

Rédacteur  
*Bengt Knave*

### Table des matières

Les champs électriques et magnétiques: effets sur la santé . . . . .	<i>Bengt Knave</i>	49.2
Le spectre électromagnétique: caractéristiques physiques de base . . . . .	<i>Kjell Hansson Mild</i>	49.4
Le rayonnement ultraviolet . . . . .	<i>David H. Sliney</i>	49.6
Le rayonnement infrarouge . . . . .	<i>R. Matthes</i>	49.10
Le rayonnement visible et infrarouge . . . . .	<i>David H. Sliney</i>	49.14
Les lasers . . . . .	<i>David H. Sliney</i>	49.18
Les ondes radiofréquences et les ondes hyperfréquences . . . . .	<i>Kjell Hansson Mild</i>	49.20
Les champs électriques et magnétiques à basse fréquence . . . . .	<i>Michael H. Repacholi</i>	49.22
Les champs électriques et magnétiques statiques . . . . .	<i>Martino Grandolfo</i>	49.27

## ● LES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES: EFFETS SUR LA SANTÉ

*Bengt Knave*

On s'est beaucoup intéressé, ces dernières années, aux effets biologiques et aux conséquences possibles pour la santé de faibles champs électriques et magnétiques. Des études ont été réalisées sur les champs magnétiques et leurs effets éventuels sur le cancer, la fonction de reproduction et les réactions neurocomportementales. Nous présentons, dans ce qui suit, un résumé des connaissances actuelles, ainsi qu'un aperçu des domaines qu'il reste encore à étudier et, en particulier, des différentes options possibles quant à la politique à adopter: non-intervention, «principe de précaution» ou interventions coûteuses.

### Ce que nous savons

#### *Le cancer*

Les études épidémiologiques sur la relation entre la leucémie infantile et l'exposition résidentielle due aux lignes de transport d'électricité semblent révéler une légère augmentation du risque. De plus, on signale un risque excédentaire de leucémie et de tumeurs au cerveau dans les professions ayant rapport avec l'électricité. De récentes études, basées sur des techniques améliorées d'évaluation de l'exposition, ont généralement confirmé qu'il pourrait y avoir une association. On ne comprend cependant pas encore assez bien le rôle des caractéristiques de l'exposition (par exemple, fréquence du champ magnétique et exposition non continue) et on sait très peu de choses sur les éventuels facteurs parasites ou modificateurs. Par ailleurs, la plupart des études faites en milieu de travail ont mis en cause une forme particulière de la maladie, la leucémie myéloïde aiguë. Les quelques études oncologiques réalisées sur des animaux de laboratoire n'ont pas permis de mieux évaluer les risques et, malgré la multiplicité des études expérimentales sur les cellules, aucun mécanisme plausible et compréhensible n'a été présenté pour expliquer d'éventuels effets cancérogènes.

#### *La reproduction et la grossesse*

Les études épidémiologiques ont fait état de cas de grossesse à issue défavorable et de cancer infantile après une exposition de la mère ou du père à des champs magnétiques, avec une relation apparente entre l'exposition paternelle et un effet génotoxique. Les efforts que d'autres équipes de recherche ont déployés pour reproduire de tels résultats positifs n'ont cependant pas réussi. Les études épidémiologiques faites sur des opérateurs de terminaux à écran de visualisation, qui sont exposés aux champs électriques et magnétiques émis par leur écran, ont donné des résultats essentiellement négatifs et les études tératogéniques sur animaux de laboratoire exposés à des champs semblables à ceux des écrans de visualisation ont abouti à des résultats trop contradictoires pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions fiables.

#### *Les réactions neurocomportementales*

Des études de provocation menées sur de jeunes volontaires tendent à montrer que l'exposition à des champs électriques et magnétiques relativement faibles peut entraîner des changements physiologiques, comme un ralentissement du rythme cardiaque et des modifications de l'électroencéphalogramme (EEG). Le phénomène récemment invoqué d'hypersensibilité à l'électricité semble être dû à de multiples facteurs et il n'est même pas sûr que les champs soient en cause. On a signalé une vaste gamme de symptô-

mes et de malaises, touchant principalement la peau et le système nerveux. La plupart des patients se plaignent d'effets cutanés diffus au visage (bouffées de chaleur, rougeurs, fourmillements, douleurs et tensions). Les symptômes liés au système nerveux comprennent: migraine, étourdissements, fatigue et lipothymie, fourmillements aux extrémités, essoufflement, palpitations, sudations abondantes, dépression et troubles de la mémoire. On n'a cependant signalé aucun symptôme organique caractéristique d'une maladie neurologique.

#### *L'exposition*

Les êtres humains sont exposés à des champs électriques et magnétiques en de nombreux endroits: à la maison, au travail, à l'école ou dans les moyens de transport électriques. Ces champs sont présents partout où se trouvent des fils ou des câbles sous tension, des moteurs électriques ou de l'équipement électronique. D'après les connaissances actuelles, un individu pourrait courir un risque accru s'il est exposé pendant la journée de travail à un champ moyen dépassant 0,2 à 0,4  $\mu\text{T}$  (microtesla). Des moyennes annuelles d'exposition ont également été calculées pour ceux qui vivent à proximité de lignes de transport d'électricité.

Beaucoup de personnes sont exposées, mais pendant de courtes périodes, à des champs dont l'intensité dépasse ces niveaux, que ce soit à la maison (radiateurs électriques, rasoirs, sèche-cheveux et autres appareils électroménagers, ou courants parasites dus à des déséquilibres du système de mise à la terre d'un immeuble), au travail (dans les industries et les bureaux où les travailleurs se trouvent à proximité d'équipements électriques ou électroniques) ou pendant leurs déplacements en train ou par d'autres moyens de transport électriques. Les conséquences de telles expositions intermittentes ne sont pas connues. Il y a d'autres incertitudes au sujet de l'exposition (importance de la fréquence des champs, autres facteurs modificateurs ou parasites, exposition totale journalière), des effets (cohérence des résultats quant au type de cancer causé) et de la validité des études épidémiologiques, qui imposent une grande prudence lors de l'évaluation des risques.

#### *L'évaluation des risques*

Des études scandinaves sur l'exposition résidentielle indiquent un doublement du risque de leucémie au-dessus de 0,2  $\mu\text{T}$ , niveau d'exposition qui correspond aux valeurs typiques à une distance de 50 à 100 m d'une ligne de transmission aérienne. On observe cependant peu de cas de leucémie infantile à proximité de lignes de transport électriques. Par conséquent, le risque est faible comparé aux autres risques environnementaux. On a calculé qu'il y a chaque année deux cas de leucémie chez des enfants vivant au-dessous ou à proximité de ces lignes. Un de ces deux cas, au plus, pourrait être attribuable au champ magnétique.

L'exposition professionnelle aux champs magnétiques est en général plus importante que l'exposition résidentielle. En effet, le calcul du risque de leucémie et de tumeurs au cerveau donne des valeurs plus élevées dans le cas des travailleurs exposés que dans celui des enfants vivant à proximité de lignes de transmission. D'après une étude suédoise du risque attribuable, les champs magnétiques pourraient causer chaque année une vingtaine de cas de leucémie et une vingtaine de cas de tumeurs au cerveau. Signalons, pour fins de comparaison, que 40 000 cas de cancer sont diagnostiqués tous les ans en Suède et que, d'après les calculs, 800 d'entre eux auraient une origine professionnelle.

#### *Ce qu'il nous reste à découvrir*

Il est évident que d'autres recherches sont nécessaires pour mieux comprendre les résultats des études épidémiologiques réalisés jusqu'ici. D'autres études épidémiologiques sont actuellement en cours un peu partout dans le monde, mais il reste à voir si elles combleront les lacunes des connaissances actuelles. En fait, nous

ne savons pas quelles caractéristiques des champs ont un effet causal, si tant est qu'il en existe un. Nous devons donc examiner de plus près les mécanismes susceptibles d'expliquer les phénomènes constatés.

La littérature décrit un grand nombre d'études *in vitro* consacrées à la recherche de mécanismes possibles. On a proposé plusieurs modèles de promotion du cancer: changements dans le transfert d'ions de calcium à la surface des cellules et à travers la membrane cellulaire, rupture des communications cellulaires, modulation de la croissance des cellules, activation de séquences de gènes spécifiques par transcription modulée de l'acide ribonucléique (ARN), diminution de la production de mélatonine épiphysaire, modulation de l'activité de l'ornithine-décarboxylase et dérèglement d'origine hormonale et immunitaire des mécanismes antitumoraux. Chacun de ces mécanismes a certaines caractéristiques pouvant expliquer les effets cancérigènes supposés des champs magnétiques. Toutefois, aucune des explications données n'échappe aux incertitudes ou aux objections fondamentales.

### **La mélatonine et la magnétite**

Deux mécanismes susceptibles de favoriser le cancer méritent un examen particulier: la réduction des niveaux nocturnes de mélatonine induite par les champs magnétiques et la présence, récemment découverte, de cristaux de magnétite dans les tissus humains.

Les études sur animaux ont établi que la mélatonine, par son action sur les niveaux d'hormones sexuelles en circulation, a indirectement des effets oncostatiques. D'autres études, également sur animaux, ont montré que les champs magnétiques entravent la production de mélatonine épiphysaire, ce qui suggère un mécanisme théorique pouvant expliquer, par exemple, l'augmentation signalée de cas de cancer du sein associés à l'exposition à de tels champs. Une autre explication du risque accru de cancer a récemment été proposée. On sait que la mélatonine est un capteur extrêmement puissant de radicaux hydroxyle, ce qui revient à dire qu'elle inhibe très sensiblement l'action nocive des radicaux libres sur l'ADN. Si les niveaux de mélatonine sont réduits, sous l'effet de champs magnétiques par exemple, l'ADN devient plus vulnérable aux attaques oxydantes. Cette théorie explique comment les champs magnétiques pourraient causer une hausse de la fréquence du cancer en réduisant la production de mélatonine.

Toutefois, les niveaux sanguins de mélatonine diminuent-ils vraiment chez les humains exposés à des champs magnétiques faibles? Certains faits le suggèrent, mais d'autres recherches sont nécessaires pour le confirmer. On sait depuis quelques années que les oiseaux migrateurs arrivent à s'orienter, durant leurs migrations saisonnières, grâce à la présence dans leurs cellules de cristaux de magnétite qui réagissent au champ magnétique terrestre. Comme nous l'avons dit plus haut, il est maintenant établi que les cellules humaines contiennent des cristaux de magnétite en concentration suffisante pour réagir à de faibles champs magnétiques. Il importe donc de considérer le rôle de ces cristaux dans toute étude des mécanismes pouvant expliquer d'éventuels effets nocifs des champs électriques et magnétiques.

### **Les recherches nécessaires**

En résumé, il est clair que nous devons étudier davantage les mécanismes éventuels. Les épidémiologistes ont besoin de savoir quelles caractéristiques des champs électriques et magnétiques ils devraient prendre en compte dans leurs évaluations de l'exposition. Dans la plupart des études épidémiologiques, on s'est servi des valeurs efficace ou moyenne des champs (à une fréquence de 50 à 60 Hz). Certains chercheurs se sont également basés sur des mesures de l'exposition cumulée. Dans une récente étude, il apparaissait que des champs de plus haute fréquence étaient liés à des risques. Enfin, des études sur animaux ont révélé que les champs transitoires ont également une importance. Pour les épidémiolo-

gistes, ce ne sont pas les effets qui posent des problèmes puisqu'il existe aujourd'hui des registres des maladies dans la plupart des pays. La difficulté, pour eux, est de déterminer quelles caractéristiques significatives de l'exposition sont à prendre en compte dans leurs études.

## **Quelle politique doit-on adopter?**

### **Les systèmes de protection**

Les pouvoirs publics se fondent généralement sur différents systèmes de protection pour établir des règlements, des lignes directrices et des politiques. Le plus souvent, c'est le système fondé sur les critères de santé qu'ils choisissent: dans ce système, un effet dommageable précis correspond à un certain niveau d'exposition, que l'exposition soit chimique ou physique. Le deuxième système se base sur l'optimisation d'un risque connu et accepté, sans qu'il existe un seuil en deçà duquel le risque est absent. Les rayonnements ionisants constituent un exemple d'exposition qui tombe dans cette catégorie. Un troisième système couvre les dangers ou risques pour lesquels on n'a pas établi avec certitude l'existence d'une relation causale entre l'exposition et l'effet, mais qui suscitent des préoccupations générales. Ce dernier système de protection se fonde sur le *principe de précaution*, qui se résume ainsi: en l'absence de certitude scientifique, il vaut mieux éviter toute exposition inutile future, sans pour autant engager de dépenses excessives. C'est dans cette perspective que la question de l'exposition aux champs électriques et magnétiques a été abordée et que des stratégies systématiques ont été mises au point, pour concevoir, par exemple, des lignes de transport électrique, des lieux de travail et des appareils électroménagers qui minimisent l'exposition.

