

SOURCES ARTIFICIELLES DE LUMIÈRE

C. PIÉRARD-FRANCHIMONT (1), P. PAQUET (2), F. HENRY (3), G.E. PIÉRARD (4)

RÉSUMÉ : Les sources artificielles de lumière sont nombreuses. Elles délivrent un spectre plus ou moins limité de longueurs d'onde. La dosimétrie des rayons ultraviolets permet de contrôler la quantité d'énergie débitée.

MOTS-CLÉS : *Laser - Lumière - Ultraviolet*

MÉCANISMES DE PRODUCTION DE LA LUMIÈRE

La lumière peut être produite par deux mécanismes différents appelés incandescence et fluorescence, phénomènes qui sont souvent associés en pratique.

L'incandescence est l'expression du principe selon lequel une agitation thermique s'accompagne d'une émission de photons. L'énergie acquise par un atome excité peut être perdue spontanément par retombée sur un niveau inférieur. Cette perte d'énergie donne lieu à l'émission incohérente d'un rayonnement électromagnétique (Fig. 1). Ce dernier est donc une forme fondamentale d'énergie qui combine les propriétés d'ondes dues à l'alternance d'un champ électrique et magnétique, et des propriétés de particules puisque l'énergie est transportée «en petits paquets» ou quanta d'énergie appelés photons. Au cours de l'incandescence, les photons sont émis indépendamment les uns des autres, à un instant quelconque et pendant une durée très brève. Il n'y a donc pas de relation de phase, de direction et de polarisation entre toutes ces émissions.

L'incandescence obéit à la loi des corps noirs qui s'applique à tout objet idéal absorbant la totalité de l'énergie qu'il reçoit et émettant un rayonnement incandescent. Son spectre est continu et est défini par la température. Plus cette dernière est élevée, plus l'émission s'étend vers les courtes longueurs d'onde et plus l'énergie totale émise est élevée. Les lampes à incandescence sont caractérisées par leur température de couleur qui indique la température du corps noir qui aurait le même spectre d'émission. Pour obtenir une émission proche du spectre solaire par incandescence, il faudrait obtenir la température de l'étoile, ce qui est impossible.

La fluorescence résulte d'une diminution du niveau énergétique d'électrons instables. L'émis-

ARTIFICIAL SOURCES OF LIGHT

SUMMARY : The artificial light sources are numerous. They emit a more or less delimited spectrum of wavelengths. Ultraviolet light dosimetry allows to control the amount of delivered energy.

KEYWORDS : *Laser - Light - Ultraviolet light*

sion de photons les ramène de façon instantanée à l'état stable. Lorsque le passage de l'atome à l'état excité est dû à l'absorption d'un photon, la fréquence de la radiation émise est toujours inférieure à celle de la radiation excitatrice. Les états énergétiques de la matière étant discontinus, le spectre l'est aussi et se présente en raies.

CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES LUMINEUSES

Une source lumineuse est caractérisée en partie par sa puissance, qui est l'énergie débitée par unité de temps exprimée en watts (W) ou joules par secondes (J/s). La deuxième caractéristique physique est la luminance énergétique (L) ou éclairement énergétique représentant le flux énergétique par unité de surface émettrice (m²) et par unité d'angle solide d'émission (sr, stéradian). Elle s'exprime en W/m²/sr. Pour les sources polychromatiques, la luminance dépend de la nature des photons. La luminance spectrale (L λ) caractérise le rayonnement dans chaque portion des longueurs d'onde du spectre. La variation de L λ en fonction de λ représente le spectre de la source.

Les sources lumineuses émettant de la lumière ultraviolette (UV) et qui sont destinées à l'usage thérapeutique sont classées parmi les appareils de type UV2 et UV4. Ces appareils de type UV2 et UV4 sont réservés à un usage thérapeutique et ne peuvent être utilisés que sur prescription médicale et sous la responsabilité d'un médecin. Ils ne peuvent être vendus au public, ni mis à sa disposition.

Un appareil UV2 est défini comme étant un appareil comportant un émetteur UV tel que l'effet biologique est causé par des rayonnements de longueurs d'onde inférieures et supérieures à 320 nm, et caractérisé par un éclairement élevé dans la gamme de 320 nm à 400 nm, et dont l'éclairage effectif est situé entre 0,0005 et 0,15 W/m² pour les longueurs d'onde de 250 à 320 nm, et supérieur ou égal à 0,15 W/cm² pour les longueurs d'ondes de 320 à 400 nm.

