

La protection oculaire en fonderie et dans l'industrie du verre

Les lunettes et les masques conçus pour protéger les yeux contre le rayonnement infrarouge ont en général une légère teinte verdâtre, quoiqu'une teinte plus sombre puisse également protéger contre l'inconfort dû à un rayonnement visible intense. Ces protecteurs oculaires ne devraient pas être confondus avec les lunettes à verres bleus utilisées par les travailleurs des aciéries et des fonderies pour vérifier visuellement la température du métal en fusion. Les lunettes bleues n'assurent aucune protection et ne devraient donc être portées que brièvement.

Le soudage

On peut donner au verre des propriétés filtrantes lui permettant d'arrêter les infrarouges et les ultraviolets au moyen d'additifs tels que l'oxyde de fer, mais le degré d'atténuation dans la bande strictement visible détermine le *numéro d'échelon*, expression logarithmique de l'atténuation. Normalement, un numéro d'échelon de 3 à 4 est utilisé dans le cas du soudage au chalumeau (qui nécessite le port de lunettes à coques) et un numéro d'échelon de 10 à 14 dans le cas du soudage à l'arc et du soudage au plasma (qui nécessitent le port d'un casque). En pratique, si le soudeur peut regarder l'arc sans inconfort, ses lunettes lui assurent probablement une protection adéquate contre les risques présents. Les responsables, les aides-soudeurs et les autres personnes qui se tiennent dans la zone de travail peuvent avoir besoin de filtres à numéro d'échelon relativement bas (3 à 4) pour se protéger de la photokératite («conjonctivite du soudeur»). Ces dernières années, un nouveau type de protection, le verre filtrant à opacité variable, a fait son apparition. Quel que soit le type du filtre, celui-ci doit être conforme aux normes ANSI Z87.1 (1999b) et Z49.1 (1999a) pour filtres de soudage fixes à numéro d'échelon élevé (Buhr, Sutter et The Health Council of the Netherlands, 1989; CIE, 1987).

Les écrans filtrants de soudage (auto-obscureissants)

L'écran filtrant de soudage auto-obscureissant, dont le numéro d'échelon augmente avec l'intensité du rayonnement optique incident, représente un important progrès, qui permet de produire régulièrement des soudures de grande qualité de manière plus commode et ergonomique. Sans ce filtre, les soudeurs doivent relever puis abaisser le masque ou le filtre chaque fois qu'ils établissent ou interrompent l'arc; une fois le masque baissé, ils travaillent en aveugle jusqu'à l'amorçage de l'arc. De plus, de nombreux soudeurs relèvent et abaissent le masque par un mouvement sec du cou et de la tête, ce qui finit par causer des raideurs ou même des lésions du cou. Pour éviter ces inconvénients, certains soudeurs amorcent l'arc avec le masque en position relevée, ce qui les expose au risque de la photokératite. Dans des conditions normales d'éclairage, un soudeur portant un casque muni d'un verre auto-obscureissant peut voir assez clairement avec le masque en position baissée pour accomplir diverses tâches, par exemple, aligner les pièces à souder, positionner soigneusement son équipement et amorcer l'arc. Dans les modèles de masques les plus courants, des capteurs de lumière détectent l'éclair de l'arc au moment même où il apparaît et commandent quasi instantanément une unité électronique qui fait passer la couleur d'un filtre à cristal liquide d'une nuance claire à une nuance foncée présélectionnée, ce qui élimine la manœuvre malcommode et dangereuse du masque à numéro d'échelon fixe.

On s'est souvent posé la question de savoir si les filtres auto-obscureissants pouvaient comporter des risques cachés. Par exemple, les images rémanentes que perçoivent les soudeurs peuvent-elles affecter la vision d'une façon permanente? Les nouveaux filtres offrent-ils un degré de protection équivalent ou supérieur à celui des verres filtrants classiques? Même s'il est possible de répondre par l'affirmative à la seconde question, il faut comprendre que les

masques auto-obscureissants ne sont pas tous équivalents. La vitesse de réaction, le poids et les degrés d'obscurcissement obtenus sous un éclairage donné peuvent varier d'un modèle à l'autre, de même que la sensibilité à la température, les fluctuations du numéro d'échelon avec le vieillissement de la pile d'alimentation, le «numéro d'échelon au repos» et d'autres facteurs techniques. Les nouvelles normes en voie d'élaboration tiendront compte de ces considérations.

Comme tous les modèles assurent une atténuation suffisante, la vitesse de réaction est la plus importante caractéristique que spécifient les fabricants de masques auto-obscureissants. Les masques actuels ont des vitesses allant de 0,1 s à moins de 0,1 ms. Buhr, Sutter et The Health Council of the Netherlands (1989) ont défini un moyen de spécifier le temps maximal de réaction, mais leur formule dépend des caractéristiques du processus d'assombrissement. La vitesse du filtre est essentielle parce qu'elle donne la meilleure indication de la quantité extrêmement importante (mais indéfinie) de lumière qui pénètre dans l'œil au moment de l'amorçage de l'arc, par comparaison à un filtre fixe ayant le même numéro d'échelon. Si une trop grande quantité de lumière pénètre dans l'œil chaque fois qu'un arc est amorcé pendant la journée de travail, la dose d'énergie lumineuse accumulée engendre un effet d'adaptation transitoire, une «fatigue oculaire» et d'autres problèmes (l'effet d'adaptation transitoire est la sensation visuelle causée par des changements brusques du niveau de l'éclairage ambiant; il peut se manifester par une sensation d'inconfort et d'éblouissement et une perte temporaire de la vision détaillée). Les produits actuels dotés de vitesses de réaction de l'ordre de 10 millisecondes assurent une bonne protection contre la photorétinite. Toutefois, les vitesses de réaction les plus rapides — de l'ordre de 0,1 ms — ont en outre l'avantage de réduire les effets d'adaptation transitoire (Eriksen, 1985; Sliney, 1992).

A défaut de longs essais en laboratoire, le soudeur dispose de moyens de contrôle simples. Il peut, par exemple, regarder une page imprimée en petits caractères à travers un certain nombre de masques auto-obscureissants, pour avoir une idée de la qualité optique de chacun. Ensuite, il peut établir un arc en l'observant à travers chaque filtre qu'il envisage d'acheter. On peut heureusement partir du principe que s'il peut regarder sans inconfort, le filtre ne transmet probablement aucun rayonnement dangereux. L'efficacité du filtrage des ultraviolets et des infrarouges peut être vérifiée dans la fiche technique du fabricant, qui indiquera si les bandes indésirables sont effectivement arrêtées. Quelques essais successifs d'amorçage d'un arc devraient également permettre au soudeur de déterminer si l'adaptation transitoire lui occasionnera de l'inconfort. Bien sûr, un essai d'une journée serait préférable.

Le numéro d'échelon au repos ou par défaut (en cas de décharge de la pile d'alimentation) d'un filtre auto-obscureissant devrait assurer une protection à 100% des yeux du soudeur pendant au moins une ou plusieurs secondes. Certains fabricants ont adopté un numéro élevé comme position par défaut, tandis que d'autres utilisent pour cela un numéro intermédiaire entre le clair et le foncé. Dans les deux cas, le facteur de transmission du filtre au repos devrait être sensiblement inférieur au facteur de transmission correspondant à l'écran clair afin d'éviter les risques pour la rétine. De toute façon, le dispositif devrait indiquer clairement à l'utilisateur s'il est hors fonction ou défectueux. Ainsi, le soudeur saura toujours d'avance à quoi s'en tenir avant de commencer à souder. D'autres caractéristiques, comme la durée de la pile d'alimentation ou le fonctionnement dans des conditions extrêmes de température, peuvent être importantes pour certains utilisateurs.

Conclusion

Même si les spécifications techniques peuvent paraître un peu complexes pour les dispositifs devant protéger les yeux contre les

sources de rayonnement optique, il existe des normes de sécurité qui prescrivent des numéros d'échelon assurant une bonne marge de sécurité à l'utilisateur.

● LES LASERS

David H. Slinney

Le laser est un dispositif qui produit un rayonnement électromagnétique cohérent dans le spectre optique, allant de l'ultraviolet extrême à l'infrarouge lointain (bande sous-millimétrique). Le mot *laser* est en fait le sigle de l'expression anglaise *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (lumière amplifiée par émission stimulée de rayonnements). Même si l'effet laser a été théoriquement prédit par Albert Einstein en 1916, le premier laser fonctionnel n'a été présenté qu'en 1960. Ces dernières années, les lasers sont sortis des laboratoires de recherche pour envahir tous les milieux de travail — industrie, hôpitaux, bureaux, chantiers de construction — et même les foyers domestiques. Dans de nombreuses applications, telles que les lecteurs de vidéodisques et les systèmes de communications à fibre optique, l'énergie rayonnante du laser est enfermée dans une enveloppe ou un boîtier, ne faisant courir aucun risque à l'utilisateur, qui n'est souvent même pas conscient de la présence du laser dans le produit qu'il a devant lui. Toutefois, l'énergie rayonnante des lasers est accessible dans certaines applications médicales, industrielles ou de recherche et peut donc constituer un risque pour les yeux et la peau.