Il est clair que le système fondé sur l'optimisation ne peut pas s'appliquer aux champs électriques et magnétiques simplement parce qu'ils ne sont pas connus et acceptés comme risques. Toutefois, les deux autres systèmes mentionnés restent à l'examen actuellement.

### **La limitation de l'exposition dans le système fondé sur les critères de santé**

Dans les recommandations internationales, les limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux valeurs que l'on peut mesurer à proximité des lignes de transmission et dans les professions ayant rapport avec l'électricité. En 1990, l'Association internationale pour la protection contre les rayonnements (International Radiation Protection Association (IRPA)) a publié le document *Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields*, qui a servi de base aux normes nationales de beaucoup de pays. Comme d'importantes nouvelles études avaient été réalisées par la suite, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)) a fait paraître un additif en 1993, et des évaluations de risques conformes aux recommandations de l'IRPA ont été effectuées en 1993, au Royaume-Uni.

Il ressort de ces documents que l'on ne peut pas en toute rigueur se fonder sur les connaissances scientifiques actuelles pour imposer des limites d'exposition de l'ordre du microtesla et que d'autres études sont nécessaires pour confirmer l'existence de risques pour la santé. Les lignes directrices de l'IRPA et de l'ICNIRP, se basant sur les effets des courants que les champs induisent dans le corps par rapport aux courants qui peuvent y circuler normalement (jusqu'à environ 10 mA/m<sup>2</sup>), recommandent de limiter l'exposition des travailleurs aux champs magnétiques de 50/60 Hz à 0,5 mT pendant toute la journée et à 5 mT pendant de courtes périodes ne dépassant pas 2 heures. Elles recommandent en outre de limiter l'exposition aux champs élec-

triques respectivement à 10 et à 30 kV/m dans les mêmes conditions. Pour le public, les limites de 24 heures sont fixées à 0,1 mT et 5 kV/m.

Ces recommandations pour l'exposition se fondent exclusivement sur les études établissant un rapport avec le cancer. Quant aux autres effets possibles sur la santé des champs électriques et magnétiques (par exemple, troubles de la fonction de reproduction et désordres neurocomportementaux), on considère en général que les résultats obtenus jusqu'ici ne sont pas assez concluants et cohérents pour servir de base à des limites d'exposition.

### Le principe de précaution

Il n'y a pas réellement de différence entre le principe de précaution et le concept d'abstention prudente qui est particulièrement associé aux champs électriques et magnétiques. Comme nous l'avons dit plus haut, le principe de précaution consiste à éviter toute exposition inutile future, sans engager de dépenses excessives, tant que subsiste l'incertitude scientifique au sujet des effets sur la santé. Ce concept a été adopté dans ce domaine en Suède, mais non dans les autres pays.

En Suède, cinq organismes publics (l'Institut suédois de protection contre les rayonnements, le Conseil national de la sécurité électrique, le Conseil national de la santé et de la protection sociale, le Conseil national de la sécurité et de l'hygiène du travail et le Conseil national du logement, de la construction et de la planification) ont déclaré conjointement que «des connaissances accumulées jusqu'ici justifient que l'on prenne des mesures de réduction de l'intensité des champs magnétiques et électriques». La politique adoptée consiste à éviter l'exposition prolongée à des champs magnétiques élevés, s'il est possible de le faire à un prix raisonnable. Avant d'installer de nouveaux équipements ou de nouvelles lignes de transport d'électricité pouvant exposer des personnes à des champs magnétiques élevés, il convient d'envisager des solutions causant des expositions moindres, sans imposer d'interventions complexes ou coûteuses. Comme le mentionne l'Institut suédois de protection contre les rayonnements, il est en général possible de réduire les champs magnétiques, sans dépenses excessives, dans les cas où les niveaux d'exposition dépassent dix fois les niveaux naturels. Si le niveau d'exposition dû à des installations existantes ne dépasse pas dix fois le niveau naturel, il est préférable d'éviter une reconstruction coûteuse. Il va sans dire que le principe de précaution est critiqué par de nombreux experts de différents pays, particulièrement dans l'industrie de production de l'énergie électrique.

### Conclusion

Nous avons présenté dans cet article un résumé, fondé sur les connaissances actuelles, des effets sur la santé des champs électriques et magnétiques, ainsi qu'un aperçu des domaines qu'il reste nécessaire d'étudier. Sans recommander une politique particulière, nous avons proposé un certain nombre de systèmes facultatifs de protection. Il nous semble clair, d'après les données scientifiques accumulées jusqu'ici, que l'on ne peut pas imposer des limites d'exposition de l'ordre du microtesla, et que, par conséquent, rien ne justifie de coûteuses interventions pour de tels niveaux. Quant à la décision d'adopter ou non une stratégie de précaution, elle appartient aux pouvoirs publics et aux responsables de l'hygiène du travail de chaque pays. S'ils choisissent de ne pas le faire, cela implique de renoncer à toute restriction parce que les seuils basés sur les critères de santé sont nettement supérieurs aux niveaux d'exposition courants du public et des travailleurs. De toute façon, si les opinions diffèrent aujourd'hui au sujet des règlements, recommandations et politiques à adopter, les responsables des organismes de réglementation s'entendent au moins sur un point: d'autres recherches sont nécessaires si l'on veut établir une base solide pour les interventions futures.

## LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE: CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE BASE

*Kjell Hansson Mild*

La lumière du soleil est la forme d'énergie électromagnétique que nous connaissons le mieux. La fréquence de cette lumière (spectre visible) constitue la limite entre les rayonnements ionisants très actifs (rayons X, rayons cosmiques) de fréquence supérieure et les rayonnements non ionisants, beaucoup plus bénins, de fréquence inférieure. Les rayonnements non ionisants forment un spectre, que nous examinons dans ce chapitre. À l'extrémité supérieure, juste au-dessous de la lumière visible, il y a le rayonnement infrarouge. Au-dessous, on trouve la large gamme des radiofréquences, qui comprend (par ordre descendant) les ondes hyperfréquences, les ondes de radiotéléphonie mobile, la télévision, la radio en modulation de fréquence et la radio en modulation d'amplitude, les ondes courtes utilisées pour le chauffage diélectrique et par induction et, à l'extrémité inférieure, les champs à la fréquence du secteur. La figure 49.1 présente un schéma du spectre électromagnétique.

Tout comme la lumière visible et le son, les champs électromagnétiques sont présents partout dans notre environnement et dans l'espace où nous vivons et travaillons. Et, comme l'énergie acoustique à laquelle nous sommes exposés, la plupart de ces champs sont d'origine humaine, depuis les champs de faible intensité provenant des appareils électriques et des récepteurs de radio et de télévision dont nous nous servons tous les jours jusqu'aux champs intenses à usage médical auxquels on nous soumet à des fins bénéfiques (traitements de diathermie, par exemple). En général, l'énergie de ces champs s'atténue rapidement avec la distance. Dans l'environnement, les niveaux naturels de ces champs sont assez bas.

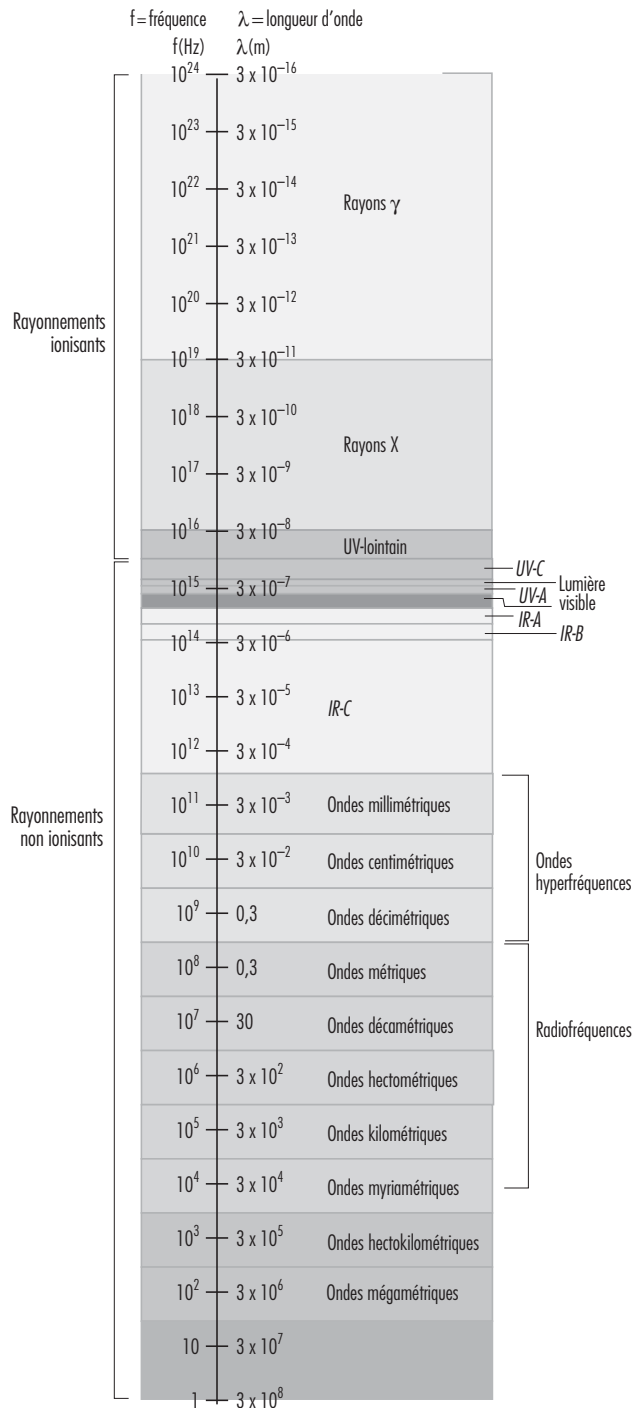
Les rayonnements non ionisants (RNI) recouvrent tous les rayonnements et champs du spectre électromagnétique qui ne possèdent pas assez d'énergie photonique pour ioniser la matière. En effet, les RNI ne peuvent pas céder suffisamment d'énergie à une molécule ou un atome pour en modifier la structure en lui enlevant un ou plusieurs électrons. La frontière entre les rayonnements ionisants et non ionisants est ordinairement fixée à une longueur d'onde d'environ 100 nanomètres (ce qui correspond à 12,4 eV en énergie photonique).

Comme toute autre forme d'énergie, les RNI ont le pouvoir d'agir sur les systèmes biologiques, avec des effets qui peuvent être insignifiants, nocifs à différents degrés ou encore bénéfiques. Dans le cas des radiofréquences (RF) et des ondes hyperfréquences, le principal mécanisme d'interaction est l'effet thermique, mais ce n'est pas le cas dans la zone basse fréquence du spectre, où des champs de forte intensité peuvent induire des courants dangereux dans le corps. Toutefois, les mécanismes d'interaction des champs de faible intensité demeurent inconnus.

### Les quantités et les unités

Au-dessous d'une fréquence approximative de 300 MHz, les RNI sont définis par le champ électrique ( $E$ ) et le champ magnétique ( $H$ ).  $E$  est exprimé en volts par mètre (V/m) et  $H$ , en ampères par mètre (A/m). Il s'agit dans les deux cas de quantités vectorielles, c'est-à-dire qui se caractérisent en chaque point par une amplitude, un sens et une direction. Dans la gamme des basses fréquences, le champ magnétique est souvent exprimé par la densité de flux (ou induction magnétique)  $B$ , dont l'unité SI est le tesla (T). Pour mesurer les champs les plus courants dans l'environnement, on préfère utiliser comme sous-unité le microtesla ( $\mu\text{T}$ ). On trouve encore des documents dans lesquels la densité de flux est exprimée

Figure 49.1 • Le spectre électromagnétique



Le spectre électromagnétique se subdivise en deux grandes régions: celle des rayonnements ionisants et celle des rayonnements non ionisants, qui se subdivisent elles-mêmes comme on le voit ci-dessus. Tous les rayonnements peuvent être définis par leur longueur d'onde et leur fréquence. Les rayonnements non ionisants ont des longueurs d'onde supérieures à environ 100 nm; leur énergie photonique est trop faible pour ioniser la matière.

en gauss (G). La conversion entre les différentes unités se base sur les facteurs suivants (dans l'air): 1 T = 10<sup>4</sup> G ou 0,1 μT = 1 mG et 1 A/m = 1,26 μT.

On peut trouver une abondante documentation sur les concepts, les quantités et la terminologie utilisés dans le domaine de la protection contre les RNI, y compris les radiofréquences (NCRP, 1981; Polk et Postow, 1986; OMS, 1993).

