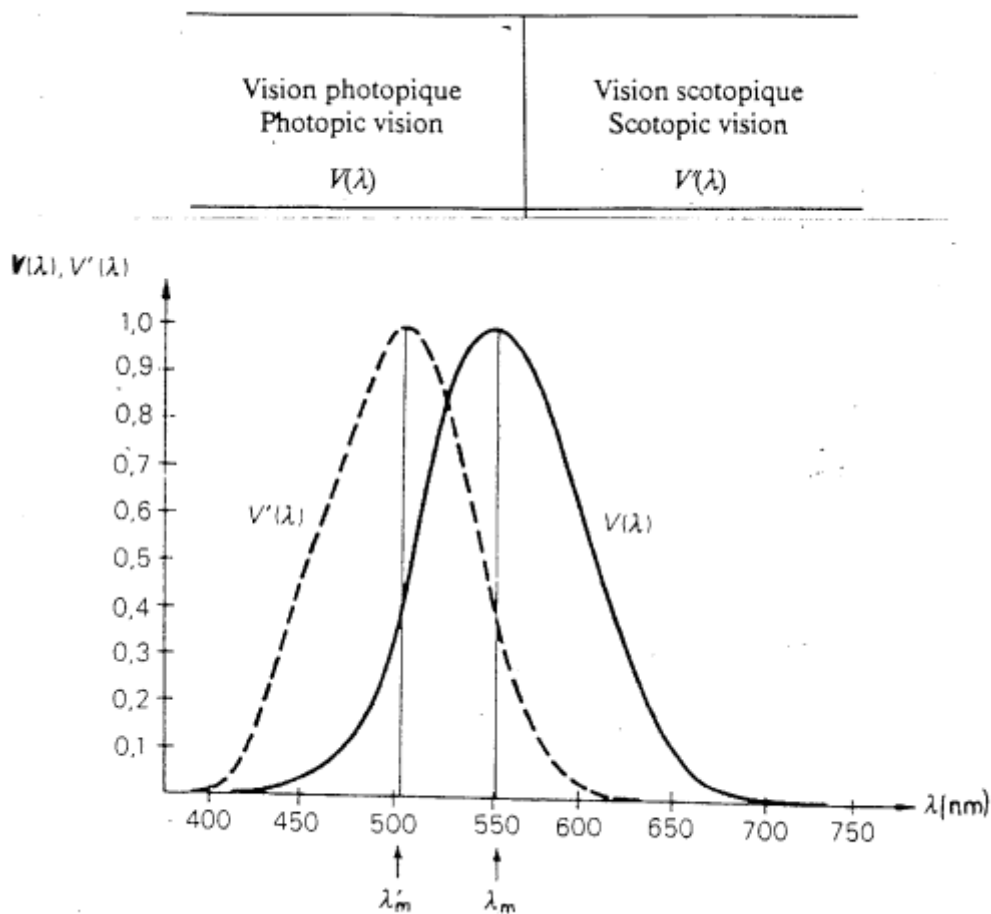
Inversement, lorsqu'on passe d'un lieu très peu éclairé à un lieu très fortement éclairé, on cligne des yeux, on est ébloui. Là encore, il faut que les yeux s'adaptent. N'entrons pas dans le détail des phénomènes chimiques en cause: on conçoit qu'il faille un certain temps pour que les cônes ou les bâtonnets entrent en service, selon la luminosité ambiante.

Afin de travailler dans de bonnes conditions, l'opérateur qui entre en cabine UV, où le niveau de lumière visible est faible, doit attendre de 2 à 5 minutes avant de commencer le contrôle. Il doit aussi éviter d'allumer une source de lumière visible en cabine UV, pour éviter l'effet d'éblouissement, et éviter ainsi une nouvelle période d'adaptation.

Rappelons aussi que les changements constants de niveau de lumière visible (d'éclairage lumineux) sont fatigants pour les yeux: il est préférable de travailler 90 minutes d'affilée en cabine UV, et de sortir 15 minutes, que d'entrer dans la cabine et en sortir fréquemment.

3.4.5. Sensibilité de l'oeil selon les couleurs :

La CEI a établi la courbe suivante, dite courbe de sensibilité de l'ail standard.



On voit donc que l'oeil est beaucoup plus sensible au jaune qu'à toute autre couleur, en vision photopique (lorsque les bâtonnets sont saturés), et qu'il y a un décalage vers les courtes longueurs d'onde (505 nm au lieu de 555 nm) sous faible éclairage lumineux (en vision scotopique).

Ce n'est donc pas par hasard que les colorants fluorescents utilisés en CND réémettent tous en jaune-vert. Les produits qui réémettent en rouge ou en orangé ne sont généralement pas homologués. Notons aussi que les colorants rouges utilisés en ressuage donnent de bons résultats par le contraste qu'ils génèrent sur le fond blanc.