Comme l'effet laser peut produire un faisceau très collimaté de rayonnement optique (c'est-à-dire, de l'énergie rayonnante dans les régions de l'ultraviolet, du visible ou de l'infrarouge), un laser peut être dangereux à une distance considérable, contrairement à la plupart des autres sources de risques professionnels. C'est probablement cette caractéristique, plus que toute autre, qui a amené surtout les travailleurs et les experts de la sécurité et de la santé au travail à émettre des mises en garde. Pourtant, les lasers peuvent être utilisés en toute sécurité si les précautions nécessaires sont prises. Des normes sur la sécurité des lasers sont appliquées dans le monde entier et la plupart sont «harmonisées» les unes avec les autres (ANSI, 1993; CEI, 1993). Toutes les normes se basent sur un système de classification par risque qui répartit les appareils à laser entre quatre grandes catégories, selon la puissance ou l'énergie de sortie du laser et sa capacité à causer des dommages. On applique ensuite des mesures de sécurité correspondant à la classe de risque (Cleuet et coll., 1980; Duchêne, Lakey et Repacholi, 1991).

Les lasers fonctionnent à des longueurs d'onde discrètes et, même si la plupart sont monochromatiques (c'est-à-dire n'émettent qu'à une seule longueur d'onde ou une seule couleur), il n'est pas inhabituel qu'un laser émette plusieurs longueurs d'onde discrètes. Ainsi, le laser à argon produit plusieurs raies différentes dans l'ultraviolet proche et le spectre visible, quoiqu'il soit généralement conçu pour produire seulement une raie (longueur d'onde) verte à 514,5 nm ou une raie bleue à 488 nm. Lorsqu'on examine les risques possibles pour la santé, il est toujours essentiel d'établir la ou les longueurs d'onde de sortie.

Tous les lasers comportent trois éléments de base:

1. un milieu actif (solide, liquide ou gaz) qui détermine les longueurs d'onde de sortie possibles;
2. une source d'énergie (courant électrique, lampe de pompage ou réaction chimique);
3. une cavité résonante et un coupleur de sortie (en général, deux miroirs).

En dehors des laboratoires de recherche, la plupart des appareils à laser à usage pratique ont également un système de transmission (fibre optique ou bras articulé avec des miroirs) pouvant amener le faisceau à un point de travail, ainsi que des lentilles de focalisation destinées à concentrer le faisceau, par exemple sur la pièce à souder. Dans un laser, l'énergie de la lampe de pompage porte des atomes ou des molécules à un état excité. Dans cet état, un photon («particule» d'énergie lumineuse) incident peut stimuler l'atome ou la molécule, l'amenant à émettre un second photon de la même énergie (longueur d'onde), qui se déplace en phase (rayonnement cohérent) et dans la même direction que le photon incident. Ce phénomène cause donc une amplification de la lumière par un facteur deux. Une fois répété en cascade, il produit un faisceau de lumière qui se reflète de nombreuses fois entre les miroirs de la cavité résonante. Comme l'un des miroirs est semi-transparent, une partie de l'énergie lumineuse quitte la cavité résonante sous la forme d'un rayon laser. En pratique, les deux miroirs parallèles sont souvent concaves pour stabiliser la résonance, mais le principe de base s'applique à tous les lasers.

On a construit en laboratoire des lasers fonctionnant à des milliers de longueurs d'onde différentes (chacune produite par un milieu actif différent). Toutefois, une vingtaine de longueurs d'onde seulement ont fait l'objet d'une mise au point industrielle et sont couramment utilisées. Actuellement, les lignes directrices et normes sur la sécurité des lasers publiées couvrent en pratique toutes les longueurs d'onde du spectre optique et peuvent donc s'appliquer tant aux lasers connus qu'à ceux qui seront mis au point à l'avenir.

La classification de risque des lasers

Les normes de sécurité actuellement appliquées dans le monde répartissent les appareils à laser entre quatre grandes classes numérotées de 1 à 4. Les lasers de la classe 1 ne peuvent pas émettre de rayonnement dangereux et ne constituent donc pas un risque pour la santé. Ceux des classes 2 à 4 présentent des risques croissants pour les yeux et la peau. Des mesures de sécurité particulières sont prescrites pour chaque classe de laser. Bien entendu, les mesures les plus strictes s'appliquent aux classes les plus élevées.

On considère que les lasers de la classe 1 sont sans danger pour les yeux et présentent un risque nul. La plupart des lasers complètement enfermés (tels que ceux des lecteurs de disques compacts) appartiennent à cette classe, pour laquelle aucune mesure de sécurité n'est prescrite.

La classe 2 regroupe les lasers à lumière visible de très faible puissance qui ne seraient pas dangereux, même si la totalité du faisceau pénétrait dans l'œil et était concentrée sur la rétine. La réaction naturelle d'aversion que déclenchent les sources de lumière intense protège l'œil contre les lésions rétinienne, pourvu que l'énergie incidente ne soit pas assez importante pour endommager la rétine durant le temps de réaction de l'œil. Cette réaction comprend le réflexe palpébral ou réflexe de clignotement (qui dure de 0,16 à 0,18 s) ainsi qu'une rotation de l'œil et un mouvement de la tête qui se produisent lorsque l'œil est exposé à une lumière intense. Les normes de sécurité actuelles se basent, par mesure de prudence, sur un temps de réaction de 0,25 s. Ainsi, les lasers de la classe 2 ont une puissance de sortie maximale de 1 milliwatt (mW) qui correspond à la limite d'exposition admissible pour 0,25 s. Les appareils de la classe 2 comprennent, par exemple, les pointeurs à laser et quelques lasers d'alignement.

Dans le cadre de certaines normes de sécurité, il existe également un sous-groupe de la classe 2, la «classe 2A». Les lasers de la classe 2A peuvent être regardés sans danger pendant une période maximale de 1 000 s (16,7 min). La plupart des lecteurs à laser utilisés aux points de vente (caisses de supermarché, par exemple) et des scanners d'inventaire appartiennent à la classe 2A.

Les lasers de la classe 3 peuvent être dangereux pour les yeux parce que la réaction d'aversion n'est pas assez rapide pour limiter l'exposition de la rétine à un niveau sans danger pour une courte durée. Ils risquent également d'endommager d'autres parties de l'œil (comme la cornée et le cristallin). L'exposition occasionnelle ne présente normalement pas de risques pour la peau. La classe 3 comprend beaucoup de lasers de recherche et de télémètres militaires à laser.

Un sous-groupe spécial de la classe 3 porte la désignation «classe 3A» (le reste de la classe 3 étant désigné «classe 3B»). Les lasers de la classe 3A ont une puissance de sortie comprise entre une et cinq fois les limites d'exposition accessibles (LEA) des classes 1 ou 2, mais un éclairage énergétique de sortie ne dépassant pas la limite d'exposition professionnelle applicable de la classe inférieure. Beaucoup de lasers d'alignement et d'instruments topographiques se classent dans cette catégorie.

Les lasers de la classe 4 peuvent présenter un risque d'incendie, de lésions cutanées ou de réflexion diffuse. Ils comprennent presque tous les lasers chirurgicaux et les lasers d'usinage servant au soudage et au découpage qui ne sont pas placés dans une enveloppe fermée, ainsi que tous les lasers dont la puissance moyenne de sortie dépasse 0,5 W. Si un laser haute puissance de classe 3 ou 4 est placé dans un boîtier totalement fermé de sorte qu'aucune énergie rayonnante dangereuse ne soit émise à l'extérieur, l'appareil qui le contient peut s'inscrire dans la classe 1. Dans ce cas, le laser intérieur est dit *laser incorporé*.

Les limites d'exposition professionnelle

La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 1996a)) a publié des lignes directrices relatives aux limites d'exposition humaine au rayonnement laser, qui sont périodiquement mises à jour. Des limites d'exposition représentatives figurent dans le tableau 49.3 pour un certain nombre de lasers typiques. Presque tous les faisceaux laser dépassent les limites d'exposition admissibles. C'est pourquoi, en pratique, les limites d'exposition ne sont pas normalement prises comme base pour définir les mesures de sécurité. On s'appuie plutôt sur la classification des lasers, qui est elle-même fondée sur les limites d'exposition appliquées dans des conditions représentatives.

Les normes de sécurité pour les lasers

De nombreux pays ont publié des normes de sécurité pour les lasers, dont la plupart sont harmonisées avec la norme internationale CEI 60825-1 (1993) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). Cette norme s'adresse aux fabricants, mais fournit aussi des informations limitées sur la sécurité aux utilisateurs. Tous les appareils commerciaux à laser doivent porter une étiquette indiquant leur classe et, dans le cas des classes 2 à 4, une étiquette particulière de mise en garde correspondant à la classe.

Les mesures de sécurité

Le système de classification des lasers facilite considérablement la détermination des mesures de sécurité à prendre. Les normes et codes de bonne pratique établis à des fins de sécurité imposent par principe des mesures restrictives de plus en plus sévères en fonction du niveau de classement.