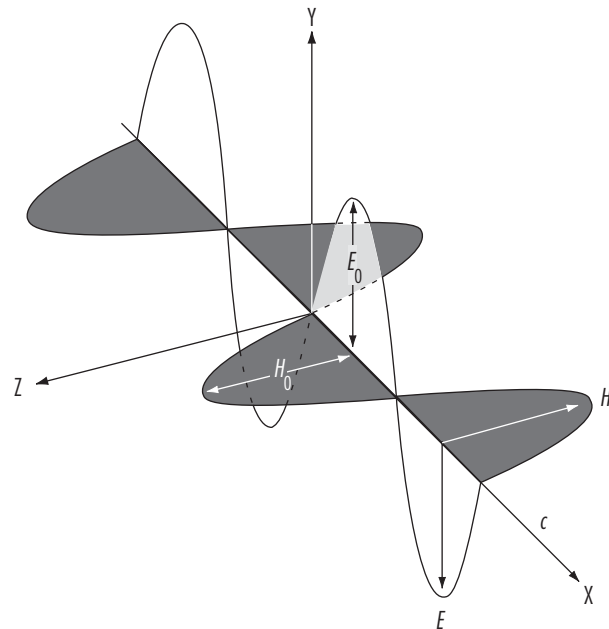
Le mot *rayonnement* désigne simplement une énergie transmise par des ondes. Les ondes électromagnétiques sont des ondes d'énergie électrique et magnétique, un mouvement ondulatoire étant défini comme la propagation d'une perturbation dans un milieu physique. Un changement du champ électrique est accompagné d'un changement du champ magnétique et vice versa. Ces phénomènes ont été décrits en 1865 par J.C. Maxwell dans quatre équations connues aujourd'hui sous le nom de formules de Maxwell.

Les ondes électromagnétiques se caractérisent par un ensemble de paramètres comprenant la fréquence (*f*), la longueur d'onde (*l*), l'intensité de champ électrique, l'intensité de champ magnétique, la polarisation électrique (*P*) (direction du champ *E*), la vitesse de propagation (*c*) et le vecteur de Poynting (*S*). La figure 49.2 illustre la propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace. La fréquence est définie par le nombre de cycles complets décrits par le champ électrique ou magnétique en un point donné en une seconde. Elle est exprimée en hertz (Hz). La longueur d'onde est la distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs. La fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de propagation (*v*) sont liées par la formule:

$$v = f\lambda$$

La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace est égale à la vitesse de la lumière. Dans un milieu, elle dépend des propriétés électriques du milieu, qui sont définies par

Figure 49.2 • Onde plane se propageant à la vitesse de la lumière dans la direction X



Une onde électromagnétique a une composante électrique et une composante magnétique. Dans le cas d'une onde plane, les champs *E* et *H* sont perpendiculaires l'un à l'autre, tous deux étant perpendiculaires à la direction de propagation.

Les champs *E* et *H* sont liés par la formule  $E = 377 H$ . En cas d'exposition professionnelle à des fréquences inférieures à 300 MHz, on se trouve dans l'espace dit « champ proche » où les deux composantes doivent être considérées séparément.

49. LES RAYONNEMENTS NON IONISANTS

sa permittivité ( $\epsilon$ ) et sa perméabilité ( $\mu$ ). La permittivité mesure l'interaction du milieu avec le champ électrique et la perméabilité, son interaction avec le champ magnétique. Les substances biologiques ont une permittivité très différente de celle du vide, qui dépend de la longueur d'onde (surtout dans la gamme des radiofréquences) et du type de tissu. Cependant, la perméabilité des substances biologiques est égale à celle du vide.

Dans le cas d'une onde plane (voir figure 49.2), le champ électrique est perpendiculaire au champ magnétique et la direction de propagation est normale aux plans formés des deux champs.

Pour une onde plane, le rapport constant de la valeur du champ électrique et de la valeur du champ magnétique est connu sous le nom d'impédance caractéristique ( $\zeta$ ):

$$\zeta = E/H$$

Dans le vide,  $\zeta = 120 \pi \approx 377 \Omega$ . Dans les autres cas,  $\zeta$  dépend de la permittivité et de la perméabilité du milieu que l'onde traverse.

Le transfert d'énergie est décrit par le vecteur de Poynting, qui représente la valeur et la direction de la densité de flux électromagnétique:

$$S = E \times H$$

Dans le cas d'une onde de propagation, l'intégrale de  $S$  sur une surface représente la puissance instantanée transmise à travers la surface (densité d'énergie). La longueur du vecteur de Poynting est exprimée en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) (on trouve dans certains documents l'unité  $mW/cm^2$  qui, convertie en unités SI, vaut  $10 W/m^2$ ). Pour une onde plane, elle est liée aux valeurs du champ électrique et du champ magnétique par la formule:

$$S = E^2/120 \pi = E^2/377$$

et

$$S = 120 \pi H^2 = 377 H^2$$

Les conditions d'exposition que l'on rencontre en pratique ne peuvent pas toutes être représentées par des ondes planes. C'est en particulier le cas à proximité des sources de rayonnement RF. Le champ électromagnétique rayonné par une antenne peut être subdivisé en deux régions: le champ proche et le champ lointain, la limite entre les deux étant ordinairement placée à:

$$r = 2a^2/\lambda$$

où  $a$  est la plus grande dimension de l'antenne.

En champ proche, l'exposition doit être caractérisée tant par le champ électrique que par le champ magnétique. En champ lointain, un seul des deux champs suffit parce qu'ils sont liés par les équations précédentes incluant  $E$  et  $H$ . En pratique, le cas du champ proche est souvent réalisé aux fréquences inférieures à 300 MHz.

L'exposition aux champs RF est compliquée davantage par l'interaction des ondes électromagnétiques avec les objets qui se trouvent sur leur parcours. En général, lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un objet, une partie de l'énergie incidente est réfléchie, une autre partie est absorbée et le reste est transmis. La répartition de l'énergie entre les trois parties dépend de la fréquence et de la polarisation du champ, ainsi que des propriétés électriques et de la forme de l'objet. La superposition des ondes incidente et réfléchie peut donner lieu à des ondes stationnaires et à une répartition spatiale irrégulière du champ. Des ondes stationnaires se forment souvent aux alentours des objets métalliques parce qu'ils provoquent une réflexion totale de l'onde incidente.

Comme l'interaction des champs RF avec les systèmes biologiques dépend d'un grand nombre de caractéristiques différentes du champ et que les champs qu'on trouve en pratique sont complexes, il importe de considérer les facteurs suivants lorsqu'on décrit l'exposition à des champs RF:

- exposition en champ proche ou en champ lointain;
- en champ proche, il faut disposer des valeurs de  $E$  et de  $H$ ; en champ lointain, une seule des deux valeurs suffit;
- variation spatiale de l'intensité du champ ou des champs en cause;
- polarisation du champ, c'est-à-dire direction du champ électrique par rapport à la direction de propagation de l'onde.

Pour une exposition à des champs magnétiques basse fréquence, on ne sait pas encore si c'est l'intensité du champ ou la densité de flux qui est le seul facteur déterminant. Il se peut que d'autres facteurs entrent en ligne de compte, comme la durée de l'exposition et la vitesse de variation du champ.

L'expression *champ électromagnétique*, telle qu'elle est utilisée dans les médias et la presse de vulgarisation, se rapporte d'ordinaire aux champs électriques et magnétiques situés à l'extrémité basse fréquence du spectre, mais on l'emploie aussi dans un sens beaucoup plus large pour l'appliquer à l'ensemble du spectre électromagnétique. Il y a lieu de noter que, dans la gamme des basses fréquences, les champs  $E$  et  $B$  ne sont pas couplés ou liés de la même façon qu'ils le sont dans la gamme des hautes fréquences et qu'il convient donc, dans ce cas, de considérer séparément le champ électrique et le champ magnétique plutôt que de les regrouper sous l'appellation «champ électromagnétique».

## LE RAYONNEMENT ULTRAVIOLET

David H. Sliney

Les rayons ultraviolets (UV) sont un type de rayonnement optique dont la longueur d'onde est plus courte que celle de la lumière visible et dont les photons (particules de rayonnement) ont une plus grande énergie. Ils sont présents dans la lumière solaire et dans la plupart des sources de lumière; ils sont également émis par de nombreuses sources utilisées dans l'industrie, les sciences et la médecine. Les travailleurs de maintes professions peuvent y être exposés. Dans certains cas, lorsque la lumière ambiante est faible, des sources très intenses en ultraviolet proche (lumière noire) sont visibles, mais les UV sont d'ordinaire invisibles: on ne peut les détecter que parce qu'ils rendent certaines substances fluorescentes.

Comme la lumière, qui peut se décomposer en donnant les couleurs de l'arc-en-ciel, les UV se subdivisent en composantes désignées par UV-A, UV-B et UV-C. Les longueurs d'ondes de la lumière et des UV sont généralement exprimées en nanomètres (nm), 1 nm étant égal à un milliardième de mètre ( $10^{-9}$  m). Les UV-C solaires (UV de très courte longueur d'onde) sont absorbés par l'atmosphère et n'atteignent donc pas la surface de la terre. On peut produire des UV-C à l'aide de sources artificielles, comme les lampes germicides, qui émettent la plus grande partie de leur énergie à une longueur d'onde unique (254 nm) extrêmement efficace pour tuer les bactéries et les virus sur les surfaces et dans l'air.

Les UV-B sont la composante des ultraviolets qui est la plus dommageable biologiquement pour la peau et les yeux. Même si l'énergie des UV-B solaires est en grande partie absorbée par l'atmosphère, la partie du rayonnement qui atteint la terre cause les coups de soleil et d'autres effets biologiques plus graves. Les ultraviolets à grande longueur d'onde, appelés UV-A, sont également présents dans la lumière de la plupart des lampes. Ils forment l'essentiel des UV solaires qui atteignent la terre. Les UV-A peuvent pénétrer profondément dans les tissus, mais ils ne présentent pas autant de risques sur le plan biologique que les UV-B,

parce que l'énergie de chacun de leurs photons est sensiblement inférieure à celle des photons UV-B et UV-C.

## Les sources de rayonnement ultraviolet

### La lumière solaire

Les personnes qui travaillent à l'extérieur sont les plus exposées aux rayons ultraviolets. L'énergie du rayonnement solaire est fortement atténuée par la couche d'ozone qui entoure la terre, limitant les UV aux longueurs d'onde supérieures à 290-295 nm. L'énergie beaucoup plus dangereuse des UV-B dépend dans une large mesure de l'inclinaison des rayons incidents et varie donc avec la saison et l'heure du jour (Sloney, 1986, 1987; OMS, 1994).

### Les sources artificielles

Parmi les sources artificielles d'UV, il importe de signaler les suivantes:

*Soudage industriel à l'arc.* L'énergie rayonnante de l'arc de soudage constitue la plus importante source potentielle d'exposition. Les niveaux d'UV aux alentours de l'arc sont extrêmement élevés: ils peuvent produire des lésions oculaires et cutanées aiguës après trois à dix minutes d'exposition à une distance de quelques mètres. La protection des yeux et de la peau est donc obligatoire.

*Lampes UV industrielles.* Beaucoup de procédés industriels et commerciaux, comme le séchage ou la cuisson photochimique des encres, des peintures et des plastiques, font appel à des lampes qui émettent fortement dans la gamme des ultraviolets. Même si la probabilité d'une exposition nocive est faible, par suite de la protection utilisée, on ne peut exclure le risque d'une exposition accidentelle.

*Lampes à lumière noire.* Les lampes à lumière noire sont des ampoules spécialisées qui émettent surtout dans la gamme des UV et qui servent dans diverses applications: essais non destructifs à l'aide de poudres fluorescentes, authentification de billets de banque et de documents et production d'effets spéciaux en publicité et dans les discothèques. Ces lampes ne présentent pas de risques significatifs pour les humains (sauf dans certains cas de photosensibilisation de la peau).

*Traitements médicaux.* Les lampes à ultraviolets sont utilisées en médecine à différentes fins diagnostiques et thérapeutiques. Les sources d'UV-A servent ordinairement dans les applications diagnostiques. L'exposition des patients varie beaucoup avec le genre de traitement. Les lampes UV utilisées en dermatologie nécessitent une manipulation très soignée par le personnel médical.

*Lampes germicides.* Dans la bande de 250-265 nm, les UV sont très efficaces comme moyen de stérilisation et de désinfection, parce que ces longueurs d'onde correspondent à un maximum dans le spectre d'absorption de l'ADN. On se sert souvent, comme source d'ultraviolets, de tubes à décharge basse pression à vapeur de mercure, dont l'énergie rayonnée se situe à plus de 90% à 254 nm. Ces tubes sont souvent appelés «lampes germicides», «lampes bactéricides» ou simplement «lampes UV-C». Les lampes germicides sont également utilisées dans les hôpitaux pour combattre les infections d'origine tuberculeuse et, à l'intérieur des cabines de sécurité microbiologique, pour neutraliser les microorganismes en suspension dans l'air ou déposés sur des surfaces. Une installation correcte de ces lampes est essentielle, de même qu'une bonne protection des yeux.

*Salons de bronzage.* Ces salons sont équipés de lits spéciaux éclairés par des lampes émettant principalement dans la gamme des UV-A, mais aussi, dans une certaine mesure, dans la gamme des UV-B. La fréquentation régulière de tels établissements peut faire augmenter de façon non négligeable la dose annuelle d'ultraviolets reçue par la peau. De plus, il arrive souvent que le personnel de ces salons soit également exposé à de faibles niveaux de rayonnement. La protection des yeux à l'aide de lunettes ordinaires de

soleil ou de lunettes à coques devrait être obligatoire pour les clients et, selon la disposition des lieux, les membres du personnel eux-mêmes pourraient avoir besoin d'une protection oculaire.