Un appareil UV4 est défini comme étant un appareil comportant un émetteur UV tel que

(1) Chargé de Cours adjoint, Chef de Laboratoire,
(2) Chercheur qualifié, (3) Assistant de Recherche,
(4) Chargé de Cours, Chef de Service, CHU du Sart Tilman, Service de Dermatopathologie

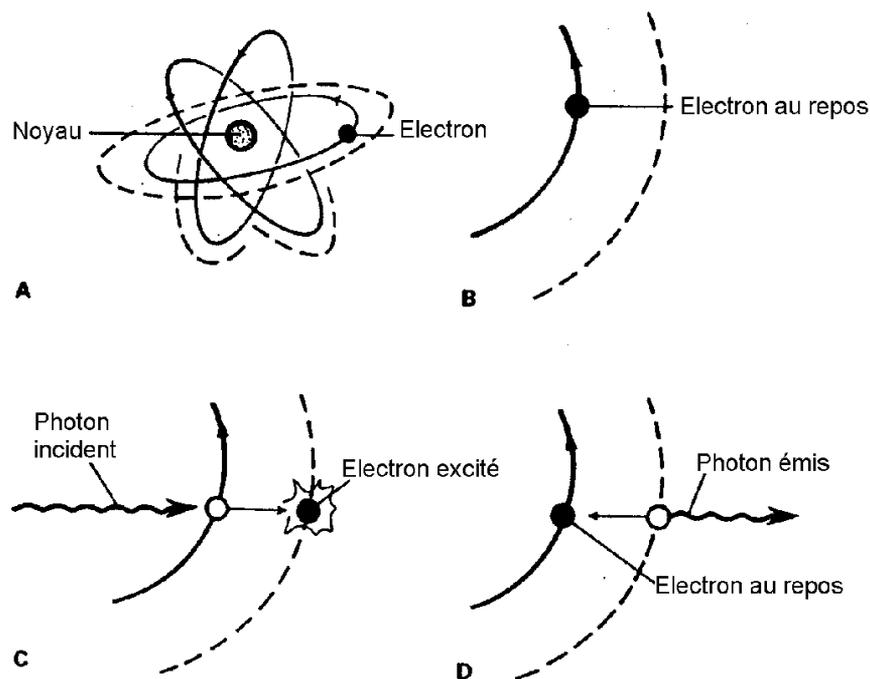


Fig. 1 : Représentation schématique du principe de capture et de libération d'énergie lumineuse par un atome

l'effet biologique est principalement causé par des rayonnements de longueurs d'onde inférieures à 320 nm, et dont l'éclairement effectif est supérieur ou égal à $0,15 \text{ W/m}^2$ pour les longueurs d'onde de 250 à 320 nm, et inférieur à $0,15 \text{ W/m}^2$ pour les longueurs d'onde de 320 à 400 nm.

A) LAMPE AU XÉNON ET SIMULATEUR SOLAIRE

La lampe au xénon est une lampe à arc à haute pression dans une enveloppe en quartz perméable aux UVB et aux longueurs d'onde supérieures. Les lampes à arc court (distance entre les électrodes de quelques mm) fournissent un éclairement homogène. L'alimentation électrique se fait en courant continu. L'amorçage nécessite une tension de 20 à 40 kV pendant un temps court afin d'ioniser le xénon entre les électrodes. La lampe en fonctionnement génère une quantité notable d'ozone nécessitant un dispositif d'évacuation étanche.

Le rayonnement continu de 240 à 1300 nm et d'une température de 6000 K est proche de celui du spectre solaire. Il est donc mis à profit pour réaliser des simulateurs solaires. Par définition, ce type d'appareil produit des UV, la lumière visible et des IR dans les mêmes proportions que celles du rayonnement solaire. Comme ce dernier varie selon la saison, le moment du jour, la latitude et l'altitude, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a défini les caractéristiques d'un soleil standard.

Pour des applications en biologie, un simulateur solaire utilise une lampe au xénon dont le spectre est interrompu à ses deux extrémités. Un système de filtres coupe le rayonnement UVB court pour être conforme à l'effet de l'ozone stratosphérique. Les miroirs dichroïques remplacent avantageusement le filtre à eau pour absorber les raies IR du xénon. L'émission en UVA est importante dans un tel équipement. L'usage des fibres optiques en faisceaux ou sous forme de guides liquides pour amener le rayonnement jusqu'à la peau confère à certains appareils une grande souplesse d'utilisation. L'éclairement dans l'aire d'irradiation n'est cependant pas uniforme, ce qui peut représenter une difficulté technique à résoudre au mieux.