En pratique, il est toujours préférable de placer le laser et son faisceau dans un boîtier complètement fermé de façon qu'aucun rayonnement potentiellement dangereux ne soit émis à l'extérieur. Toutefois, cette condition est souvent impossible à réaliser, et il faut alors donner aux travailleurs une formation adéquate sur l'utilisation du matériel et les mesures de limitation des risques.

Tableau 49.3 • Limites d'exposition au rayonnement pour quelques lasers courants

Type de laser	Principales longueurs d'onde	Limite d'exposition
Fluorure d'argon	193 nm	3,0 mJ/cm ² pendant 8 h
Chlorure de xénon	308 nm	40 mJ/cm ² pendant 8 h
Argon ionisé	488, 514,5 nm	3,2 mW/cm ² pendant 0,1 s
Vapeur de cuivre	510, 578 nm	2,5 mW/cm ² pendant 0,25 s
Hélium-néon	632,8 nm	1,8 mW/cm ² pendant 10 s
Vapeur d'or	628 nm	1,0 mW/cm ² pendant 10 s
Krypton ionisé	568, 647 nm	1,0 mW/cm ² pendant 10 s
Néodyme-YAG	1 064 nm	5,0 μJ/cm ² pendant 1 ns à 50 μs
	1 334 nm	Pas d'EMP si t < 1 ns, 5 mW/cm ² pendant 10 s
Gaz carbonique	10-6 μm	100 mW/cm ² pendant 10 s
Monoxyde de carbone	≈ 5 μm	Jusqu'à 8 h, zone limitée 10 mW/cm ² pendant >10 s pour l'ensemble du corps

Toutes les normes et recommandations comportent des EMP (expositions maximales permises) correspondant à d'autres longueurs d'onde et périodes d'exposition.

Note: pour exprimer les EMP en mJ/cm², il suffit de multiplier les mW/cm² par le temps d'exposition en secondes. Par exemple, l'EMP du laser à l'hélium-néon ou à l'argon à 0,1 s est de 0,32 mJ/cm².

Source: ANSI, 1993; ACGIH, 1995; Duchêne, Lakey et Repacholi, 1991.

A part la règle évidente consistant à ne pas pointer un faisceau laser dans les yeux d'une personne, aucune mesure de contrôle n'est imposée dans le cas des appareils à laser de la classe 2. Par contre, les appareils des classes supérieures doivent évidemment faire l'objet de mesures de sécurité.

S'il est impossible d'envelopper totalement un laser de classe 3 ou 4, le confinement du faisceau (à l'intérieur d'un tube, par exemple) et l'utilisation de chicanes et de capots optiques peuvent, dans la plupart des cas, virtuellement exclure le risque d'une exposition oculaire dangereuse.

Lorsqu'on ne peut pas placer un laser de classe 3 ou 4 dans une enveloppe de confinement, on doit établir une zone contrôlée d'accès restreint et prescrire le port obligatoire de lunettes protectrices dans toute la zone nominale de danger (ZND) du faisceau laser. Bien que dans la plupart des laboratoires de recherche utilisant des faisceaux laser collimatés la ZND s'étende à toute la zone contrôlée, la ZND pourrait en fait être d'étendue très limitée dans le cas des applications à faisceau focalisé et ne concerner qu'une partie du local du laser.

Pour prévenir un usage non prévu et potentiellement dangereux de la part de tiers non autorisés, la commande par clé qui équipe tous les appareils à laser commercialisés devrait être systématiquement utilisée.

S'il est possible à des tiers non autorisés d'accéder à l'appareil, la clé devrait être gardée dans un endroit sûr lorsque le laser n'est pas utilisé.

Des précautions particulières sont nécessaires lors du réglage et de la mise en marche initiale du laser, car c'est à ce moment-là que le risque de lésions oculaires graves est le plus grand. Les travailleurs chargés de ces opérations devraient recevoir une formation spéciale sur les pratiques de sécurité.

Sur la base des limites d'exposition professionnelle, on a mis au point des lunettes de protection laser ayant la densité optique (qui

est une fonction logarithmique du facteur d'atténuation) nécessaire pour des lasers donnés, compte tenu de la longueur d'onde et de la durée de l'exposition. Il existe des normes européennes spécifiques pour la protection des yeux contre le rayonnement laser; d'autres normes ont été édictées aux Etats-Unis (ANSI Z136.1 (1993) et ANSI Z136.3 (1996)).

La formation

Les enquêtes menées à la suite d'accidents provoqués par des lasers, tant dans des laboratoires qu'en milieu industriel, mettent souvent en évidence un facteur commun: le manque de formation. La formation à la sécurité en matière de laser devrait être à la fois adéquate et suffisante compte tenu des opérations laser au voisinage desquelles chaque employé est appelé à travailler. Elle devrait correspondre au type de laser utilisé et aux fonctions auxquelles le travailleur est affecté.

La surveillance médicale

La surveillance médicale des travailleurs appelés à utiliser des lasers ou travaillant à proximité varie d'un pays à l'autre, selon la réglementation locale. Il y a quelque temps, lorsque les lasers étaient confinés aux laboratoires de recherche et qu'on ne connaissait pas bien leurs effets biologiques, il était courant de soumettre périodiquement chaque travailleur exposé à un examen ophtalmologique complet avec photographie du fond de l'œil (rétine). Toutefois, cette pratique a été remise en question au début des années soixante-dix parce que les conclusions cliniques étaient presque toujours négatives et qu'il était devenu évident que ces examens ne révélaient que les lésions aiguës, qui, de toute façon, étaient perceptibles subjectivement. C'est pour cette raison qu'au cours de sa réunion de 1975 à Don Leaghreigh, en Irlande, le groupe de travail de l'OMS sur les lasers a recommandé l'abandon des programmes de surveillance par examen au profit d'un contrôle de la fonction visuelle elle-même. Depuis, la plupart des groupes nationaux de santé au travail ont constamment réduit les exigences en matière d'examen médical. Aujourd'hui, les examens ophtalmologiques complets ne sont universellement exigés qu'en cas de lésion oculaire ou si l'on soupçonne une surexposition. Par contre, un examen de la vue est généralement obligatoire avant le recrutement. Certains pays prescrivent aussi des examens supplémentaires.

Le mesurage du rayonnement laser

Contrairement à ce qui se passe pour d'autres rayonnements, il n'est généralement pas nécessaire d'effectuer des mesures pour surveiller le niveau de rayonnement laser en milieu de travail. Par suite des caractéristiques très localisées du faisceau de la plupart des lasers, du peu de probabilité d'un changement de trajectoire et de la complexité et du prix des radiomètres laser, les normes de sécurité actuelles se fondent sur la classe de risques plutôt que sur la mesure et la surveillance du rayonnement en milieu de travail. Les fabricants, par contre, doivent mesurer le rayonnement pour vérifier la conformité de leurs appareils aux normes de sécurité applicables et les affecter à une classe. De fait, c'est notamment à cause de la grande difficulté d'effectuer des mesures pour l'évaluation des risques que l'on a, à l'origine, envisagé d'établir un système de classification de risque pour les lasers.

Conclusion

Relativement rare en milieu de travail il y a quelques années, le laser est aujourd'hui omniprésent, comme le sont les programmes de sécurité laser. La clé d'une utilisation non dangereuse des appareils est en premier lieu de confiner, pour autant que cela soit possible, l'énergie rayonnante du laser; à défaut, il faudra établir des mesures de contrôle adéquates et donner la formation nécessaire à tous les membres exposés du personnel.

LES ONDES RADIOFRÉQUENCES ET LES ONDES HYPERFRÉQUENCES

Kjell Hansson Mild

Les ondes radiofréquences (RF) et les ondes hyperfréquences ont de nombreuses applications dans l'industrie, le commerce, la médecine et la recherche ainsi que dans les foyers. Ces ondes, dont la fréquence est comprise entre 3 et 3×10^8 kHz (300 GHz), sont utilisées dans des domaines bien connus: radio, télévision, télécommunications (téléphone interurbain, radiotéléphone mobile, radio-communications), radar, chauffage diélectrique, chauffage par induction, alimentations à commutation et écrans d'ordinateur.

Le rayonnement RF haute puissance est une source d'énergie thermique qui présente tous les effets connus du chauffage sur les systèmes biologiques: brûlures, changements temporaires et permanents des fonctions de reproduction, cataracte et décès. Dans la vaste bande des ondes RF, on ne peut se fier à la perception cutanée de la chaleur et à la sensation de brûlure comme moyens de détection. En effet, les capteurs thermiques du corps humain étant situés dans la peau, ils ne réagissent pas de manière sensible au chauffage profond que les champs électromagnétiques RF produisent dans le corps. Des limites d'exposition sont donc nécessaires pour protéger contre les effets nocifs des champs d'ondes RF.