*Eclairage général.* Des tubes fluorescents sont couramment installés dans les lieux de travail et les logements depuis des années. Ces tubes émettent de petites quantités d'UV, dont la contribution à l'exposition annuelle ne dépasse cependant pas quelques centièmes. Les lampes à incandescence à halogène sont aussi d'un usage de plus en plus courant à la maison et au travail, où elles servent à différentes fins d'éclairage et de présentation. Les lampes à halogène non protégées peuvent émettre suffisamment d'UV pour causer des lésions aiguës à courte distance. Toutefois, elles ne présentent aucun danger une fois munies de filtres en verre.

## Les effets biologiques

### La peau

#### L'érythème

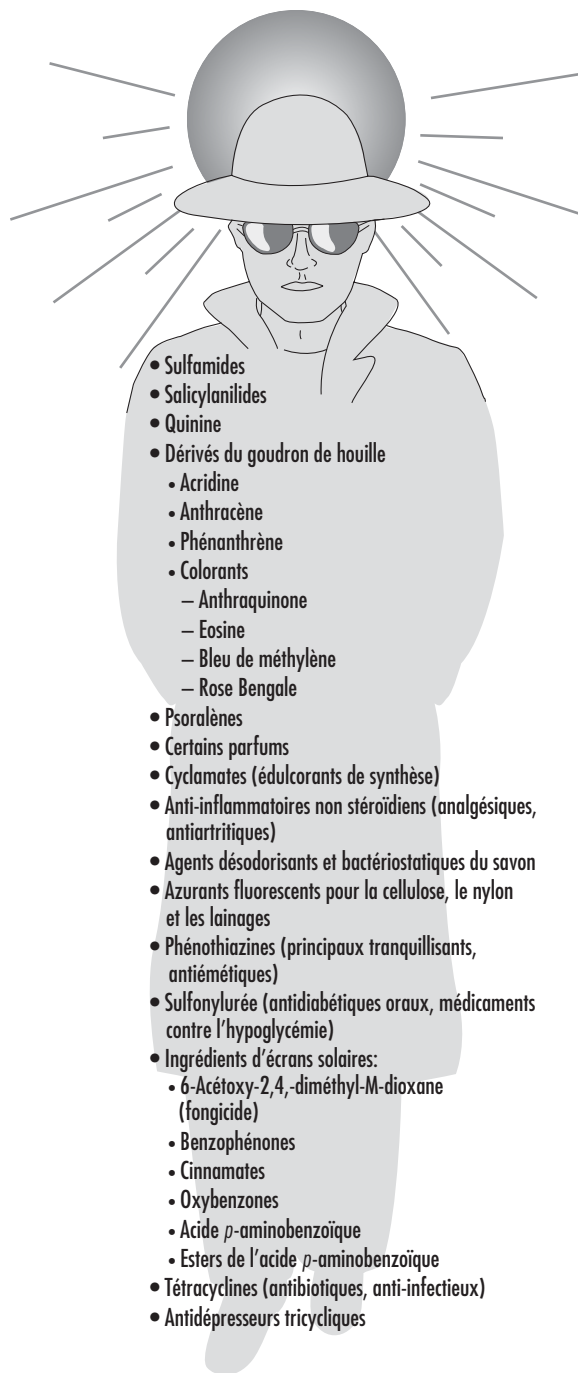
L'érythème, ou coup de soleil, se caractérise par une rougeur de la peau qui se manifeste dans les quatre à huit heures suivant l'exposition aux ultraviolets, puis disparaît progressivement après quelques jours. Un grave érythème peut entraîner la formation d'ampoules et une desquamation. Les UV-B et les UV-C sont environ mille fois plus puissants que les UV-A à cet égard (Parish, Jaenicke et Anderson, 1982), mais l'érythème provoqué par les UV-B à grande longueur d'onde (295 à 315 nm) est le plus grave et le plus persistant (Hausser, 1928), par suite d'une pénétration plus profonde dans l'épiderme. Il semble que la peau soit la plus sensible aux alentours de 295 nm (Luckiesh, Holladay et Taylor, 1930; Coblentz, Stair et Hogue, 1931), la sensibilité étant bien moindre (environ 0,07) à partir de 315 nm (McKinlay et Diffey, 1987).

A une longueur d'onde de 295 nm, la dose d'érythème (dose de rayonnement nécessaire pour produire rougeur et pigmentation, souvent désignée en français par le sigle HED) mentionnée dans les études les plus récentes va de 6 à 30 mJ/cm<sup>2</sup> pour une peau non bronzée légèrement pigmentée (Everett, Olsen et Sayer, 1965; Freeman et coll., 1966; Berger, Urbach et Davies, 1968). A 254 nm, la HED varie considérablement avec le temps écoulé après l'exposition et le niveau d'exposition antérieur de la peau, mais elle est en général de l'ordre de 20 mJ/cm<sup>2</sup> et peut atteindre 0,1 J/cm<sup>2</sup>. La pigmentation et le bronzage de la peau, et surtout l'épaississement de la couche cornée, peuvent augmenter la HED d'un ordre de grandeur.

#### La photosensibilisation

Les spécialistes de la santé au travail constatent souvent chez les travailleurs photosensibilisés les effets nocifs de l'exposition professionnelle aux UV. La photosensibilisation aux UV découle de l'utilisation de certains médicaments ou de l'application topique de certains produits (parfums, lotions hydratantes, etc.). Les réactions aux agents photosensibilisants résultent tant de la photoallergie (réaction allergique de la peau) que de la phototoxicité (irritation de la peau) après l'exposition aux UV d'origine solaire ou industrielle (les réactions de photosensibilisation sont également courantes en cas d'utilisation de matériel de bronzage). La photosensibilisation de la peau peut être due à des crèmes ou à des pommades, à des médicaments pris par voie buccale ou par injection ou encore à l'utilisation d'inhalateurs sur prescription médicale (voir figure 49.3). Le médecin qui prescrit un médicament pouvant avoir des effets photosensibilisants devrait toujours avertir le patient pour que celui-ci prenne les précautions nécessaires. Toutefois, il arrive souvent que le médecin conseille seulement d'éviter le soleil, sans mentionner les sources de rayonnement UV (parce que le public est rarement exposé à ces sources).

Figure 49.3 • Exemples d'agents photosensibilisants



#### Les effets différés

L'exposition chronique au soleil — et surtout aux UV-B — accélère le vieillissement de l'épiderme et accroît le risque de cancer de la peau (Fitzpatrick et coll., 1974; Forbes et Davies, 1982; Urbach, 1969; Passchier et Bosnjakovic, 1987). Plusieurs études épidémiologiques ont établi que l'incidence du cancer de la peau présente une forte corrélation avec la latitude, l'altitude et la

nébulosité, facteurs qui, eux-mêmes, sont en corrélation avec l'exposition aux UV (Scotto, Fears et Gori, 1980; OMS, 1993).

On n'a pas encore défini de relation quantitative exacte dose-effet permettant de prévoir le développement de cancers de la peau chez les humains, mais on sait que les individus à peau claire, en particulier d'ascendance celte, sont davantage prédisposés que les autres à ce type de cancer. Il faut noter, néanmoins, que l'exposition nécessaire pour produire des tumeurs de la peau chez les animaux peut être suffisamment étalée dans le temps pour ne pas causer d'érythème et que l'efficacité relative (par rapport à la crête de 302 nm) signalée dans ces études varie de la même façon que pour le coup de soleil (Cole, Forbes et Davies, 1986; Sterenborg et van der Leun, 1987).

#### L'œil

##### La photokératite et la photoconjonctivite

La photokératite et la photoconjonctivite sont des réactions inflammatoires aiguës dues aux UV-B et aux UV-C, qui se manifestent quelques heures après une exposition excessive et disparaissent normalement un ou deux jours plus tard.

##### Les lésions rétinienne dues à une lumière vive

Même s'il est peu probable qu'une source lumineuse puisse causer des brûlures à la rétine, l'exposition à des sources riches en lumière bleue peut provoquer des dommages photochimiques, susceptibles de causer des réductions temporaires ou permanentes de l'acuité visuelle. Toutefois, la réaction normale d'aversion à la lumière vive devrait prévenir cet effet, sauf si une personne fait un effort délibéré pour fixer la source. La contribution des UV aux lésions rétinienne est généralement très faible, parce que l'absorption des ultraviolets par le cristallin limite l'exposition de la rétine.

##### Les effets chroniques

L'exposition professionnelle aux UV pendant des dizaines d'années peut contribuer à la formation de cataractes et à l'apparition d'autres effets dégénératifs non reliés à l'œil, comme le vieillissement de l'épiderme et le cancer de la peau associés à l'exposition au soleil. L'exposition chronique au rayonnement infrarouge peut également accroître le risque de cataracte, mais avec une faible probabilité, compte tenu de la possibilité de se protéger les yeux.

Les ultraviolets actiniques (UV-B et UV-C) sont fortement absorbés par la cornée et la conjonctive. La surexposition de ces tissus cause la kératoconjonctivite, couramment appelée «conjonctivite du soudeur» ou «ophtalmie des neiges». Pitts a décrit le spectre d'action biologique et l'évolution de la photokératite dans la cornée de l'humain, du lapin et du singe (Pitts, 1974). La période de latence varie en raison inverse de la gravité de l'exposition (1 heure et demie à 24 heures, mais ordinairement entre 6 et 12 heures), le malaise disparaissant d'habitude dans les 48 heures. La conjonctivite apparaît alors; elle peut être accompagnée d'érythème de la peau du visage, autour des paupières. L'exposition aux UV, bien entendu, provoque rarement des lésions oculaires permanentes. Pitts et Tredici (1971) ont publié les seuils d'exposition pouvant provoquer la photokératite chez les humains, à intervalles de 10 nm entre 220 et 310 nm. La cornée serait la plus sensible à 270 nm, ce qui est très nettement différent du maximum pour la peau. On peut supposer que le rayonnement à 270 nm est biologiquement plus actif par suite de l'absence d'une couche cornée pouvant atténuer la dose reçue par le tissu épithélial de la cornée aux longueurs d'onde plus courtes. Selon ces études, le spectre d'action biologique ne variait pas autant que dans le cas de l'érythème, se situant entre 4 et 14 mJ/cm<sup>2</sup> à 270 nm. Le seuil correspondant à 308 nm était d'environ 100 mJ/cm<sup>2</sup>.

Des expositions répétées de l'œil à des niveaux potentiellement dangereux d'UV n'augmentent pas le pouvoir protecteur du tissu affecté (la cornée) comme le fait l'exposition de la peau (pigmentation et épaissement de la couche cornée). Ringvold et ses collaborateurs ont étudié les propriétés d'absorption des UV par la cornée (Ringvold, 1980a) et l'humeur aqueuse (Ringvold, 1980b), ainsi que les effets des UV-B sur l'épithélium cornéen (Ringvold, 1983), le stroma cornéen (Ringvold et Davanger, 1985) et l'endothélium cornéen (Ringvold, Davanger et Olsen, 1982; Olsen et Ringvold, 1982). Leurs études au microscope électronique ont montré que le tissu cornéen possède de remarquables propriétés de régénération. Bien qu'il y ait eu manifestement des dommages importants dans toutes ces couches, apparaissant initialement dans les membranes cellulaires, la reconstitution morphologique était complète au bout d'une semaine. La destruction de kératocytes était évidente dans le stroma, mais la reconstitution de l'endothélium était prononcée, en dépit du fait que les cellules endothéliales ne se régénèrent pas normalement rapidement. Cullen et ses collaborateurs (1984) ont étudié les lésions endothéliales qui subsistaient à la suite d'une exposition persistante aux UV. Riley et ses collaborateurs (1987) ont également étudié l'endothélium cornéen après exposition aux UV-B et ont conclu que des atteintes ponctuelles même graves étaient peu susceptibles d'avoir des effets différés; toutefois, ils ont aussi abouti à la conclusion qu'une exposition chronique pouvait accélérer les changements de l'endothélium correspondant au vieillissement de la cornée.

Les longueurs d'onde supérieures à 295 nm peuvent traverser la cornée et sont presque complètement absorbées par le cristallin. Pitts, Cullen et Hacker (1977b) ont établi que les lapins pouvaient développer des cataractes à des longueurs d'onde comprises entre 295 et 320 nm. Les seuils d'exposition produisant une opacité temporaire se situaient entre 0,15 et 12,6 J/cm<sup>2</sup>, selon la longueur d'onde, le seuil minimal se trouvant à 300 nm. L'opacité ne devenait permanente qu'à des niveaux d'exposition supérieurs. Le cristallin ne semblait pas affecté entre 325 et 395 nm, même à des niveaux d'exposition allant de 28 à 162 J/cm<sup>2</sup> (Pitts, Cullen et Hacker, 1977a; Zuclich et Connolly, 1976). Ces études établissent clairement, comme on pouvait s'y attendre, le danger particulier de l'intervalle spectral situé entre 300 et 315 nm, dans lequel les photons ont une bonne pénétration et possèdent suffisamment d'énergie pour causer des dommages photochimiques.