3.4.6. Hypersensibilité au bleu :

Lorsqu'on examine les courbes du paragraphe 3.4.5., on observe qu'en vision scotopique, dans la partie bleu/violet du spectre, l'oeil standard est beaucoup plus sensible (relativement) qu'en vision photopique.

C'est un des problèmes en cabine UV: le filtre de Wood des sources laisse passer beaucoup de rayonnement violet et bleu, qui peut perturber la détection de très faibles indications. Cette hypersensibilité de l'oeil, dans ces conditions, n'est pas prise en compte par les luxmètres dont la courbe de réponse doit correspondre à la courbe standard en vision photopique.

L'hypersensibilité au bleu est une bonne raison pour porter des lunettes anti UV, lunettes qui atténueront sensiblement le nombre de photons bleus et violets atteignant les yeux.

4. Effets physiologiques des UV-A :

4.1. Effets sur l'oeil :

Les UV-A catalysent la polymérisation des molécules qui constituent le cristallin. On a vu, au paragraphe 3.4.2. que, au fur et à mesure du temps, le cristallin tend à s'opacifier: la vision devient trouble, de plus en plus. Ce phénomène est dû à la polymérisation des protéines du cristallin. Les UV-A, en accroissant cette polymérisation, vont donc accélérer l'apparition de la cataracte.

C'est une raison majeure de porter des lunettes anti UV, que ce soit en cabine d'inspection UV... ou au soleil.

4.2. Effets sur la peau :

Des essais, effectués par des dermatologues (par exemple, le Dr CESARINI à la Fondation Rotschild, à Paris), ont montré que les UV-A avaient des effets bien plus importants, plus marqués et plus longs qu'on ne le pensait il y a 30 ou 40 ans.

Des volontaires ont présenté leur dos à des sources UV-A dont les caractéristiques (spectre d'émission, répartition spectrale de l'énergie) étaient mesurées. Des filtres appropriés permettaient de s'affranchir de l'action des UV-B et C, du visible et de l'infrarouge.

Les effets ont été spectaculaires. Contrairement à ce qui se passe avec d'autres rayonnements, les UV-A, de plus grande longueur d'onde que les UV-B et UV-C, pénètrent plus profondément dans la peau, jusqu'au derme profond.

Contrairement aux UV-B qui, généralement, produisent des ponts oxygène entre différentes bases de la double hélice de l'ADN, sans casser l'ADN, les UV-A cassent assez aisément l'ADN, porteur du message génétique. Bien sûr, il existe dans les cellules des protéines réparatrices qui vont restaurer le brin cassé en lisant le brin d'en face, à raison de 4000 bases à la seconde. Cependant, cette réparation peut être imparfaite. Si la réparation conduit à une cellule non viable, cette cellule mourra. Si par contre la réparation conduit à une cellule viable mais anormale, cette cellule pourra avoir une descendance anormale. Et si l'ADN mal réparé conduit à une prolifération anarchique de cellules non différenciées, on fait apparaître un cancer, un mélanome malin.

4.3. Effets de la durée d'exposition et de l'intensité du rayonnement UV-A :

On conçoit aisément que, plus longtemps on restera sous un rayonnement intense, plus on accroîtra les risques.

On mesure la puissance énergétique en W/m^2 , et l'énergie reçue, en un temps donné, en Joules (J). Les nombreux essais menés par les dermatologues amènent aux paramètres suivants :

- pour une exposition de 5 à 6 heures par jour, 4 à 5 Jours par semaine, pour environ 42 à 45 semaines par an, les mains ne devraient pas être exposées à plus de 40 à 50 W/m^2 (4000 à 5000 $\mu W/cm^2$).

4.4. Moyens de protection :

Outre les lunettes anti UV, qu'il est indispensable de porter en cabine UV (à moins que les lunettes de vue que beaucoup portent soient efficaces) il faut absolument porter des vêtements longs, se couvrir le corps, et porter des gants lorsque c'est possible.

Est-ce tout ?

Il y a une zone du corps qui est souvent très exposée, et à laquelle peu d'utilisateurs pensent: les hommes (les femmes sont souvent moins touchées) se "dégarnissent", parfois même lorsqu'ils sont jeunes. Le front, le sommet du crâne, sont des zones qui peuvent être exposées à des niveaux d'UV très élevés en cabine UV, et pendant de longues périodes. Le port d'une casquette est plus que conseillé !

5. Les normes et spécifications applicables :

Depuis de nombreuses années, les normes, spécifications, procédures de contrôle, précisent les conditions dans lesquelles on doit effectuer la lecture des pièces en contrôle magnétoscopique ou en ressuage à l'aide de produits fluorescents.

Cependant, souvent, ces document n'abordent quasiment pas les conditions de sécurité à observer.