L'exposition professionnelle

Le chauffage par induction

Un matériau conducteur soumis à un intense champ magnétique alternatif s'échauffe sous l'effet des *courants de Foucauld*. Le chauffage par induction sert à forger, à recuire, à braser et à souder. Les fréquences de travail vont de 50 ou 60 Hz à plusieurs MHz. Comme les bobines qui engendrent les champs magnétiques sont souvent petites, le risque d'une forte surexposition de tout le corps est faible; toutefois, l'exposition des mains peut être importante.

Le chauffage diélectrique

L'énergie des ondes RF d'une fréquence de 3 à 50 MHz (notamment à 13,56, 27,12 et 40,68 MHz) est utilisée dans l'industrie pour différentes opérations de chauffage. Les applications comprennent le soudage et le formage des plastiques, le séchage des colles, le traitement des tissus et des textiles, le travail du bois et la fabrication de produits aussi divers que les bâches, les piscines, les matelas à eau, les chaussures et les étuis pour chèques de voyage.

D'après la documentation (Mild, 1980; IEEE, 1990a, 1990b, 1991), il arrive souvent dans l'industrie que les *champs de fuite* électriques et magnétiques soient très élevés à proximité des appareils à ondes RF. Or, leur exploitation est souvent assurée par des femmes en âge de procréer (entre 18 à 40 ans). Les champs de fuite sont souvent de grande étendue dans certains milieux de travail, ce qui entraîne une exposition du corps entier chez les opérateurs. Pour beaucoup d'entre eux, les niveaux d'exposition aux champs électriques et magnétiques dépassent toutes les recommandations de sécurité existantes concernant le rayonnement RF.

Etant donné l'importance des doses qui peuvent être reçues à proximité de ces appareils, leurs champs de fuite doivent être surveillés. Une surveillance périodique du rayonnement est donc indispensable pour déterminer s'il existe un problème d'exposition.

Les systèmes de télécommunications

Les opérateurs de télécommunications et de radars ne sont exposés, la plupart du temps, qu'à des champs de faible intensité. Toutefois, ceux qui doivent monter dans les tours de radio et de télévision peuvent être soumis à des champs intenses, ce qui impose des précautions. L'exposition peut également être élevée à

proximité des armoires d'émetteurs lorsque les dispositifs de verrouillage ont été mis hors fonction et que les portes sont ouvertes.

L'exposition en milieu médical

La diathermie par ondes courtes a été l'une des premières applications médicales de l'énergie des ondes RF. D'habitude, on se sert à cette fin d'électrodes non protégées pouvant donner lieu à des champs parasites élevés.

Depuis quelques années, des champs RF sont utilisés en même temps que les champs magnétiques statiques en matière d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Comme l'énergie RF utilisée est faible et que le champ est presque entièrement contenu dans l'enceinte réservée au patient, l'exposition des opérateurs est négligeable.

Les effets biologiques

Le débit d'absorption spécifique (DAS, mesuré en watts par kilogramme de poids corporel) est couramment utilisé comme quantité dosimétrique de base pour définir les limites d'exposition. Le DAS d'un corps biologique dépend de paramètres d'exposition tels que la fréquence, l'intensité et la polarisation du rayonnement, la position du corps par rapport à la source, les surfaces réfléchissantes, ainsi que la taille, la forme et les propriétés électriques du corps. De plus, la répartition spatiale du DAS dans le corps est très irrégulière, ce qui entraîne un chauffage profond non uniforme pouvant engendrer des gradients internes de température; aux fréquences supérieures à 10 GHz, par exemple, l'énergie est localisée près de la surface du corps. En fonction de la fréquence, le DAS maximal, pour un sujet moyen, se situe aux alentours de 70 MHz, mais il baisse à environ 30 MHz si le sujet est en contact avec une prise de terre RF. Dans des conditions extrêmes de température et d'humidité, un DAS corps entier de 1 à 4 W/kg à 70 MHz peut causer en une heure une élévation d'environ 2 °C de la température centrale chez des sujets en bonne santé.

Le mécanisme d'interaction du chauffage RF a fait l'objet d'études approfondies. Des effets thermiques ont été observés à moins de 1 W/kg, mais aucun seuil de température correspondant n'a en général été mis en évidence. La relation temps-température doit être prise en considération dans l'évaluation des effets biologiques.

On a également observé des effets biologiques dans des conditions où le mécanisme de chauffage par ondes RF était faible ou absent. Ces effets mettaient souvent en cause des champs RF modulés à des longueurs d'onde millimétriques. Diverses hypothèses ont été proposées, mais elles n'ont pas encore abouti à des informations utiles pouvant servir de base à la fixation des limites d'exposition pour les humains. Il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux d'interaction, car il est difficile, en pratique, d'étudier chaque champ RF pour en déterminer les interactions caractéristiques biophysiques et biologiques.

Des études menées chez l'humain et chez l'animal ont révélé que les champs RF, comme on l'a déjà dit, peuvent avoir des effets biologiques préjudiciables par suite de l'échauffement excessif des tissus internes. Etant donné que les capteurs thermiques du corps, situés dans la peau, ne sont pas sensibles au chauffage profond du corps, les travailleurs peuvent, sans le savoir, absorber des quantités assez importantes d'énergie RF. Des études ont montré que des personnes exposées à des champs RF provenant d'appareils radar, d'appareils de chauffage et de collage par ondes RF et de tours de radio et de télévision n'avaient perçu une sensation d'échauffement qu'après avoir été exposées pendant un certain temps.

Il n'existe pas vraiment d'indices permettant de croire que les champs RF peuvent induire des cancers chez les humains. Une étude a cependant émis l'hypothèse qu'ils pourraient favoriser

l'apparition de cancers chez les animaux (Szmigielski et coll., 1988). Les études épidémiologiques portant sur le personnel exposé à des champs RF sont rares et, le plus souvent, d'une portée limitée (Silverman, 1990; NCRP, 1986; OMS, 1981). Plusieurs enquêtes ont été effectuées dans l'ex-Union soviétique et dans des pays d'Europe de l'Est (Roberts et Michaelson, 1985) sur des travailleurs soumis à une exposition professionnelle, mais elles n'ont pas abouti à des résultats concluants quant aux effets sur la santé.

Des études épidémiologiques et d'évaluation portant sur des opérateurs européens de machines à sceller par ondes RF (Kolmodin-Hedman et coll., 1988; Bini et coll., 1986) signalent les problèmes particuliers suivants:

- brûlures causées directement par le rayonnement RF ou indirectement par contact avec des surfaces chaudes;
- engourdissement (paresthésie) des mains et des doigts; perturbation ou altération du sens du toucher;
- irritation des yeux (due peut-être à des fumées provenant d'un matériau contenant du vinyle);
- nette sensation d'échauffement et d'inconfort dans les jambes (due peut-être à la circulation d'un courant électrique entre les jambes de l'opérateur et la terre).

Le radiotéléphone mobile

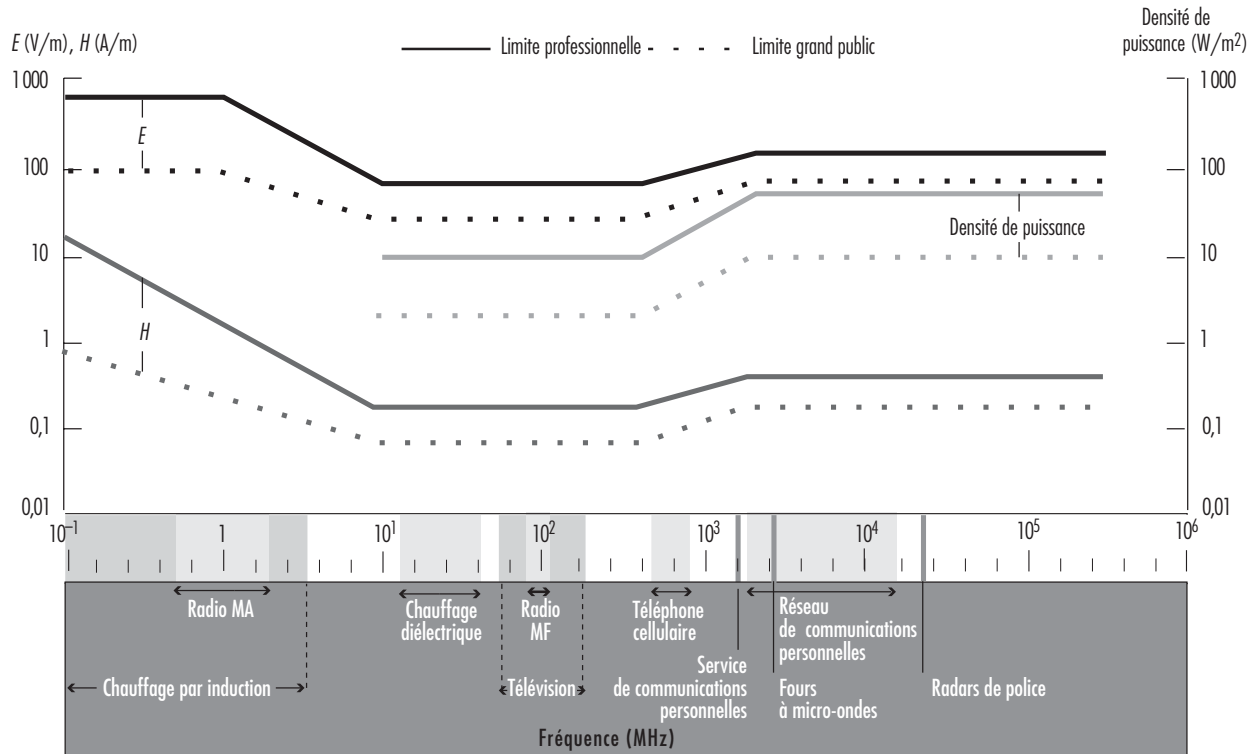
L'utilisation croissante de radiotéléphones personnels a multiplié le nombre des stations de base, qui sont souvent situées dans des zones accessibles au public. Toutefois, l'exposition de celui-ci, du fait de ces stations, est faible. Qu'ils soient analogiques ou numériques, les radiotéléphones fonctionnent en général à des fréquences proches de 900 MHz ou de 1,8 GHz. Les combinés consistent en petits émetteurs radio de faible puissance que l'on tient contre l'oreille et le visage lors de leur utilisation. En fonctionnement, une partie de la puissance rayonnée par l'antenne est donc absorbée par la tête. Des mesures et des calculs effectués sur des maquettes ont abouti à des DAS de l'ordre de quelques W/kg (ICNIRP, 1996b). L'opinion publique s'inquiète des incidences possibles sur la santé de ces champs électromagnétiques, ce qui explique que plusieurs programmes de recherche soient consacrés à cette question (McKinley et coll., rapport non publié). Différentes études épidémiologiques actuellement en cours ont pour but de rechercher un rapport entre l'usage des radiotéléphones mobiles et le cancer du cerveau. Jusqu'ici, une seule étude est parue sur le sujet (Repacholi et coll., 1997); elle portait sur des souris transgéniques qui ont été exposées une heure par jour pendant 18 mois à un signal semblable à celui que l'on utilise dans les communications mobiles numériques. A la fin de l'expérience, 43 des 101 souris exposées avaient des lymphomes, à comparer à 22 sur 100 dans le groupe témoin. L'augmentation était statistiquement significative ($p > 0,001$). Il n'est pas facile d'interpréter ces résultats d'une façon qui permette de les extrapoler aux humains, et d'autres recherches seront nécessaires dans ce domaine.