Taylor et ses collaborateurs (1988) ont fourni des preuves épidémiologiques du rôle que les UV-B solaires jouent dans l'étiologie de la cataracte sénile, mais n'ont pas trouvé de corrélation entre la cataracte et l'exposition aux UV-A. L'hypothèse selon laquelle les UV-A peuvent causer la cataracte, souvent admise auparavant à cause de la forte absorption des UV-A par le cristallin, n'a été confirmée ni par les études expérimentales en laboratoire ni par les études épidémiologiques. A partir de données expérimentales montrant que les seuils d'exposition pouvant provoquer la photokératite sont inférieurs à ceux de la cataracte, on peut conclure que l'exposition quotidienne à des niveaux inférieurs à ces seuils devrait être considérée comme dangereuse pour le cristallin. Même si l'on supposait que la cornée soit exposée à un niveau presque équivalent au seuil de la photokératite, la dose quotidienne d'UV reçue par le cristallin à 308 nm peut être estimée à moins de 120 mJ/cm<sup>2</sup> après 12 heures à l'extérieur (Sloney, 1987). En fait, l'exposition quotidienne moyenne devrait en pratique être inférieure à la moitié de cette valeur.

Ham et ses collaborateurs (1982) ont déterminé le spectre d'action biologique de la photorétinite provoquée par les UV dans la bande de 320 à 400 nm. Ils ont montré que les seuils, qui étaient de 20 à 30 J/cm<sup>2</sup> à 440 nm dans le spectre visible, tombaient à près de 5 J/cm<sup>2</sup> dans une bande de 10 nm centrée sur 325 nm. Le spectre d'action biologique croissait uniformément à mesure que la longueur d'onde baissait. Il faudrait donc conclure que des

niveaux très inférieurs à 5 J/cm<sup>2</sup> à 308 nm pourraient produire des lésions rétinienne, qui n'apparaîtraient cependant que 24 à 48 heures après l'exposition. Comme il n'existe aucune donnée publiée sur les seuils d'exposition pouvant provoquer des lésions rétinienne au-dessous de 325 nm, on peut supposer que le spectre d'action correspondant aux dommages photochimiques subis par les tissus de la cornée et du cristallin s'applique en gros à la rétine, ce qui permet de fixer le seuil des lésions aux alentours de 0,1 J/cm<sup>2</sup>.

Les effets mutagènes et cancérigènes des UV sur la peau étant clairement établis, l'extrême rareté des cancers de la cornée et de la conjonctive est tout à fait remarquable. Il ne semble y avoir aucune preuve scientifique liant l'exposition aux UV à des cancers quelconques de la cornée ou de la conjonctive chez les humains (contrairement au cas des bovins). On pourrait attribuer ce phénomène à l'existence d'un système immunitaire très efficace dans l'œil humain, étant donné que certains travailleurs d'extérieur sont aussi exposés aux UV que le bétail. Cette conclusion est confirmée par le fait que des personnes souffrant d'une déficience immunitaire, comme l'épithéliomatose pigmentaire, développent fréquemment des tumeurs de la cornée et de la conjonctive (Stenson, 1982).

### Les normes de sécurité

Des limites d'exposition professionnelle aux UV ont été établies; elles comprennent une courbe de spectre d'action englobant les seuils d'effets aigus tirés des études de l'érythème et de la kérato-conjonctivite (Sloney, 1972; IRPA, 1989). Cette courbe ne diffère pas sensiblement des données collectives sur les seuils, compte tenu des erreurs de mesure et des fluctuations des réactions individuelles, et se situe bien en deçà des seuils cataractogènes des UV-B.

La limite d'exposition est la plus basse à 270 nm (0,003 J/cm<sup>2</sup>). A 308 nm, par exemple, elle est de 0,12 J/cm<sup>2</sup> (ACGIH, 1995; IRPA, 1988b). Que l'exposition totale résulte d'un petit nombre d'expositions d'une certaine intensité pendant la journée, d'une seule exposition très brève ou d'une exposition constante pendant huit heures à quelques microwatts par cm<sup>2</sup>, le risque biologique est le même, la limite ci-dessus s'appliquant à une pleine journée de travail.

### La protection en milieu de travail

L'exposition professionnelle aux UV devrait être réduite au minimum possible. Dans le cas des sources artificielles, il faudrait donner la priorité aux moyens techniques (filtrage, écrans, revêtements). Les mesures organisationnelles de prévention, comme la restriction de l'accès, peuvent réduire les exigences de protection personnelle.

Les travailleurs d'extérieur (travailleurs agricoles, manœuvres, travailleurs du bâtiment, pêcheurs, etc.) peuvent minimiser les risques d'exposition aux UV solaires en portant des vêtements faits d'un tissu à trame serrée et surtout un chapeau à larges bords protégeant le visage et le cou. Ils peuvent également appliquer un écran solaire sur la peau exposée. Ces travailleurs devraient avoir accès à un lieu ombragé et disposer de toutes les mesures de protection nécessaires mentionnées ci-dessus.

Dans l'industrie, de nombreuses sources d'UV peuvent causer des lésions oculaires aiguës en très peu de temps. Il existe de nombreuses formes de protecteurs oculaires assurant différents degrés de protection, selon l'utilisation prévue. Les protecteurs à usage industriel comprennent les masques de soudage (qui protègent en outre les yeux contre la lumière visible trop vive et les infrarouges, et le visage contre les étincelles et les éclats), les protecteurs faciaux, les lunettes à coques et les lunettes antiultraviolets. D'une façon générale, les protecteurs oculaires à usage industriel devraient être bien adaptés à la morphologie du visage, de manière à ne pas laisser de fentes par lesquelles les UV pour-

raient directement atteindre l'œil, et être solidement construits pour prévenir les blessures.

Le choix des protecteurs oculaires dépend des facteurs suivants :

- intensité et caractéristiques spectrales d'émission de la source d'UV;
- comportement des personnes à proximité des sources d'UV (la distance et le temps d'exposition sont importants);
- propriétés de transmission des protecteurs oculaires;
- forme de la monture (conçue, par exemple, pour prévenir l'exposition périphérique de l'œil aux UV directs non absorbés).

En cas d'exposition industrielle, on peut évaluer le risque pour les yeux en mesurant l'intensité des sources et en les comparant aux limites recommandées (Duchêne, Lakey et Repacholi, 1991).

### Le mesurage des ultraviolets

Étant donné que les effets biologiques dépendent fortement de la longueur d'onde, la principale caractéristique de toute source d'UV est sa distribution spectrale de puissance ou d'éclairement énergétique, que l'on mesure à l'aide d'un spectroradiomètre, appareil constitué par une optique d'entrée, un monochromateur, un détecteur d'UV et un dispositif de lecture. Il est à noter que le spectroradiomètre n'est pas d'un usage courant en santé au travail.

Dans beaucoup de cas pratiques, on se sert d'un appareil de mesure à large bande pour déterminer les durées d'exposition ne présentant pas de risque. À des fins de sécurité, la réponse spectrale peut être adaptée à la fonction de risque spectral utilisée dans les directives d'exposition de la Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)) et de l'Association internationale pour la protection contre les radiations (International Radiation Protection Association (IRPA)). En l'absence d'appareils de mesure adéquats, on peut commettre de graves erreurs dans l'évaluation des risques. Il existe également des dosimètres personnels UV (par exemple, les dosimètres à film de polysulfone), mais ils sont surtout utilisés pour la recherche sur la sécurité du travail plutôt que dans des études d'évaluation de risques.

### Conclusion

L'exposition aux UV provoque constamment des dommages moléculaires dans des composants cellulaires essentiels, mais ces dommages déclenchent des mécanismes naturels de régénération des tissus cutanés et oculaires affectés. Les lésions biologiques aiguës n'apparaissent que lorsque ces mécanismes sont surchargés (Smith, 1988). Compte tenu de toutes ces raisons, les spécialistes de la sécurité et de la santé au travail poursuivent leurs efforts pour minimiser l'exposition professionnelle aux ultraviolets.

## ● LE RAYONNEMENT INFRAROUGE

R. Matthes

Les infrarouges constituent la partie du spectre des rayonnements non ionisants située entre les ondes micrométriques et la lumière visible. Ils font partie de notre environnement naturel et nous sommes tous exposés à de petites quantités d'infrarouges dans presque tous les aspects de la vie quotidienne, aussi bien à l'intérieur que durant les activités de loisir au soleil. Toutefois, des expositions d'une très forte intensité peuvent résulter de certains procédés techniques employés au travail.

De nombreux procédés industriels comprennent une phase de traitement thermique de différents types de matériaux. Les sour-

ces de chaleur utilisées, ainsi que les matériaux chauffés proprement dits émettent en général des IR d'une intensité telle que beaucoup de travailleurs courent un risque d'exposition.

### Les concepts et les quantités

Les infrarouges (IR) ont des longueurs d'onde comprises entre 780 nm et 1 mm. Conformément à la classification de la Commission internationale de l'éclairage (CIE), cette bande est répartie entre les IR-A (de 780 nm à 1,4  $\mu\text{m}$ ), les IR-B (de 1,4  $\mu\text{m}$  à 3  $\mu\text{m}$ ) et les IR-C (de 3  $\mu\text{m}$  à 1 mm). Cette subdivision suit d'une façon approximative les caractéristiques d'absorption des IR dans les tissus qui dépendent de la longueur d'onde et les différents effets biologiques résultants.

L'intensité et la distribution temporelle et spatiale des IR sont exprimées à l'aide de différentes quantités et unités radiométriques. Pour tenir compte des propriétés optiques et physiologiques de l'œil, on fait d'habitude la distinction entre les petites sources «ponctuelles» et les sources «étendues», le critère de distinction étant la valeur en radians de l'angle  $\alpha$ , mesuré au niveau de l'œil, que sous-tend la source. Cet angle peut être exprimé sous forme d'un quotient, la dimension  $D_L$  de la source lumineuse divisée par la distance  $r$  qui la sépare de l'observateur. Les sources étendues sont celles qui sous-tendent, au niveau de l'œil, un angle supérieur à  $\alpha_{\min}$  (ordinairement, 11 milliradians). Pour toute source étendue, il y a une distance d'observation à laquelle  $\alpha$  est égal à  $\alpha_{\min}$ ; aux distances supérieures, la source étendue peut être assimilée à une source ponctuelle. Dans le domaine de la protection contre le rayonnement optique, les quantités les plus importantes relatives aux sources étendues sont la *luminance énergétique* ( $L$ , exprimée en  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ) et la *luminance énergétique intégrée dans le temps* ( $L_p$ , en  $\text{Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ), qui définit la «brillance» de la source. Dans le domaine de l'évaluation des risques pour la santé, les quantités les plus courantes relatives aux sources ponctuelles et aux sources situées à une distance telle que  $\alpha < \alpha_{\min}$  sont l'*éclairement énergétique* ( $E$ , en  $\text{Wm}^{-2}$ ), qui correspond au concept de débit de dose d'exposition, et l'*exposition énergétique* ( $H$ , en  $\text{Jm}^{-2}$ ), qui correspond à celui de dose d'exposition.

Dans certaines bandes du spectre, les effets biologiques dépendent beaucoup de la longueur d'onde. Cela impose de recourir à d'autres quantités spectroradiométriques (par exemple, la luminance énergétique spectrale,  $L_\lambda$ , qui est exprimée en  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ ) pour pondérer les valeurs d'émission physique de la source en fonction du spectre d'action lié à l'effet biologique.

### Les sources et l'exposition professionnelle

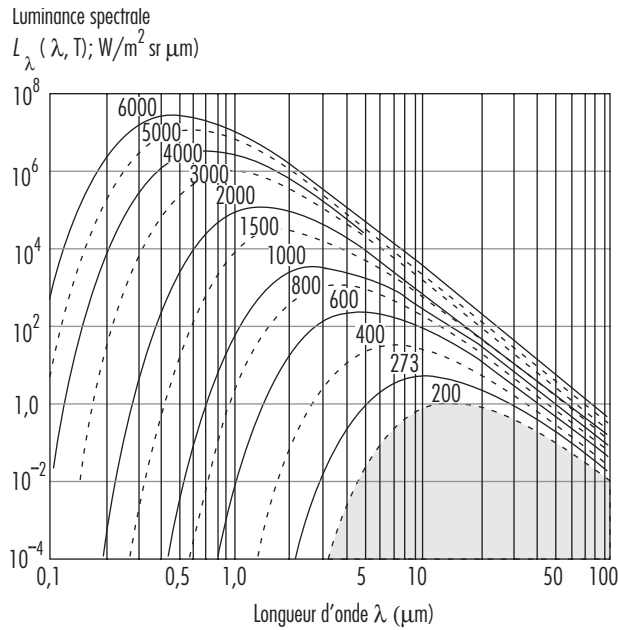
Différentes sources naturelles et artificielles produisent des IR. Leur émission spectrale peut être concentrée sur une longueur d'onde unique (laser) ou être répartie sur une plage importante de longueurs d'onde.