B) LAMPE À VAPEUR DE MERCURE

Un arc électrique induit dans une lampe à vapeur de mercure provoque l'émission d'un rayonnement discontinu de fluorescence. Selon la pression du gaz dans la lampe, les raies émises sont différentes, la raie de base étant celle du mercure à 254 nm.

Les lampes à basse pression (10^{-4} atmosphère) émettent essentiellement la raie à 254 nm du mercure avec d'autres raies à 435 et 564 nm responsables de la couleur bleu-vert de ces lampes en fonctionnement. Ces équipements germicides sont utilisés dans des locaux inoccupés, car l'émission d'UV est également dangereuse pour l'homme et les animaux.

Les lampes à moyenne pression (1 atmosphère), dites fluorescentes, émettent en plus de la raie à 254 nm du mercure, d'autres raies à 260, 297 et 302 nm, ainsi que des raies importantes dans l'UVA et le spectre visible. Elles sont surtout disponibles sous forme de tubes équipés de ballasts individuels pour l'amorçage. Ce sont les lampes utilisées en photothérapie et pour l'éclairage. La pulvérisation de différents mélanges de sels métalliques appelés phosphor sur la face interne superpose un rayonnement continu au spectre de raies. Le rayonnement lumineux émis par un tube à fluorescence n'est cependant jamais homogène sur toute la longueur du tube, l'émission étant plus importante au centre.

Les lampes d'éclairage émettent un spectre continu dans le visible avec cependant des raies de 313 nm et 365 nm, voire 302 nm. Les faibles quantités d'UV émises n'équivalent qu'à une infime fraction de la quantité d'UV reçue communément. Au travail et au domicile, les lampes à halogène ou à filament de tungstène trouvent des applications toujours plus nombreuses. Elles émettent suffisamment d'UV pour occasionner à courte distance des lésions importantes si elles ne possèdent pas de dispositif de protection adéquat. En revanche, les filtres dont elles sont normalement pourvues arrêtent une bonne partie du rayonnement potentiellement nocif.

Des lampes à lumière UV émettent un spectre étroit centré à 313 nm et l'enveloppe en pyrex élimine les UV de moins de 280 nm. Leur puissance maximale est de 5 mW/cm². D'autres lampes ont un spectre d'émission plus large situé pour 60% dans les UVB et 40% dans les UVA. Ces lampes à spectre large ou étroit sont utilisées pour la photothérapie UVB.

Le type de lampe black light émet un spectre continu centré à 365 nm, l'enveloppe en verre de Wood (Ni-Co) coupe le rayonnement visible et les UVB. La lumière noire de ces lampes est composée essentiellement d'UVA. Elle est fréquemment utilisée pour des effets spéciaux, par exemple dans les discothèques, pour détecter la fausse monnaie et pour contrôler des documents. Les lampes émettant de la lumière noire n'occasionnent pas une exposition significative de l'Homme aux UV, mais peuvent néanmoins jouer un rôle néfaste dans certaines lucites.

Les lampes à basse pression utilisées pour la photothérapie UVA1 et dans les bancs solaires émettent entre 320 et 700 nm avec un pic à 352 nm (1-5). Elles délivrent une irradiance UVA proche de celle du Soleil associée à 1 à 3% d'UVB. Leur puissance maximale atteint 25

mW/cm². Elles contiennent un réflecteur incorporé qui privilégie le rayonnement dans une direction. Leur utilisation régulière dans des solariums contribue notablement à l'exposition annuelle totale.

Les lampes à haute pression (30 à 50 atmosphères) superposent au contingent de raies un spectre continu de grande énergie dans les UVA et le visible. Pour la photothérapie UVA1, le spectre est arrêté sous 340 nm et la puissance maximale peut atteindre 60 mW/cm². L'irradiance UVA est 10 à 25 fois supérieure à celle de la lumière solaire.

C) POSTE À SOUDURE

Dans l'industrie, une source majeure d'UV est la soudure à l'arc. Au voisinage de l'arc, le rayonnement UV est si intense qu'il peut causer de graves dommages aux yeux et à la peau. C'est pourquoi il est obligatoire de porter des protections adéquates lors de la soudure à l'arc. Les précautions valent pour le soudeur et pour toute autre personne dans son environnement proche.