Les normes et les recommandations

Plusieurs organismes et gouvernements ont publié des normes et des recommandations destinées à éviter une exposition excessive aux champs d'ondes RF. Grandolfo et Mild (1989) ont effectué une étude bibliographique des normes de sécurité mondiales, mais notre examen ici se limitera aux recommandations de l'Association internationale pour la protection contre les radiations (International Radiation Protection Association (IRPA, 1988b) et à la norme C 95.1 de l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, 1991)).

L'IRPA (1988b) fournit des explications complètes sur la raison d'être des limites d'exposition aux champs RF. En bref, les recom-

Figure 49.7 • Limites d'exposition de l'IRPA (1988b) pour le champ électrique E , le champ magnétique H et la densité de puissance



mandations de l'IRPA se fondent sur un DAS limite de base de 4 W/kg, au-delà duquel on considère que les chances d'effets préjudiciables pour la santé augmentent par suite de l'absorption d'énergie RF. Aucun effet nuisible dû à une exposition aiguë n'a été observé en deçà de ce niveau. En se fixant une marge de sécurité de 10 pour tenir compte des conséquences possibles d'une exposition à long terme, l'IRPA a adopté 0,4 W/kg comme niveau de base pour le calcul de limites d'exposition professionnelle. Un facteur de sécurité supplémentaire de 5 est pris en compte dans le calcul des limites relatives au public.

Les limites d'exposition calculées pour l'intensité du champ électrique (E , en V/m), l'intensité du champ magnétique (H , en A/m) et la densité de puissance (en W/m^2) sont présentées dans la figure 49.7. Les valeurs se basent sur la moyenne quadratique des champs E et H pour une période de 6 minutes. Il est recommandé que l'exposition de crête ne dépasse pas les moyennes de plus de 100 fois. En outre, le courant entre le corps et la terre ne devrait pas excéder 200 mA.

La norme C 95.1 établie en 1991 par l'IEEE fixe la valeur limite d'exposition professionnelle (en milieu contrôlé) à 0,4 W/kg pour le DAS moyen pour tout le corps et à 8 W/kg pour le DAS de crête pour un gramme de tissu quelconque pendant 6 minutes ou plus. Les valeurs correspondantes d'exposition pour le grand public (en milieu non contrôlé) sont de 0,08 W/kg dans le cas de l'ensemble du corps, avec un DAS de crête de 1,6 W/kg. Le courant entre le corps et la terre ne devrait pas dépasser 100 mA en milieu professionnel et 45 mA en milieu non contrôlé (voir la documentation IEEE, 1991 pour de plus de détails). Les limites déduites sont présentées dans la figure 49.8.

Les lecteurs intéressés trouveront d'autres renseignements sur les champs d'ondes RF et les micro-ondes dans plusieurs ouvrages, notamment Elder et coll., 1991; Greene, 1992; Polk et Postow, 1986.

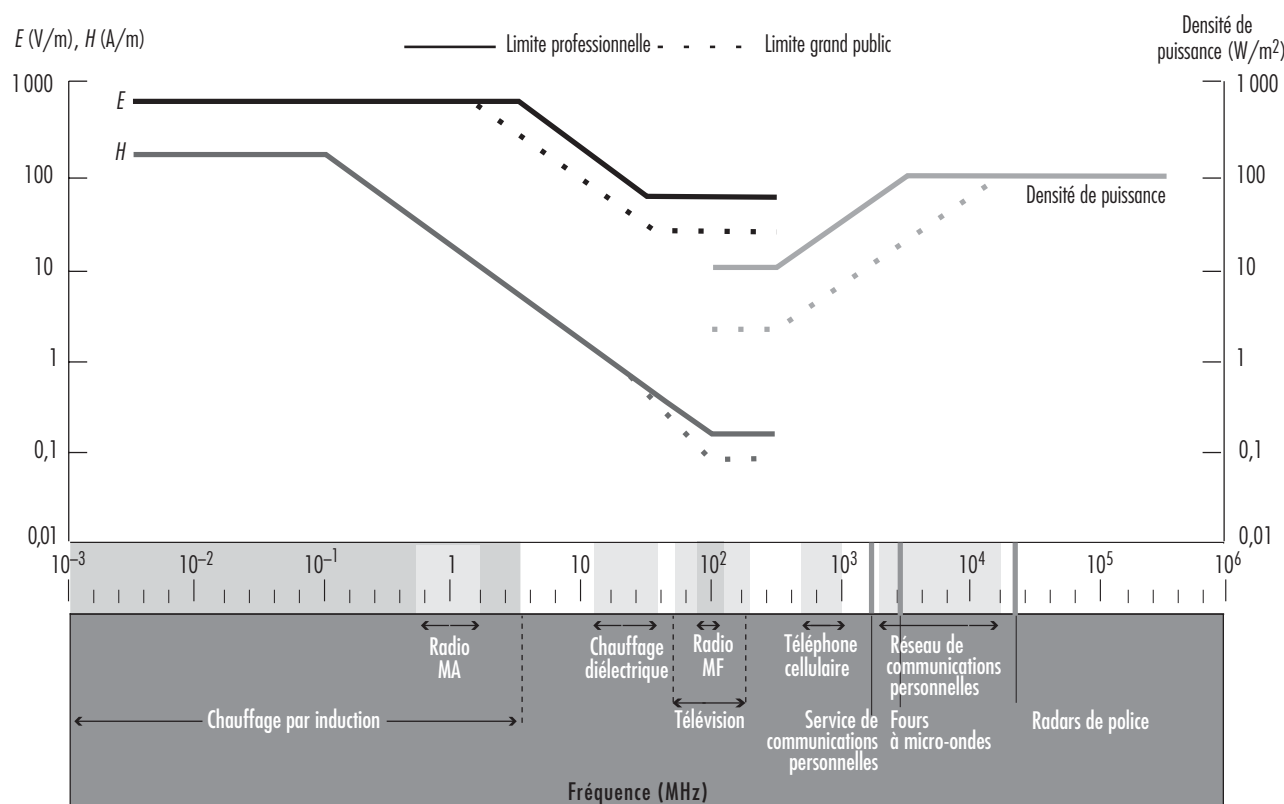
LES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES À BASSE FRÉQUENCE

Michael H. Repacholi

Les champs électriques et magnétiques à basse fréquence (BF) couvrent l'intervalle de fréquence 0 Hz-30 kHz. Dans le présent article, nous désignons par «ondes mégamétriques» l'intervalle compris entre 0 et 300 Hz et par «ondes myriamétriques» l'intervalle compris entre 300 Hz et 30 kHz. Dans ces bandes, la longueur d'onde varie entre l'infini (∞) et 10 km. Par conséquent, le champ électrique et le champ magnétique agissent en pratique indépendamment l'un de l'autre et doivent être traités séparément. Le champ électrique (E) est mesuré en volts par mètre (V/m), le champ magnétique (H) en ampères par mètre (A/m) et la densité de flux magnétique (B) en teslas (T).