En général, les mécanismes générateurs de rayonnements optiques sont les suivants :

- excitation thermique (rayonnement de corps noir);
- décharge dans un gaz;
- amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnements (laser), le mécanisme de la décharge gazeuse revêtant une importance moindre dans la bande des IR.

L'émission des sources les plus couramment utilisées dans de nombreux procédés industriels est d'origine thermique. On peut l'exprimer d'une façon approximative à l'aide des lois physiques régissant le rayonnement d'un corps noir si l'on connaît la température absolue de la source. La densité de puissance globale ( $M$ , en  $\text{Wm}^{-2}$ ) rayonnée par un corps noir (voir figure 49.4) est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

Figure 49.4 • Luminance spectrale  $L_\lambda$  d'un corps noir rayonnant à la température absolue indiquée (en dK) sur chaque courbe



$$M(T) = 5,67 \times 10^{-8} T^4$$

Elle est proportionnelle à la puissance quatre de la température du corps rayonnant ( $T$ , en K). La luminance énergétique spectrale est exprimée par la loi fondamentale du rayonnement de Planck:

$$L_\lambda = \frac{2c^2h}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{kT}} - 1 \right)}$$

$c$  = vitesse de la lumière  
 $h$  = constante de Planck  
 $k$  = constante de Stefan-Boltzmann

et la longueur d'onde correspondant à l'émission maximale ( $\lambda_{\max}$ ) est, d'après la loi du déplacement de Wien, donnée par la formule:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T}$$

De nombreux lasers employés dans l'industrie et en médecine émettent un rayonnement infrarouge très intense. De manière générale, les lasers se distinguent d'autres sources de rayonnement par certaines caractéristiques pouvant influencer sur les risques liés à l'exposition, comme la durée très courte des impulsions ou l'éclairement énergétique extrêmement élevé. C'est pourquoi on examinera le rayonnement laser dans une autre partie du présent chapitre.

Nombre de procédés industriels font appel à des sources qui émettent un important rayonnement dans le visible et l'infrarouge, et présentent de ce fait un risque d'exposition pour un grand nombre de travailleurs: boulangers, souffleurs de verre, opérateurs de fours de séchage, fondeurs, forgerons, affineurs, sapeurs-pompiers. A côté des lampes, il existe de nombreuses autres sources de ce type de rayonnement comme les flammes, chalumeaux, bassins de métal en fusion, pièces de métal incandescentes que l'on trouve dans les fonderies, les aciéries et dans beaucoup d'établissements de l'industrie lourde. Le tableau 49.1 présente quelques exemples de sources de rayonnement infrarouge et de leurs applications.

### Les effets biologiques

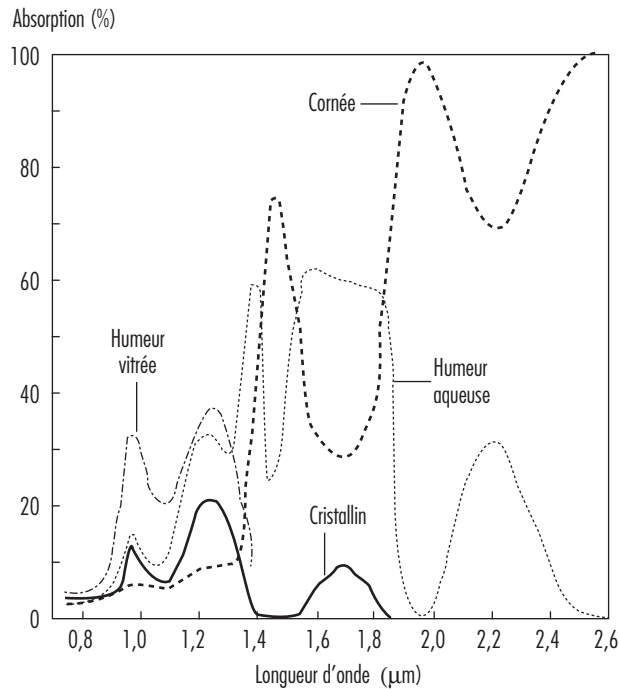
En général, les rayonnements optiques ne pénètrent pas très profondément dans les tissus biologiques. Par conséquent, les principaux tissus affectés sont ceux de la peau et des yeux. Dans la plupart des situations d'exposition, le principal mécanisme d'interaction des IR est de nature thermique. Seules les impulsions très courtes que peuvent produire les lasers, que nous n'examinons pas ici, peuvent également donner lieu à des effets thermomécaniques. En général, les IR ne provoquent pas d'ionisation ni de rupture des liaisons chimiques parce que l'énergie des particules, inférieure à environ 1,6 eV, est trop faible pour cela. Pour la même raison, les réactions photochimiques ne deviennent importantes qu'aux longueurs d'onde plus courtes du visible et de l'ultraviolet. Les différents effets des IR sur la santé découlent principalement des propriétés optiques des tissus dépendant de la longueur d'onde, comme l'absorption spectrale des tissus oculaires (voir figure 49.5).

Tableau 49.1 • Sources de rayonnement infrarouge, populations exposées et niveaux approximatifs d'exposition

Source	Application ou population exposée	Exposition
Lumière solaire	Travailleurs d'extérieur, agriculteurs, travailleurs du bâtiment, marins, public	500 Wm <sup>-2</sup>
Lampes à incandescence	Population et travailleurs en général Éclairage général, séchage des encres et des peintures	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup> Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
Lampes à incandescence à halogène	(Voir lampes à incandescence) Photocopie (fixage), procédés généraux (séchage, cuisson, rétrécissement, adoucissage)	50-200 Wm <sup>-2</sup> (à 50 cm)
Diodes électroluminescentes (par exemple, à l'arséniure de gallium)	Jouets, électronique grand public, transmission de données, etc.	10 <sup>5</sup> Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
Lampes au xénon	Projecteurs, simulateurs solaires, projecteurs mobiles Opérateurs de caméras d'imprimerie, travailleurs de laboratoires d'optique, artistes de spectacles	10 <sup>7</sup> Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
Fusion de l'acier	Opérateurs de fours sidérurgiques, travailleurs des aciéries	10 <sup>5</sup> Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
Batteries de lampes à infrarouges	Chauffage et séchage industriels	10 <sup>3</sup> à 8 × 10 <sup>3</sup> Wm <sup>-2</sup>
Lampes à infrarouges pour hôpitaux	Couveuses	100-300 Wm <sup>-2</sup>

49. LES RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Figure 49.5 • Absorption spectrale des milieux oculaires



**Les effets sur l'œil**

En général, l'œil est bien adapté pour se prémunir des rayonnements optiques naturels. De plus, il est physiologiquement protégé contre les sources de lumière trop vives, comme le soleil et les lampes à haute intensité, par une réaction d'aversion qui limite la durée d'exposition à une fraction de seconde (environ 0,25 s).

Les IR-A affectent surtout la rétine, à cause de la transparence du milieu oculaire. Lorsqu'on regarde directement une source ponctuelle ou un rayon laser, les propriétés de focalisation de l'œil dans la région des IR-A rendent la rétine beaucoup plus vulnérable que n'importe quelle autre partie du corps. Pour les durées d'expositions brèves, on considère que l'échauffement de l'iris provoqué par l'absorption de rayonnement dans le visible ou le proche infrarouge joue un rôle dans le développement d'opacités cristalliniennes.

Aux longueurs d'onde croissantes à partir d'environ 1 μm, l'absorption du rayonnement par les tissus oculaires augmente. On considère donc que l'absorption des IR-A tant par le cristallin que par l'iris pigmenté joue un rôle dans la formation d'opacités cristalliniennes. Les lésions du cristallin sont attribuées aux longueurs d'onde inférieures à 3 μm (IR-A et IR-B). L'humeur aqueuse et le cristallin deviennent particulièrement absorbants au-delà de 1,4 μm.

Dans la région des IR-B et des IR-C, les tissus oculaires s'opacifient à cause de l'absorption du rayonnement par l'eau qu'ils contiennent, notamment dans la cornée et l'humeur aqueuse. Au-delà de 1,9 μm, c'est en pratique la cornée qui absorbe tout le rayonnement. L'absorption par la cornée des IR à grande longueur d'onde peut échauffer l'œil par conduction thermique. Du fait de la régénération rapide des cellules superficielles de la cornée, les lésions qui se limitent à la couche cornéenne extérieure sont le plus souvent temporaires. Dans la bande des IR-C, l'exposition peut causer sur la cornée des brûlures semblables à celles de la peau. Toutefois, de telles brûlures sont rares grâce à la réaction d'aversion déclenchée par la douleur ressentie.

**Les effets sur la peau**

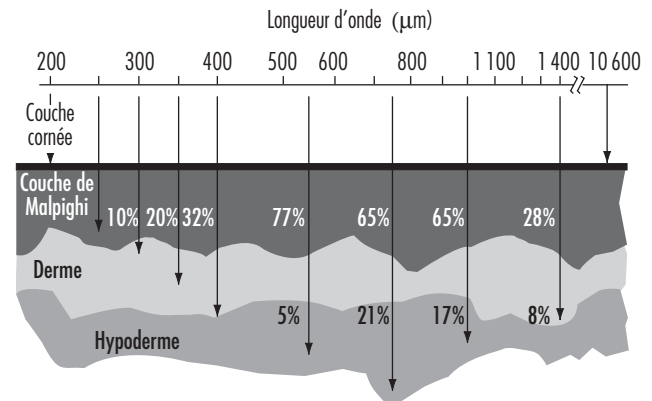
Les IR ne pénètrent pas très profondément dans la peau. Par conséquent, un rayonnement IR de très forte intensité peut produire des effets thermiques localisés plus ou moins prononcés et même de graves brûlures. Ces effets dépendent des propriétés optiques de la peau, comme la profondeur de pénétration, qui est fonction de la longueur d'onde (voir figure 49.6). Aux grandes longueurs d'onde notamment, une forte exposition peut provoquer un échauffement local intense et des brûlures. Les seuils de ces effets dépendent du temps, à cause de la nature des processus de transfert thermique dans la peau. Ainsi, une irradiation de 10 kWm<sup>-2</sup> peut causer une sensation de douleur dans les 5 secondes, tandis qu'une exposition à 2 kWm<sup>-2</sup> ne produirait pas le même effet en moins de 50 secondes environ.

Si l'exposition s'étend sur de très longues périodes, même à des intensités très inférieures au seuil de la douleur, la charge thermique imposée à l'organisme peut être importante, surtout si le rayonnement est réparti sur tout le corps (par exemple, à proximité d'une coulée d'acier), et provoquer alors un déséquilibre du système naturel de thermorégulation. Le seuil de tolérance à une telle exposition dépend de différents facteurs tant individuels qu'environnementaux, comme la capacité du système de thermorégulation, l'état du métabolisme pendant l'exposition ou encore les conditions ambiantes de température, d'humidité et de circulation d'air (vitesse du vent). En l'absence de travail physique, une exposition maximale de 300 Wm<sup>-2</sup> peut être tolérée sur une période de 8 heures, dans certaines conditions environnementales, mais cette valeur baisse à environ 140 Wm<sup>-2</sup> en cas de travail physique intense.

**Les normes d'exposition**

Les effets biologiques qui dépendent de la longueur d'onde et de la durée d'exposition ne sont considérés comme intolérables qu'en cas de dépassement de certains seuils d'intensité ou de dose. Pour protéger les travailleurs et le public de telles conditions d'exposition, différentes organisations internationales — comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le Bureau international du Travail (BIT), le Comité international des rayonnements non ionisants de l'Association internationale pour la protection contre

Figure 49.6 • Profondeur de pénétration dans la peau de rayonnements de différentes longueurs d'onde



Les chiffres représentent le pourcentage du rayonnement incident qui parvient à une couche donnée de la peau.

Source: OMS, 1982.

Tableau 49.2 • Fonction de risque thermique rétinien

Longueur d'onde (nm)	$R_\lambda$	Longueur d'onde (nm)	$R_\lambda$
400	1,0	460	8,0
405	2,0	465	7,0
410	4,0	470	6,2
415	8,0	475	5,5
420	9,0	480	4,5
425	9,5	485	4,0
430	9,8	490	2,2
435	10,0	495	1,6
440	10,0	500-700	1,0
445	9,7	700-1 050	$10^{(700-\lambda)/500}$
450	9,4	1 050-1 400	0,2
455	9,0		

Source: ACGIH, 1996.

les radiations (International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (INIRC/IRPA) ou son émanation, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)), et la Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)) — ont proposé des limites d'exposition aux IR produits par les sources optiques tant cohérentes qu'incohérentes. La plupart des projets nationaux et internationaux de directives limitant l'exposition humaine aux infrarouges sont fondés ou tout simplement calqués sur les valeurs limites d'exposition (VLE) publiées par l'ACGIH (1993). Ces limites sont largement reconnues et fréquemment utilisées en milieu de travail. Basées sur les connaissances scientifiques actuelles, elles sont destinées à prévenir les lésions d'origine thermique de la rétine et de la cornée et d'éventuels effets à long terme sur le cristallin.