D) LASERS

L'acronyme laser est d'origine anglaise signifiant "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Dans tout système quantique, le nombre d'atomes situés au niveau fondamental est nettement supérieur au nombre de ceux qui sont excités. Ce phénomène empêche la multiplication des photons. En effet, ceux-ci sont absorbés par les atomes non excités, et chaque excitation supprime un photon du rayonnement. Pour éviter cette extinction du faisceau, il faut inverser le rapport entre les atomes non excités et ceux qui le sont pour le rendre très inférieur à l'unité. Cette inversion peut être réalisée par apport d'une énergie extérieure, par un mécanisme appelé pompage.

Pour produire un rayonnement laser, trois éléments sont simultanément nécessaires (6,7). Il s'agit du milieu actif, du pompage produisant une inversion de population et d'une cavité résonnante réalisant une amplification de l'émission stimulée. Le résonateur optique est généralement constitué de miroirs dont l'un réfléchit totalement l'énergie et l'autre, partiellement. L'énergie non réfléchie par ce dernier devient l'énergie de sortie utile.

Selon ces caractéristiques, de très nombreux types de lasers sont disponibles. Ils sont classés selon le milieu actif (solide, gazeux, liquide, semi-conducteur), le mode de pompage (flash, tube à émission continue, décharge électrique,

réaction chimique) et le mode de fonctionnement (continu, relaxé, déclenché).

Les appareils engendrent un faisceau d'un rayonnement monochromatique cohérent dans l'espace et le temps. Les photons sont émis en phase avec la même longueur d'onde et dans la même direction. En effet, les rayonnements inducteurs et induits ont la même fréquence, la même phase, la même direction et la même polarisation, sans qu'il y ait de discrimination physique possible entre le photon inducteur et le photon induit. Le système agit en amplificateur de rayonnement.

Un faisceau présente une cohérence temporelle, si dans n'importe quel plan transversal de section, toutes les ondes élémentaires présentent la même phase. Le domaine de cohérence spatiale de ce faisceau correspond à l'étendue de la section transversale présentant une cohérence temporelle. Autrement dit, la cohérence temporelle traduit le fait que toutes les ondes élémentaires vibrent à la même fréquence.

La cohérence spatiale traduit la direction du faisceau. La tendance du faisceau laser à s'écarter de la propagation rectiligne et perpendiculaire aux deux miroirs de la cavité résonnante est très faible. Une des conséquences les plus importantes de ce "quasi-parallélisme" du faisceau est la possibilité d'obtenir de très grandes concentrations d'énergie unité de surface, d'où une luminance considérablement plus grande que les sources lumineuses incohérentes. De plus, le faisceau laser est, dans la plupart des dispositifs, hautement polarisé.

CAPTEURS SOLAIRES ET DOSIMÉTRIE UV

La photobiologie étudiant les interactions entre les ondes électromagnétiques non ionisantes et la matière vivante fait appel à la mesure des rayonnements, en particulier les UV qui sont biologiquement les plus réactifs. Deux méthodes différentes sont disponibles. La spectroradiométrie analyse les détails du spectre alors que la radiométrie apporte une information globale.

La spectroradiométrie permet d'analyser en détails le spectre de la lumière dans toutes ses longueurs d'onde. Le spectre énergétique, associé à la courbe d'efficacité biologique concernée, permet le calcul de la dose réellement efficace. Par l'intégration des données dans le temps, la spectroradiométrie est indiquée pour de nombreuses applications biologiques. Cependant, c'est une technique lourde et coûteuse réservée à des laboratoires de recherche. Son utilisation est du domaine du physicien expérimenté.

Le radiomètre est le dosimètre le plus utilisé, car il est facile à manipuler et d'un prix raisonnable. Les mesures sont exprimées en unités énergétiques parfois extrapolées en unités biologiques. En pratique, un détecteur sensible aux UV et équipé d'un filtre permet de mesurer l'énergie émise globalement dans une bande spectrale assez large. Cette méthode ne permet pas de mesurer la dose efficace pour un effet biologique précis. Elle mesure seulement l'énergie dans une bande spectrale donnée. Un contrôle de l'efficacité érythémale d'une lampe UVB sur un sujet témoin est donc nécessaire pour ajuster les doses et changer la lampe au besoin.

La puissance que reçoit le récepteur dépend de sa surface, ce qui est exprimé par l'éclairement énergétique (ϵ , mW/cm²) ou puissance reçue par unité de surface. L'éclairement énergétique varie selon la loi générale de l'inverse du carré de la distance ($1/d^2$). La dose (D , mJ/cm²) reçue par la peau est le produit de l'éclairement par le temps d'exposition (t , s) selon $D = \epsilon t$.