Un débat très animé au sujet des effets possibles de ces ondes sur la santé a été lancé à propos des travailleurs qui emploient des matériels fonctionnant dans cette gamme de fréquences. La fréquence qui est de loin la plus courante, c'est-à-dire celle de 50/60 Hz, est utilisée pour la génération, la distribution et la con-

Figure 49.8 • Limites d'exposition de l'IEEE (1991) pour le champ électrique E , le champ magnétique H et la densité de puissance



sommation du courant électrique. La crainte que l'exposition à des champs magnétiques de 50 ou 60 Hz soit liée à une incidence accrue de cancer a été alimentée autant par les articles des médias et des informations douteuses répandues à ce sujet que par le débat scientifique qui se poursuit (Repacholi, 1990; NRC, 1996).

L'objet du présent article est de présenter un aperçu des sujets suivants:

- sources, professions concernées et applications;
- dosimétrie et mesures;
- mécanismes d'interaction et effets biologiques;
- études sur l'humain et effets sur la santé;
- mesures de protection;
- normes d'exposition professionnelle.

On trouvera ci-après des descriptions sommaires destinées à renseigner les travailleurs sur le type et l'intensité des champs dus aux principales sources d'ondes mégamétriques et myriamétriques, ainsi que sur les effets biologiques, les conséquences possibles pour la santé et les limites actuelles d'exposition. On trouvera également un aperçu des précautions et des mesures de sécurité recommandées. En ce qui concerne les terminaux à écran de visualisation, utilisés par de nombreux travailleurs, ils ne sont évoqués que très sommairement, car ils font l'objet du chapitre n° 52 «Les terminaux à écran de visualisation» de la présente *Encyclopédie*.

Une grande partie des renseignements présentés ici figurent sous une forme plus détaillée, dans un certain nombre de documents (OMS, 1984, 1987, 1991, 1993; IRPA, 1990; BIT, 1993a; NRPB, 1992, 1993; IEEE, 1991; Greene, 1992; NRC, 1996).

Les sources d'exposition professionnelle

Les niveaux d'exposition professionnelle varient considérablement et dépendent dans une large mesure de l'application en cause. Le tableau 49.4 présente un résumé des applications caractéristiques utilisant des fréquences dans la bande de 0 à 30 kHz.

Tableau 49.4 • Applications du matériel fonctionnant à des fréquences situées entre 0 et 30 kHz

Fréquence	Longueur d'onde (km)	Applications caractéristiques
16,67, 50, 60 Hz	18 000-5 000	Production, transmission et utilisation du courant électrique, procédés électrolytiques, chauffage par induction, fours à arc et fours-poches, soudage, transport, etc., toute utilisation de l'énergie électrique à des fins industrielles, commerciales, médicales ou de recherche
0,3-3 kHz	1 000-100	Modulation des ondes de radiodiffusion, applications médicales, fours électriques, chauffage par induction, trempe, brasage, fusion, affinage
3-30 kHz	100-10	Communications à très grande portée, radionavigation, modulation des ondes de radiodiffusion, applications médicales, chauffage par induction, trempe, brasage, fusion, affinage, terminaux à écran de visualisation

Production et distribution de l'énergie électrique

Les champs électriques et magnétiques de sources artificielles à 50/60 Hz sont principalement liés à la production et à la distribution de l'énergie électrique, ainsi qu'à l'utilisation d'appareils électriques. Nombre de ces appareils fonctionnent à la fréquence du secteur, c'est-à-dire 50 Hz dans la plupart des pays et 60 Hz en Amérique du Nord. Certaines lignes de chemin de fer électriques sont en outre alimentées en courant à la fréquence de 16,67 Hz.

Les lignes de transmission et les sous-stations à haute tension (HT) engendrent les champs électriques les plus puissants auxquels les travailleurs puissent être régulièrement exposés. La hauteur des conducteurs, la configuration géométrique de la ligne, la distance horizontale entre la ligne et les travailleurs, ainsi que la tension du courant transporté constituent de loin les facteurs les plus importants lorsqu'on considère l'intensité maximale du champ électrique au niveau du sol. À des distances horizontales d'environ le double de la hauteur de la ligne, le champ électrique est quasi inversement proportionnel à la distance (Zaffanella et Deno, 1978). À l'intérieur des bâtiments voisins des lignes de transmission HT, le champ électrique est ordinairement atténué, par rapport à un champ non perturbé, d'un facteur d'environ 100 000, selon la configuration du bâtiment et la nature des matériaux de la charpente.

Les champs magnétiques dus aux lignes de transmission aériennes sont d'habitude relativement faibles, par comparaison avec les applications industrielles utilisant des courants élevés. Les employés des services publics d'électricité qui travaillent dans des sous-stations ou entretiennent des lignes de transmission sous tension forment un groupe particulier exposé à des champs magnétiques intenses (5 mT, voire plus dans certains cas). En l'absence de matériaux ferromagnétiques, les lignes du champ magnétique forment des cercles concentriques autour du conducteur. La géométrie de celui-ci mise à part, la densité maximale du flux magnétique ne dépend que de l'intensité du courant. Au-dessous d'une ligne de transmission à haute tension, le champ magnétique est surtout orienté perpendiculairement à l'axe de la ligne. Au niveau du sol, la densité de flux atteint son maximum sous le conducteur central ou sous les conducteurs extérieurs, selon la relation de phase qui existe entre les conducteurs. Dans le cas d'une ligne de transmission aérienne classique à double circuit de 500 kV, la densité maximale du flux magnétique au niveau du sol est d'environ 35 μT par kiloampère de courant transporté (Bernhardt et Matthes, 1992). Des densités de flux magnétique atteignant 0,05 mT sont courantes dans les lieux de travail proches de lignes aériennes, dans les sous-stations et dans les centrales électriques fonctionnant à 16,67, 50 ou 60 Hz (Krause, 1986).

Les procédés industriels

L'exposition professionnelle aux champs magnétiques est essentiellement associée au travail à proximité d'équipements industriels alimentés en courants élevés: soudage, fusion sous laitier, chauffage (fours, appareils de chauffage à induction) et brassage.

Des relevés portant sur les appareils de chauffage à induction utilisés dans l'industrie ont été effectués au Canada (Stuchly et Lécuyer, 1985), en Pologne (Aniolczyk, 1981), en Australie (Repacholi, données non publiées) et en Suède (Lövsund, Oberg et Nilsson, 1982). Ils ont révélé qu'aux endroits où se tiennent les opérateurs, la densité de flux magnétique peut se situer entre 0,7 μT et 6 mT, selon la fréquence utilisée et la distance entre l'opérateur et la machine. Dans leur étude des champs magnétiques engendrés par le matériel industriel de soudage et de fabrication de l'acier électrique, Lövsund, Oberg et Nilsson (1982) ont constaté que les machines à souder par points (50 Hz, 15 à 106 kA) et les fours-poches (50 Hz, 13 à 15 kA) produisaient des champs atteignant 10 mT à 1 m. En Australie, on a pu mesurer, dans une installation de chauffage par induction fonctionnant

entre 50 Hz et 10 kHz, des champs de 2,5 mT (fours à induction de 50 Hz) aux endroits où se tiennent les opérateurs. De plus, les champs maximaux mesurés autour des inducteurs de chauffage fonctionnant à d'autres fréquences atteignaient 130 μT à 1,8 kHz, 25 μT à 2,8 kHz et plus de 130 μT à 9,8 kHz.

Comme les bobines produisant ces champs magnétiques sont souvent de dimensions réduites, il y a rarement forte exposition de tout le corps, mais plutôt exposition locale se limitant principalement aux mains. La densité de flux magnétique au niveau des mains de l'opérateur peut atteindre 25 mT (Lövsund et Mild, 1978; Stuchly et Lécuyer, 1985). Dans la plupart des cas, cependant, elle demeure inférieure à 1 mT. Pour ce qui est du champ électrique à proximité des inducteurs de chauffage, il est habituellement faible.

Les travailleurs de l'industrie électrochimique sont exposés à des champs électriques et magnétiques intenses produits par les fours électriques et d'autres équipements parcourus par des courants élevés. Des densités de flux atteignant 50 mT, en effet, ont été mesurées à proximité de fours à induction et de cuves d'électrolyse industrielles.