La version 1994 des VLE de l'ACGIH (1994) fixe les limites d'exposition ci-après.

1. Pour protéger la rétine contre les lésions d'origine thermique en cas d'exposition à la lumière visible (sources lumineuses puissantes), la luminance énergétique spectrale  $L_\lambda$  en  $W/(m^2 \text{ sr nm})$ , pondérée par la fonction de risque thermique rétinien  $R_\lambda$  (voir tableau 49.2) dans l'intervalle de longueurs d'onde  $\Delta_\lambda$  et intégrée sur la gamme des longueurs d'onde comprises entre 400 et 1 400 nm, ne devrait pas dépasser:

$$\sum_{400}^{1400} L_\lambda R_\lambda \Delta_\lambda \leq \frac{5 \times 10^4}{\alpha \cdot t^{3/4}}$$

$t$  étant la durée d'observation, limitée à des intervalles de  $10^{-3}$  à 10 secondes (c'est-à-dire en cas d'observation accidentelle plutôt que de fixation de la source) et  $\alpha$ , l'angle en radians que sous-tend la source, calculé par la formule  $\alpha =$  dimension maximale de la source/distance de la source  $R_\lambda$  (voir tableau 49.2).

2. Pour protéger la rétine du rayonnement des lampes IR ou de toute autre source en proche infrarouge qui n'émet pas en

même temps un stimulus visuel intense, la luminance énergétique perçue par l'œil (sur la base d'un diamètre de pupille de 7 mm) dans la gamme des longueurs d'onde de 770 à 1 400 nm, devrait, en cas d'observation prolongée, être limitée à:

$$\sum_{770}^{1400} L_\lambda \Delta_\lambda \leq \frac{6 \times 10^3}{\alpha}$$

Cette limite est fondée sur un diamètre de pupille de 7 mm, car en l'absence de lumière visible, il peut ne pas y avoir réaction d'aversion (consistant, par exemple à fermer les yeux).

3. Pour éviter d'éventuels effets à long terme sur le cristallin (cataracte, par exemple) et pour protéger la cornée d'une surexposition, le rayonnement IR d'une longueur d'onde supérieure à 770 nm devrait être limité à  $100 \text{ W/m}^2$  pour les durées d'exposition supérieures à 1 000 secondes et à:

$$\sum_{770}^{3000} E_\lambda \Delta_\lambda \leq 1,8 \times 10^4 t^{-3/4}$$

pour les périodes plus courtes.

4. Dans le cas des personnes aphasiques, des fonctions de pondération distinctes et les VLE correspondantes sont données pour la gamme des longueurs d'onde comprises entre l'ultra-violet et le visible (305 à 700 nm).

### Le mesurage du rayonnement optique

On dispose de techniques et d'appareils radio métriques permettant d'analyser le risque des rayonnements optiques pour la peau et les yeux. Il est en général très utile, pour caractériser une source lumineuse courante, d'en mesurer la luminance énergétique. Par contre, l'éclairement énergétique et l'exposition énergétique conviennent mieux pour définir les conditions dangereuses d'exposition à des sources optiques. L'évaluation des sources à large bande est plus complexe que celle des sources à longueur d'onde unique ou à bande très étroite, parce qu'il faut tenir compte des caractéristiques spectrales et de la dimension de la source. Le spectre de certaines lampes peut comprendre à la fois des émissions réparties sur un grand intervalle de longueurs d'onde et quelques raies représentant des longueurs d'onde uniques. L'omission de l'énergie contenue dans ces raies peut occasionner de sérieuses erreurs dans la représentation d'un tel spectre.

Dans l'évaluation du risque pour la santé, l'exposition doit être mesurée à travers une ouverture de la taille prescrite dans les normes. En général, une ouverture de 1 mm est la plus petite que l'on puisse utiliser en pratique. Toutefois, les longueurs d'onde supérieures à 0,1 mm posent des difficultés dans ce cas par suite des importants effets de diffraction causés par l'ouverture. Dans cette bande, une fenêtre de  $1 \text{ cm}^2$  (cercle de 11 mm de diamètre) est acceptée parce que les points chauds sont plus étendus dans cet intervalle qu'aux longueurs d'onde plus courtes. Pour l'évaluation des risques rétinien, la taille de la fenêtre se base sur le diamètre moyen d'une pupille, ce qui correspond à 7 mm.

Habituellement, les mesures effectuées dans le domaine optique sont très complexes. Si elles sont faites par des personnes n'ayant pas la formation nécessaire, elles peuvent mener à des conclusions erronées. On trouvera un résumé détaillé des méthodes de mesure dans Sliney et Wolbarsht (1980).

### Les mesures de protection

La méthode de protection courante la plus efficace contre le rayonnement optique consiste à envelopper complètement la source et à

fermer toutes les voies que le rayonnement de fuite peut emprunter. Grâce à cette méthode, il devrait être facile de respecter les limites d'exposition dans la plupart des cas. Si ce n'est pas possible, il faut envisager la protection individuelle. Par exemple, on peut recourir aux moyens courants de protection des yeux (lunettes à coques, visières ou vêtements protecteurs). Si les conditions de travail ne permettent pas de prendre ces mesures, il peut être nécessaire de recourir à des mesures organisationnelles de prévention ou encore de limiter l'accès aux sources très intenses. Dans certains cas, il faudra même songer, pour protéger les travailleurs, à réduire soit la puissance de la source, soit la période de travail (pauses destinées à combattre la contrainte thermique), soit les deux.

### Conclusion

En général, le rayonnement infrarouge provenant des sources les plus courantes, comme les lampes, et de la plupart des applications industrielles est inoffensif pour les travailleurs. Sur certains lieux de travail, cependant, les IR peuvent constituer un risque pour la santé, compte tenu surtout de la multiplication rapide des lampes spécialisées et des procédés à haute température utilisés dans l'industrie, les sciences et la médecine. Si l'exposition est assez importante, on ne peut pas exclure la possibilité d'effets préjudiciables (principalement aux yeux, mais aussi à la peau). De ce fait, il faut s'attendre à ce que l'élaboration de normes d'exposition mondialement reconnues prenne de plus en plus d'ampleur. Pour protéger les travailleurs d'une exposition excessive, des mesures de protection comme l'emploi d'écrans (adaptés à la vision) ou de vêtements protecteurs devraient être obligatoires.

Le principal effet biologique attribué aux IR est la cataracte (cataracte des verriers ou des fondeurs). En cas d'exposition de longue durée, même à des niveaux relativement bas, l'organisme est soumis à la contrainte thermique. Dans ces conditions, d'autres facteurs doivent être pris en considération, comme la température du corps, la déperdition thermique due à la sudation et les facteurs environnementaux.

Des guides pratiques ont été mis au point dans différents pays industriels pour renseigner et former les travailleurs. On en trouve un relevé complet dans Sliney et Wolbarsht (1980).

## ● LE RAYONNEMENT VISIBLE ET INFRAROUGE

David H. Sliney

La lumière et l'énergie rayonnante infrarouge sont deux formes de rayonnement optique qui, avec le rayonnement ultraviolet, forment le spectre optique. Dans ce spectre, les différentes longueurs d'onde peuvent avoir des effets biologiques très divers. C'est pour cette raison que l'on peut être amené à subdiviser encore le spectre optique.

Le mot *lumière* devrait être réservé aux longueurs d'onde d'énergie rayonnante comprises entre 400 et 760 nm, qui suscitent une réaction visuelle au niveau de la rétine (CIE, 1987). La lumière est la principale composante du rayonnement émis par les lampes d'éclairage, les écrans de visualisation et une vaste gamme de sources d'éclairage. Bien que l'éclairage soit indispensable pour la vision, certaines sources de lumière peuvent provoquer des réactions physiologiques indésirables, comme des éblouissements gênants ou inconfortables, des papillotements et d'autres formes de stress oculaire si les tâches ne sont pas organisées d'une manière satisfaisante du point de vue ergonomique. L'émission d'une lu-

mière intense résultant de certains procédés industriels, comme le soudage à l'arc, peut avoir en outre des effets dangereux.

Le rayonnement infrarouge (longueurs d'onde allant de 760 nm à 1 mm), communément appelé *rayonnement thermique* ou *chaleur radiante*, est émis par n'importe quel objet porté à haute température (moteur chaud, bain de métal en fusion et autres sources dans les fonderies, surface ayant subi un traitement thermique, lampe à incandescence, système de chauffage par rayonnement, etc.). Beaucoup d'autres appareils électriques émettent également des infrarouges: moteurs électriques, génératrices, transformateurs et différents équipements électroniques.

Le rayonnement infrarouge contribue à la contrainte thermique. Une température et une humidité ambiantes élevées peuvent, en l'absence d'une circulation d'air suffisante, s'ajouter à la chaleur rayonnante pour engendrer une contrainte thermique potentiellement dommageable. Même dans un environnement à température modérée, l'exposition à des sources de chaleur rayonnante mal contrôlées peut être une cause d'inconfort, ce qui est un inconvénient ergonomique.

### Les effets biologiques

La réaction d'aversion de l'œil face à une lumière intense et la réaction à la douleur qu'une forte chaleur rayonnante provoque sur la peau limitent les risques professionnels que le rayonnement visible et infrarouge fait courir aux yeux et à la peau. L'œil est bien armé pour se protéger des lésions aiguës que peut causer le rayonnement optique du soleil (c'est-à-dire énergie rayonnante UV, visible et IR). Grâce à la réaction d'aversion, il échappe en général aux effets de sources intenses telles que les lampes à arc et les arcs de soudage, car la durée d'exposition est très courte et de l'ordre d'une fraction de seconde (environ 0,2 s). Toutefois, les sources riches en infrarouges qui n'émettent pas en même temps un fort stimulus visuel peuvent être dangereuses pour le cristallin, en cas d'exposition de longue durée. Il est également possible de fixer délibérément le soleil, un arc électrique ou un champ couvert de neige, avec risque de perte de vision temporaire (et parfois permanente). De plus, dans un milieu industriel où les travailleurs sont exposés à des lumières intenses apparaissant en bas du champ de vision, les mécanismes de protection de l'œil sont moins efficaces. Dans ces cas, il est très important de prendre certaines précautions.

Les sources intenses de lumière et d'infrarouges présentent au moins cinq risques distincts pour les yeux et la peau, qu'il importe de bien comprendre pour pouvoir choisir les mesures de protection adéquates. À part les risques que pose le rayonnement ultraviolet émis par certaines sources intenses de lumière, il faudrait tenir compte des risques suivants (Sliney et Wolbarsht, 1980; OMS, 1982):

1. Les lésions thermiques de la rétine, qui peuvent se produire entre 400 et 1 400 nm. Normalement, ces lésions ne peuvent être provoquées que par des lasers, des arcs très intenses au xénon ou une explosion nucléaire. Une brûlure locale de la rétine provoque la formation d'une zone insensible à la lumière (scotome).
2. Les lésions photochimiques de la rétine, principalement associées à la lumière bleue de 400 à 550 nm (Ham, 1989). Ces lésions sont couramment appelées photorétinites «de lumière bleue», dont une forme particulière porte le nom de *rétinite solaire*, à cause de son origine. La rétinite solaire était autrefois appelée «cécité postéclipse» ou «rétinite actinique». C'est seulement depuis quelques années que l'on a compris que la photorétinite résulte d'un mécanisme photochimique dû à l'exposition de la rétine aux plus courtes longueurs d'onde du spectre visible, c'est-à-dire à la lumière violette et bleue. Jusqu'aux années soixante-dix, on croyait qu'elle était le résultat

- d'un mécanisme de lésion thermique. Contrairement à la lumière bleue, le rayonnement IR-A est très peu susceptible de provoquer des lésions rétinienne (Ham, 1989; Sliney et Wolbarsht, 1980).
3. Les risques de lésions thermiques du cristallin dues à l'infrarouge proche, associés à des longueurs d'onde d'environ 800 à 3 000 nm, et notamment de cataracte calorique d'origine industrielle. Au soleil, l'exposition moyenne de la cornée aux infrarouges est de l'ordre de 10 W/m<sup>2</sup>. Par comparaison, d'après une étude, les travailleurs du verre et de l'acier seraient exposés tous les jours pendant 10 à 15 ans à un éclairement énergétique en infrarouge de l'ordre de 0,8 à 4 kW/m<sup>2</sup>; cette exposition serait la cause d'opacités cristalliniennes (Sliney et Wolbarsht, 1980). Les bandes spectrales considérées comprennent les IR-A et les IR-B (voir figure 49.1). L'ACGIH recommande, pour l'œil antérieur, une limite d'exposition aux IR-A de 100 W/m<sup>2</sup> d'éclairement énergétique total pondéré dans le temps, pour les durées d'exposition dépassant 1 000 s (16,7 min) (ACGIH, 1992, 1995).
  4. Les lésions thermiques de la cornée et de la conjonctive (à des longueurs d'onde approximatives de 1 400 nm à 1 mm). Ce genre de lésions est presque exclusivement dû à l'exposition au rayonnement laser.
  5. Les lésions thermiques de la peau. Les sources courantes les provoquent rarement, mais elles peuvent se produire sur toute l'étendue du spectre optique.