5.1. Éclairement énergétique UV-A :

5.1.1 Valeur minimale :

Dans tous les documents figure une valeur minimale de l'éclairement énergétique UV-A à obtenir sur la surface des pièces à contrôler. L'ensemble des normes internationales fixe cette valeur à 10 W/m^2 ($1000 \mu\text{W/cm}^2$). Certains donneurs d'ordre imposent davantage (par exemple : 15W/m^2 , soit $1500 \mu\text{W/cm}^2$).

5.1.2 Valeur maximale :

Le projet de norme européenne EN 1956. Viewing conditions, pour le contrôle ressuage, limite à 50W/m^2 (soit $5000 \mu\text{W/cm}^2$) l'éclairement énergétique UV-A, valeur mesurée sur la surface des pièces. Cette limite est fixée pour des raisons techniques, et non pour des raisons de sécurité.

Pour le contrôle magnétoscopique, aucune limite supérieure n'a été indiquée.

5.2. Lumière visible :

5.2.1. Lumière visible et lumière blanche :

La lumière visible, par définition, est visible, et peut donc être colorée : une lumière rouge est visible.

La lumière blanche correspond à un équilibre de différentes longueurs d'ondes, conduisant à l'impression de blanc.

La lumière blanche est donc visible, mais la lumière visible n'est pas nécessairement blanche. En cabine UV, notamment, on a une forte proportion de bleu et de violet: ces deux couleurs proviennent des sources UV, et vont fortement parasiter la perception des faibles indications jaune-vert des produits fluorescents : en effet, en faible luminosité, l'oeil est proportionnellement beaucoup plus sensible au bleu et au violet qu'en luminosité normale.

On mesurera donc le niveau de lumière visible en cabine UV, mais pas le niveau de lumière blanche... puisque globalement la lumière en cabine UV n'est pas blanche...

5.2.2 Eclairement lumineux admissible :

La plupart des documents imposent moins de 20 lux. Rappelons que les luxmètres doivent avoir une courbe de réponse très proche de celle de l'oeil standard en vision photopique, alors que la mesure est effectuée en condition de vision scotopique.

5.2.3. Comment effectuer la mesure de lumière visible ?

Il semble pour le moins judicieux de :

- Effectuer la mesure toutes sources UV-A en service depuis 10 minutes au moins, afin que les lampes à décharge aient atteint les conditions optimales de fonctionnement.
- Mesurer sur la surface des pièces à contrôler, car c'est là que les yeux se dirigeront, et c'est de là que viendront les photons jaunevert des indications fluorescentes.
- Éventuellement, effectuer aussi des mesures au niveau des yeux des opérateurs.

En résumé, il est indispensable d'effectuer la mesure de lumière visible **DANS LES CONDITIONS RÉELLES D'OBSERVATION.**

A quoi sert-il de mesurer la lumière visible émise par les sources UV seules, puisque dans la cabine, il y aura différentes sources de lumière visible ?

Ce qui importe vraiment, c'est de faire les mesures (qu'il s'agisse d'ailleurs de l'éclairement énergétique UV-A

sur la surface des pièces ou de l'éclairage lumineux) dans les conditions dans lesquelles l'opérateur va travailler : seul cela compte, et non une situation artificielle où, par exemple, on ferait la mesure d'UV-A avec une distance source UV détecteur UV de 30 cm, alors que dans la pratique la distance source UV pièce examinée serait de 50 cm (situation réelle vécue!).

6. Conclusion :

Rappelons les points essentiels de ce document :

- Les UV-A sont des rayonnements de plus courte longueur d'onde que le visible. Ils transportent donc plus d'énergie (chaque photon est plus énergétique que n'importe quel photon visible).
- La fluorescence est une réaction que possèdent de très nombreuses molécules.
- La fluorescence commence avec l'arrivée du rayonnement excitateur, et cesse dès l'arrêt de ce rayonnement.
- L'oeil humain détecte très bien les rapports de contraste. L'emploi de produits fluorescents permet d'obtenir un très grand rapport de contraste.
- L'oeil humain est très sensible. Pour détecter les quelques photons émis par une faible indication, il doit fonctionner à l'abri des photons visibles "parasites", d'où le travail en cabine UV, avec très peu de lumière visible.
- Les UV-A présentent des risques : il faut protéger les yeux et la peau et éviter les expositions inutiles.
- Il est souvent inutile de disposer d'éclairage énergétique UV-A très élevé: une valeur maximale de 50 W/m² à la surface des pièces semble raisonnable, avec un éclairage lumineux de 20 lux maximum, mesuré sur la surface des pièces et au niveau des yeux, dans les conditions réelles d'observation. Augmenter parallèlement l'éclairage énergétique UV-A et le niveau de lumière visible ne peut conduire qu'à une perte d'aptitude à la détection d'indications fines ou faibles.

Babb ✓ *Co*