Les terminaux à écran de visualisation

L'utilisation des unités d'affichage et des terminaux à écran de visualisation augmente à un rythme accéléré. Les travailleurs qui ont à s'en servir ont exprimé des craintes au sujet des effets possibles des rayonnements de faible niveau qu'ils émettent. Des champs magnétiques (à des fréquences de 15 à 125 kHz) atteignant 0,69 A/m (0,9 μT) ont été mesurés dans les conditions les plus défavorables à proximité de la surface de l'écran (Bureau of Radiological Health, 1981). Ce résultat a été confirmé par de nombreuses enquêtes (Roy et coll., 1984; Repacholi, 1985; IRPA, 1988a). Des organismes nationaux et des spécialistes ont procédé à des examens approfondis des mesures et des enquêtes réalisées en ce qui concerne les terminaux à écran de visualisation; ils ont abouti à la conclusion que ces appareils n'émettent aucun rayonnement pouvant altérer la santé (Repacholi, 1985; IRPA, 1988a; BIT, 1993b). Il n'est pas jugé nécessaire de mesurer périodiquement le rayonnement parce que, même dans les conditions les plus défavorables ou en cas de défectuosité du matériel, le niveau des émissions reste très inférieur aux limites fixées dans toutes les normes nationales ou internationales (IRPA, 1988a).

On trouvera un examen complet des émissions ainsi qu'un résumé de la littérature scientifique, des normes et des recommandations applicables dans le document du Bureau international du Travail (BIT, 1993b).

Les applications médicales

Des études ont été faites sur le traitement de personnes souffrant de fractures lentes à guérir au moyen de champs magnétiques pulsés (Bassett, Mitchell et Gaston, 1982; Mitbreit et Manyachin, 1984). L'utilisation de tels champs pour favoriser la cicatrisation et la régénération des tissus fait actuellement l'objet d'études.

Différents dispositifs produisant des champs magnétiques pulsés servent à stimuler la croissance des os. Un appareil caractéristique de ce type produit une densité moyenne de flux magnétique d'environ 0,3 mT, avec une intensité de crête d'environ 2,5 mT, et induit dans les os des champs électriques de crête de l'ordre de 0,075 à 0,175 V/m (Bassett, Pawluk et Pilla, 1974). Près de la surface du membre exposé, le dispositif produit une densité de flux magnétique de crête de l'ordre de 1,0 mT, qui induit dans les tissus des courants d'ionisation d'une densité de 10 à 100 mA/m² (1 à 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Les mesures

Avant de mesurer les champs mégamétriques ou myriamétriques, il importe d'obtenir autant de renseignements que possible sur les

caractéristiques de la source et la situation d'exposition. Ces renseignements sont nécessaires pour estimer l'ordre de grandeur des champs à mesurer et choisir en conséquence les appareils de mesure (Tell, 1983).

Les renseignements concernant la source devraient comprendre ce qui suit:

- fréquences mises en œuvre, y compris les harmoniques;
- puissance transmise;
- polarisation (orientation du champ *E*);
- caractéristiques de modulation (valeurs moyennes et de crête);
- régime d'utilisation, largeur et fréquence de répétition des impulsions;
- caractéristiques de l'antenne (type, gain, largeur du faisceau et vitesse de balayage).

Les renseignements au sujet de la situation d'exposition devraient comprendre ce qui suit:

- distance de la source;
- présence d'objets pouvant causer la dispersion des ondes. La dispersion produite par des surfaces planes peut doubler l'intensité du champ *E*. L'effet des surfaces incurvées (par exemple, réflecteurs d'angle) peut être encore plus fort.

Les résultats de relevés effectués en milieu de travail sont résumés dans le tableau 49.5.

Les appareils de mesure

Un appareil de mesure du champ électrique ou magnétique se compose essentiellement de trois parties: une sonde, des conducteurs et le boîtier de mesure. Pour effectuer des mesures correctes, les appareils de mesure devraient avoir les caractéristiques énumérées ci-après:

- la sonde doit réagir soit au champ *E*, soit au champ *H*, mais non aux deux simultanément;
- la sonde ne doit pas causer de perturbation sensible du champ;
- les conducteurs reliant la sonde au boîtier de mesure ne doivent ni perturber de façon sensible le champ autour de la sonde, ni capter une partie de l'énergie du champ;

Tableau 49.5 • Sources d'exposition professionnelle aux champs magnétiques

Source	Densité de flux magnétique (mT)	Distance (m)
Terminaux à écran de visualisation	Jusqu'à $2,8 \times 10^{-4}$	0,3
Lignes haute tension	Jusqu'à 0,4	Sous la ligne
Centrales électriques	Jusqu'à 0,27	1
Arcs de soudage (0-50 Hz)	0,1-5,8	0-0,8
Appareils de chauffage à induction (50 Hz-10 kHz)	0,9-65	0,1-1
Fours-poches à 50 Hz	0,2-8	0,5-1
Fours à arc à 50 Hz	Jusqu'à 1	2
Agitateurs à induction à 10 Hz	0,2-0,3	2
Soudage sous laitier à 50 Hz	0,5-1,7	0,2-0,9
Matériel thérapeutique	1-16	1

Sources: Allen, 1991; Bernhardt, 1988a; Krause, 1986; Lövsund, Oberg et Nilsson, 1982; Repacholi, données non publiées; Stuchly, 1986; Stuchly et Lévyer, 1985, 1989.

- la réponse en fréquence de la sonde doit couvrir la gamme de fréquences à mesurer;
- s'il est utilisé dans le champ proche réactif, le capteur de la sonde devrait de préférence mesurer moins d'un quart de la longueur d'onde correspondant à la plus haute fréquence présente;
- l'appareil de mesure devrait indiquer la valeur efficace (moyenne quadratique) du paramètre mesuré du champ;
- le temps de réponse de l'appareil devrait être connu. Il est préférable que ce temps soit de 1 seconde, ou moins, pour que l'on puisse facilement détecter les champs intermittents;
- la sonde devrait répondre à toutes les composantes de polarisation du champ. A cet effet, elle devrait avoir une réponse isotrope inhérente ou pouvoir être orientée dans trois directions orthogonales;
- autres caractéristiques souhaitables: bonne protection contre les surcharges, fonctionnement sur piles, portabilité et robustesse;
- les appareils de mesure doivent indiquer un ou plusieurs des paramètres suivants: champ moyen *E* (V/m) ou moyenne des carrés du champ *E* (V^2/m^2); champ moyen *H* (A/m) ou moyenne des carrés du champ *H* (A^2/m^2).

Les relevés

On procède ordinairement à des relevés pour déterminer si les champs présents sur le lieu de travail restent au-dessous des limites fixées dans les normes nationales. La personne qui prend les mesures doit donc très bien connaître ces normes.

Tous les endroits occupés par des opérateurs et accessibles au personnel doivent être compris dans un relevé. L'opérateur de l'équipement mis à l'épreuve et le responsable du relevé devraient se tenir aussi loin que possible de la zone d'essai. Tous les objets normalement présents, qui pourraient refléter ou absorber de l'énergie, doivent rester en place. Le responsable du relevé devrait se protéger contre le risque de brûlure et de choc par ondes RF, surtout à proximité de systèmes basse fréquence à forte puissance.

Les mécanismes d'interaction et les effets biologiques

Les mécanismes d'interaction

Les seuls mécanismes établis d'interaction entre les champs mégamétriques ou myriamétriques et les systèmes biologiques sont passés en revue ci-après:

- les champs électriques qui induisent une charge superficielle sur un corps exposé engendrent dans ce corps des courants (mesurés en mA/m²), dont l'intensité est liée à la densité de charge surfacique. Selon les conditions d'exposition, la taille, la forme et la position du corps exposé dans le champ, cette densité peut varier considérablement, et il en résulte une distribution variable et irrégulière des courants à l'intérieur du corps;
- les champs magnétiques agissent également sur les humains en induisant des champs et des courants électriques à l'intérieur du corps;
- les charges électriques induites dans un objet conducteur (par exemple, une voiture) par des champs électriques mégamétriques ou myriamétriques peuvent engendrer des courants dans le corps d'une personne en contact avec l'objet;
- un champ magnétique s'exerçant par couplage sur un objet conducteur (par exemple, un grillage métallique) engendre des courants électriques (de la même fréquence que le champ) dans le corps d'une personne en contact avec le conducteur;
- des décharges transitoires (étincelles) peuvent se produire si une personne exposée à un puissant champ électrique s'approche suffisamment d'un objet métallique exposé au même champ;

- les champs électriques ou magnétiques peuvent perturber le fonctionnement d'un dispositif médical implanté (par exemple, un stimulateur cardiaque unipolaire).

Parmi les interactions énumérées ci-dessus, les deux premières sont des exemples de couplage direct entre des personnes et des champs d'ondes mégamétriques ou myriamétriques. Les quatre dernières, par contre, sont des exemples de mécanismes de couplage indirect parce qu'elles ne peuvent se produire que si l'organisme exposé se trouve à proximité d'un autre corps soumis au champ (autres êtres humains, animaux ou objets tels que voitures, clôtures, etc.).

Même si des hypothèses ont été émises sur l'existence d'autres mécanismes d'interaction entre les tissus biologiques et les champs d'ondes mégamétriques ou myriamétriques et que quelques faits semblent les appuyer (OMS, 1993; NRPB, 1993; NRC, 1996), il n'a jamais été possible d'établir que ces mécanismes pouvaient avoir des effets nocifs.