Le choix du radiomètre dépend de la source. Il doit être adapté à la forme géométrique du rayonnement (dirigé ou omnidirectionnel) et au type de source (polychromatique comme la lampe au xénon ou paucichromatique comme les lampes UVA) et centré sur la longueur d'onde maximum.

Il est nécessaire de procéder à un étalonnage régulier de l'appareil de mesure. Qu'il s'agisse d'une utilisation occasionnelle ou permanente, le résultat numérique affiché par le radiomètre varie dans le temps, essentiellement en fonction du vieillissement du filtre et du détecteur, et de la dérive électronique de ce dernier.

Les dosimètres placés dans les équipements médicaux débitant des UVA ou des UVB sont des photodiodes combinées à des filtres spécifiques (8,9). Des dosimètres individuels de nouvelle génération bénéficient de techniques innovatrices. Certains utilisent une puce opto-électronique dont le fonctionnement est basé sur la neutralisation de complexes Si-H qui ont été générés par hydrogénation du matériau GaAs dopé de type N. Le rayonnement UV brise les liaisons Si-H. Il en résulte une modification des propriétés électriques du semi-conducteur, en particulier une augmentation de sa conductivité. La détermination de la dose d'UV s'effectue par une simple mesure de résistance. Une autre méthode bénéficie d'un récepteur radio (montre-radio, téléphone mobile, pager, ...) captant les Doses Erythématogènes Standard (DES) envoyées par une station collective de métrologie UV. Chaque utilisateur programme son récepteur pour corriger les doses reçues en fonc-

tion de ses critères personnels : phototype, pratique d'une activité sportive ou exposition allongée au soleil, peau mouillée ou peau sèche, avec écran solaire ou sans. L'intégration dans le temps des doses d'UV reçues permet à la fois de prévenir l'utilisateur lorsque le seuil est atteint et d'enregistrer l'historique de son exposition au Soleil. Les résultats des mesures effectuées par la station collective peuvent également être exploités par les utilisateurs de l'optique atmosphérique (OMS, météo, ...).

Pour tous les dosimètres, la présence de poussière ou de sébum porté par les doigts sur les composants optiques donne lieu à des problèmes de validité des mesures par réflexion, diffraction et absorption des radiations lumineuses.

RÉFÉRENCES

1. Piérard-Franchimont C, Nickels-Read D, Ben Mosbah T, et al.— Early dermatopathological signs related to bath PUVA therapy. *J Pathol*, 1990, **161**, 227-231.
2. Nikkels AF, Ben Mosbah T, Piérard-Franchimont C, et al.— Comparative morphometry study of eruptive PUVA-induced and chronic sun-induced lentiginosities of the skin. *Anal Quant Cytol Histol*, 1991, **13**, 23-26.
3. Piérard GE, Nikkels A, Arrese Estrada J, et al.— Dermal dendrocytes and photochemotherapy. *Virchows Arch A*, 1991, **418**, 311-314.
4. Piérard GE.— Ageing in the sun parlour. *Int J Cosmet Sci*, 1998, **20**, 251-259.
5. Uhoda I, Petit L, Piérard-Franchimont C, Piérard GE.— Les bancs solaires au banc des accusés. *Rev Med Liège*, 2002, **57**, 29-32.
6. Paquet P, Piérard GE.— Les lasers à épilation : entre espoirs et réalités. *Rev Med Liège*, 1999, **54**, 739-745.
7. Paquet P, Fumal I, Piérard-Franchimont C, Piérard GE.— Long-pulsed ruby laser-assisted hair removal in male-to-female transsexuals. *J Cosmet Dermatol*, 2002, **1**, 8-12.
8. Roelandts R.— Quelques considérations concernant les cabines, les lampes et les dosimètres UVA utilisés en photochimiothérapie. *Nouv Dermatol*, 1987, **6**, 278-280.
9. Roelandts R, Diffey BL, Bocquet JL.— Une dosimétrie UVA précise en photobiologie et en photodermatologie est-elle une illusion? *Ann Dermatol Vénereol*, 1988, **115**, 1261-1264.

Les demandes de tirés à part sont à adresser au Prof. C. Piérard-Franchimont, Service de Dermatopathologie, CHU du Sart Tilman, 4000 Liège. E-mail : claudine.franchimont@ulg.ac.be