#### **L'importance de la longueur d'onde et de la durée de l'exposition**

Les lésions thermiques aiguës mentionnées aux points 1 et 4 ci-dessus proviennent en général d'expositions de très courte durée que devraient prévenir les protecteurs oculaires. Par contre, les lésions photochimiques du type de celles mentionnées au point 2 peuvent résulter de faibles débits de dose étalés sur toute une journée de travail. Le produit du débit de dose par la durée de l'exposition donne toujours la dose (c'est la valeur de la dose qui détermine le degré de risque photochimique). Comme pour tout autre mécanisme de lésion photochimique, il importe de tenir compte du spectre d'action, qui décrit la contribution relative des différentes longueurs d'onde à l'effet biologique. Par exemple, dans le cas des lésions rétinienne d'origine photochimique, le spectre d'action révèle un effet maximum à environ 440 nm (Ham, 1989). Contrairement aux effets thermiques qui se produisent à n'importe quelle longueur d'onde, la plupart des effets photochimiques sont limités à une bande spectrale très étroite. Par conséquent, les protecteurs oculaires conçus pour ces effets précis n'ont à arrêter qu'une petite bande spectrale. Cependant, en pratique, ils doivent filtrer plus d'une bande spectrale pour protéger ceux qui les portent contre le rayonnement d'une source à large bande.

### **Les sources de rayonnement optique**

#### **La lumière solaire**

Dans le domaine du rayonnement optique, les plus grands risques professionnels découlent de l'exposition de certains travailleurs aux rayons du soleil. Le spectre solaire va de la limite en ultraviolet (environ 290 à 295 nm) traversant la couche d'ozone stratosphérique à au moins 5 000 nm (5 µm) en infrarouge. En été, l'énergie du rayonnement solaire peut atteindre 1 kW/m<sup>2</sup>, ce qui peut causer une contrainte thermique, selon la température et l'humidité ambiantes.

#### **Les sources artificielles**

Les sources artificielles les plus importantes d'exposition humaine au rayonnement optiques sont passées en revue ci-après.

1. *Soudage et coupage.* Les soudeurs et les personnes travaillant avec eux sont en général exposés à un intense rayonnement provenant de l'arc électrique, non seulement en ultraviolet, mais aussi dans le visible et l'infrarouge. On rapporte quelques rares cas de lésions aiguës de la rétine. Une protection oculaire adéquate est obligatoire dans ces milieux de travail.
2. *Industries métallurgiques et fonderies.* Les plus importantes sources d'exposition au rayonnement visible et infrarouge sont les métaux en fusion et les surfaces métalliques chaudes dans les aciéries, les usines d'aluminium et les fonderies. L'exposition des travailleurs est en général comprise entre 0,5 et 1,2 kW/m<sup>2</sup>.
3. *Lampes à arc.* Beaucoup de procédés industriels et commerciaux utilisant par exemple des lampes de séchage photochimique émettent une lumière visible intense de courte longueur d'onde (lumière bleue), ainsi que des ultraviolets et des infrarouges. Même si la présence d'écrans réduit considérablement les risques d'exposition, des accidents peuvent se produire.
4. *Lampes à infrarouges.* Ces lampes, qui émettent surtout dans la bande des IR-A, servent principalement au traitement thermique, au séchage des peintures et dans des applications connexes. Elles ne posent pas de risques importants puisque l'inconfort provoqué par l'exposition fait que celle-ci est naturellement limitée à un niveau acceptable.
5. *Traitements médicaux.* Les lampes à infrarouges sont utilisées en médecine à différentes fins diagnostiques et thérapeutiques. L'exposition des patients varie considérablement avec le genre de traitement. Le personnel médical doit prendre des précautions en manipulant ces lampes.
6. *Eclairage général.* Les tubes fluorescents émettent très peu d'infrarouges et leur lumière n'est en général pas assez intense pour être dangereuse. Les lampes à incandescence ordinaires ou à halogène émettent une importante partie de leur énergie rayonnante dans la bande des infrarouges. De plus, la lumière bleue des lampes à halogène peut être dangereuse pour la rétine si l'on fixe le filament. Heureusement, la réaction d'aversion de l'œil en présence de lumière intense prévient les lésions aiguës, même à courte distance. On peut en général minimiser ou éliminer ce risque en plaçant un filtre «anticalorique» en verre sur ces lampes.
7. *Projecteurs et autres dispositifs optiques.* Des sources de lumière intense sont utilisées dans les phares de recherche, les projecteurs cinématographiques et d'autres dispositifs à faisceau collimaté. Le faisceau direct de ces appareils peut, à très courte distance, provoquer des lésions rétinienne.

### **Le mesurage des caractéristiques des sources**

La répartition énergétique spectrale est la plus importante caractéristique d'une source optique. Elle est mesurée à l'aide d'un spectroradiomètre, appareil constitué par un dispositif optique d'entrée, un monochromateur et un photodétecteur.

Dans de nombreux cas pratiques, on se sert d'un radiomètre optique à large bande pour sélectionner une région spectrale donnée. Dans le cas de l'éclairage visible et à des fins de sécurité, la réponse spectrale de l'appareil est conçue pour suivre une réponse spectrale biologique. Par exemple, les luxmètres sont conçus pour se conformer à la réaction photopique (visuelle) de l'œil. Normalement, à part la détection des ultraviolets, les spécialistes de la sécurité et de la santé au travail ne s'occupent pas couramment du mesurage et de l'analyse des risques associés aux sources de lumière intense et d'infrarouges, qui sont souvent trop complexes. Toutefois, grâce à la normalisation croissante des catégories de sécurité des lampes, les utilisateurs n'ont plus à effectuer des mesures pour déterminer les risques éventuels.

### Les limites d'exposition de l'humain

En se fondant sur les paramètres optiques de l'œil humain et la luminance énergétique d'une source de lumière, il est possible de calculer l'éclairement énergétique (débit de dose) au niveau de la rétine. L'exposition des structures antérieures de l'œil aux infrarouges peut également revêtir une certaine importance, sans compter que la position relative de la source et le degré d'ouverture des paupières peuvent influencer considérablement sur le calcul de la dose d'exposition oculaire. En cas d'exposition aux ultraviolets et à la lumière visible de courte longueur d'onde, la répartition spectrale de la source est également importante.

Plusieurs groupes nationaux et internationaux ont recommandé des limites d'exposition professionnelle au rayonnement optique (ACGIH, 1992, 1994; Sliney, 1992). La plupart de ces limites portent sur les ultraviolets et le rayonnement laser, mais l'ACGIH, organisme américain bien connu dans le domaine de la santé au travail, a également recommandé des limites pour le rayonnement visible. L'ACGIH donne aux valeurs limites d'exposition qu'elle révisé et publie tous les ans le nom de TLV (Threshold Limit Values) (ACGIH, 1992, 1995). Les TLV sont surtout fondées sur les données relatives aux lésions oculaires provenant d'études sur les animaux, ainsi que sur les données de lésions rétinienne causées chez des humains par la lumière solaire et les arcs de soudage. Les TLV sont en outre basées sur l'hypothèse que l'exposition environnementale à la lumière visible naturelle n'est normalement pas dangereuse pour l'œil, sauf dans des environnements très inhabituels (champ couvert de neige ou désert) ou lorsqu'une personne fixe délibérément le soleil.

### L'évaluation des risques du rayonnement optique

Une évaluation complète des risques nécessite des mesures complexes de l'éclairement énergétique spectral et de la luminance énergétique de la source et impose parfois de recourir à des appareils très spécialisés et de faire des calculs compliqués. Par conséquent, une telle évaluation est rarement effectuée sur place par des hygiénistes et des ingénieurs en sécurité du travail. En pratique, le port de protecteurs oculaires est imposé par des règlements de sécurité dans les milieux de travail dangereux. La recherche a permis d'évaluer une vaste gamme d'arcs, de lasers et de sources de chaleur et de recommander en conséquence des normes générales de sécurité, pratiques et faciles à appliquer.

### Les mesures de protection

L'exposition professionnelle au rayonnement visible et infrarouge est rarement dangereuse et souvent bénéfique. Toutefois, certaines sources émettent un rayonnement visible intense, mais, comme cette situation déclenche la réaction naturelle d'aversion de l'œil, les chances de surexposition accidentelle sont assez faibles. Par contre, l'exposition accidentelle est possible, et même probable, dans le cas des sources artificielles émettant seulement dans l'infrarouge proche. Certaines mesures permettent de minimiser l'exposition inutile du personnel au rayonnement infrarouge, au nombre desquelles il faut citer une conception technique adéquate du système optique utilisé, le port de lunettes ou d'écrans transparents appropriés, la limitation de l'accès aux seules personnes qui doivent être là et une information suffisante pour que les travailleurs soient conscients des risques que peuvent présenter les sources intenses de rayonnement visible et infrarouge. Le personnel d'entretien chargé de remplacer les lampes à arc doit avoir une information adéquate pour éviter toute exposition dangereuse. Il est inadmissible que des travailleurs soient atteints d'érythème cutané ou de photokératite. Si une telle éventualité se produit, il faudra examiner les méthodes de travail et prendre les mesures nécessaires pour réduire les cas de surexposition. Le

rayonnement optique, par contre, ne fait courir aucun risque particulier aux travailleuses enceintes en ce qui concerne leur enfant.

### La conception des protecteurs oculaires

Les travaux de mise au point de lunettes de soudage et de protecteurs oculaires nécessaires à d'autres travaux dans lesquels l'opérateur est soumis à des sources industrielles de rayonnement optique (par exemple, travail en fonderie, fabrication de l'acier et du verre) ont commencé au début du XX<sup>e</sup> siècle avec la mise au point du verre de Crooke. Les normes de protection oculaire élaborées par la suite se sont conformées au principe général selon lequel les rayonnements infrarouge et ultraviolet, n'étant pas nécessaires pour voir, devraient être arrêtés dans toute la mesure permise par les verres existants.

Dans les années soixante-dix, les normes empiriques du matériel de protection oculaire ont fait l'objet d'essais qui ont montré qu'elles comportaient d'importantes marges de sécurité dans le cas du rayonnement infrarouge et ultraviolet, compte tenu des limites d'exposition professionnelle en vigueur, mais que la protection offerte contre la lumière bleue était à peine suffisante. Certaines prescriptions des normes ont donc été réajustées.

### La protection contre le rayonnement ultraviolet et infrarouge

Des lampes spécialisées à ultraviolets servent dans l'industrie pour la détection de la fluorescence et la photopolymérisation des encres, des résines plastiques, des polymères dentaires, etc. Même si les sources d'UV-A posent ordinairement peu de risques, elles peuvent soit émettre de petites quantités d'UV-B dangereux, soit causer des éblouissements très gênants (par effet de fluorescence dans le cristallin). On peut se procurer sans difficulté des filtres ultraviolets à très haut facteur d'atténuation, en verre ou en plastique, qui protègent dans tout le spectre ultraviolet. Une légère teinte jaunâtre est parfois décelable lorsque la protection va jusqu'à 400 nm. Il est extrêmement important que les lunettes de ce genre (de même que les lunettes solaires industrielles) protègent le champ de vision périphérique. Des modèles enveloppants ou à écrans latéraux sont nécessaires pour prévenir la focalisation des rayons obliques sur la région nasale équatoriale du cristallin où se développe fréquemment la cataracte corticale.

Presque toutes les lentilles en verre et en plastique arrêtent les ultraviolets au-dessous de 300 nm et les infrarouges au-dessus de 3 000 nm (3 µm). Les lunettes de sécurité ordinaires à lentilles transparentes résistant aux chocs assurent en général une bonne protection contre quelques sources de rayonnement laser et optique (les lentilles transparentes en polycarbonate arrêtent efficacement les longueurs d'onde supérieures à 3 µm). Toutefois, des absorbants (oxydes métalliques dans le verre ou teintures organiques dans les plastiques) doivent être ajoutés pour arrêter les UV allant jusqu'à 380 à 400 nm et les infrarouges de 780 nm à 3 µm. Selon le matériau, cela peut être facile ou nécessiter un traitement très difficile et coûteux et d'une stabilité parfois variable. Les filtres conformes à la norme ANSI Z87.1 (1999b) de l'American National Standards Institute (ANSI) (Institut américain de normalisation) doivent posséder les facteurs d'atténuation appropriés dans chacune des bandes spectrales critiques.

### La protection à assurer dans diverses industries

#### Les sapeurs-pompiers

Les sapeurs-pompiers peuvent être exposés à d'intenses rayonnements infrarouges qui imposent souvent de les équiper de filtres IR, en complément des dispositifs essentiels qui leur protègent la tête et le visage. Dans ce cas, la protection contre les chocs est également importante.