Les effets sur la santé

Les indices recueillis jusqu'ici donnent à penser que la plupart des effets prouvés de l'exposition à des champs électriques et magnétiques de fréquence comprise entre 0 et 30 kHz résultent de réactions aiguës à des charges superficielles et à des courants induits. Les personnes exposées peuvent percevoir les fluctuations de la charge superficielle induite sur leur corps par les champs électriques d'ondes mégamétriques (mais non par les champs magnétiques). Ces variations peuvent être gênantes si elles sont assez intenses. Les effets produits par des courants traversant le corps humain (seuils de perception, de relâchement et de contraction tétanique) sont résumés dans le tableau 49.6.

On a réussi à stimuler des cellules nerveuses et musculaires humaines au moyen de courants induits par exposition à des champs magnétiques de plusieurs mT, à des fréquences comprises entre 1 et 1,5 kHz. Le seuil estimé de la densité du courant se situait au-dessus de 1 A/m². Des effets de papillotement visuel peuvent être provoqués par l'exposition de l'œil à des champs magnétiques même à des niveaux de l'ordre de 5 à 10 mT (à 20 Hz) ou par application directe de courants électriques sur la tête. Ces réactions, ainsi que les résultats d'études neurophysiologiques semblent indiquer que certaines fonctions subtiles du système nerveux central, comme le raisonnement ou la mémoire, pourraient être affectées par des densités de courant supérieures à 10 mA/m² (NRPB, 1993). Il est probable que les seuils restent

Tableau 49.6 • Effets de courants circulant dans le corps humain

Effets	Sujets	Seuil d'intensité du courant (mA)				
		50 et 60 Hz	300 Hz	1000 Hz	10 kHz	30 kHz
Perception	Hommes	1,1	1,3	2,2	15	50
	Femmes	0,7	0,9	1,5	10	35
	Enfants	0,55	0,65	1,1	9	30
Choc; seuil de retrait	Hommes	9	11,7	16,2	55	126
	Femmes	6	7,8	10,8	37	84
	Enfants	4,5	5,9	8,1	27	63
Tétanisation thoracique; choc électrique grave	Hommes	23	30	41	94	320
	Femmes	15	20	27	63	214
	Enfants	12	15	20,5	47	160

Source: Bernhardt, 1988b.

constants jusqu'à environ 1 kHz, et s'élèvent ensuite avec la fréquence.

Plusieurs études in vitro (OMS, 1993; NRPB, 1993) ont signalé des changements du métabolisme (modification de l'activité enzymatique et du métabolisme des protéines et toxicité réduite des lymphocytes) dans différentes lignées cellulaires exposées à des champs électriques d'ondes mégamétriques et myriamétriques, ainsi qu'à des courants directement appliqués aux cultures cellulaires. La plupart des effets ont été notés à des densités de courant comprises entre 10 et 1 000 mA/m², mais ces réactions ne sont pas très clairement définies (Sienkiewicz, Saunder et Kowalczuk, 1991). Il y a toutefois lieu de noter que les densités de courant endogènes engendrées par l'activité électrique des nerfs et des muscles peuvent couramment s'élever à 1 mA/m² et même atteindre 10 mA/m² dans le cœur. A ces densités, le courant ne perturbe pas le système nerveux, les muscles et les autres tissus. On peut éviter les effets biologiques en maintenant le courant induit à moins de 10 mA/m² jusqu'à des fréquences d'environ 1 kHz.

Il y a plusieurs autres mécanismes possibles d'interaction biologique qui pourraient avoir de multiples incidences sur la santé et sur lesquels nos connaissances sont limitées. Mentionnons notamment les suivants: changement possible des niveaux nocturnes de mélatonine dans l'épiphyse et perturbation des rythmes circadiens induits chez les animaux par l'exposition à des champs électriques et magnétiques d'ondes mégamétriques, et effets possibles des champs magnétiques mégamétriques sur les processus de développement et de cancérogenèse. De plus, il semble que l'on ait détecté des réactions biologiques à des champs électriques et magnétiques très faibles, ce qui se manifesterait par une altération de la mobilité des ions calcium dans le tissu cérébral, la modification des profils de décharge neuronale et la modification du comportement opérant. On a également signalé l'existence de «fenêtres» d'amplitude et de fréquence qui remettent en cause l'hypothèse conventionnelle selon laquelle l'intensité de la réaction croît avec la dose. Ces effets ne sont pas assez bien établis pour servir de base à la définition de limites d'exposition pour les humains, mais justifient des études plus poussées (Sienkiewicz, Saunder et Kowalczuk, 1991; OMS, 1993; NRC, 1996).

Le tableau 49.7 présente les densités de courant induites correspondant à divers effets biologiques chez les humains.

Les normes d'exposition professionnelle

La quasi-totalité des normes fixant des limites dans l'intervalle de fréquence compris entre 0 et 30 kHz se fondent sur la nécessité de maintenir les champs et les courants électriques induits à des niveaux non dangereux. Habituellement, les densités de courant induites sont limitées à moins de 10 mA/m². Le tableau 49.8 présente un résumé des limites actuelles d'exposition professionnelle.

Tableau 49.7 • Densités de courant approximatives produisant certains effets biologiques

Effet	Densité de courant (mA/m ²)
Stimulation directe des nerfs et des muscles	1 000-10 000
Altération de l'activité du système nerveux central	100-1 000
Modifications du métabolisme cellulaire in vitro	
Modifications de la fonction rétinienne	10-100
Modifications probables du système nerveux central	
Modifications du métabolisme cellulaire in vitro	
Densité de courant endogène	1-10

Source: Sienkiewicz, Saunder et Kowalczuk, 1991.

Tableau 49.8 • Limites d'exposition professionnelle aux champs électriques et magnétiques de fréquence située entre 0 et 30 kHz (f est en Hz)

Pays/Référence	Intervalle de fréquence	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (A/m)
Normes internationales (IRPA, 1990)	50/60 Hz	10 000	398
Etats-Unis (IEEE, 1991)	3-30 kHz	614	163
Etats-Unis (ACGIH, 1993)	1-100 Hz	25 000	60/ f
	100-4 000 Hz	$2,5 \times 10^6/f$	60/ f
	4-30 kHz	625	60/ f
Allemagne (1996)	50/60 Hz	10 000	1 600
Royaume-Uni (NRPB, 1993)	1-24 Hz	25 000	64 000/ f
	24-600 Hz	$6 \times 10^5/f$	64 000/ f
	600-1 000 Hz	1 000	64 000/ f
	1-30 kHz	1 000	64

Les mesures de protection

L'exposition professionnelle à proximité des lignes de transmission à haute tension dépend de l'endroit où se tient le travailleur, selon qu'il est au niveau du sol ou à la hauteur des conducteurs sur des lignes sous tension. Dans ce dernier cas, il peut porter des vêtements protecteurs pour réduire l'intensité du champ électrique et la densité du courant induit dans son corps à des valeurs proches de celles qu'il aurait à subir s'il travaillait au sol. Par contre, les vêtements protecteurs ne réduisent pas l'intensité du champ magnétique.

Il importe d'attribuer clairement la responsabilité de la protection des travailleurs et du public contre d'éventuels effets nocifs de l'exposition aux champs électriques et magnétiques d'ondes mégamétriques et myriamétriques. Il est recommandé à cet effet que les autorités compétentes prennent les mesures suivantes:

- définition et adoption de limites d'exposition et mise en œuvre d'un programme de vérification de la conformité;
- élaboration de normes techniques destinées à améliorer la compatibilité électromagnétique (dans le cas des stimulateurs cardiaques, par exemple);
- élaboration de normes définissant des zones d'accès limité autour des sources de champs électriques et magnétiques puissants en fonction des effets d'incompatibilité électromagnétique (par exemple, dans le cas des stimulateurs cardiaques et d'autres dispositifs implantés). On devrait également envisager d'afficher des messages de mise en garde;
- désignation obligatoire d'une personne responsable de la sécurité des travailleurs et du public à chaque site où les possibilités d'exposition sont élevées;
- mise au point de méthodes de mesure et de techniques d'enquête normalisées;
- formation obligatoire des travailleurs pour les familiariser avec les effets de l'exposition aux champs électriques et magnétiques d'ondes mégamétriques et myriamétriques, ainsi qu'avec les mesures et les règles destinées à les protéger;
- élaboration de recommandations ou de codes de bonne pratique sur la sécurité des travailleurs exposés à des champs électriques et magnétiques d'ondes mégamétriques ou myriamétriques. On pourrait s'inspirer à cette fin du document du BIT (1993a).

LES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES STATIQUES

Martino Grandolfo

L'environnement naturel et le cadre de vie de l'être humain produisent des champs électriques et magnétiques de diverses intensités qui s'exercent partout, en plein air, au bureau, au foyer et à l'usine. Deux importantes questions se posent à cet égard: 1) l'exposition à ces champs peut-elle nuire à la santé; et 2) quelles valeurs faut-il donner à des limites d'exposition se voulant «sans danger»?

Il est question dans cet article des champs électriques et magnétiques statiques. On y passe en revue les études effectuées sur les travailleurs de différentes branches et sur des animaux, études qui n'ont pas réussi à démontrer l'existence d'effets biologiques bien caractérisés aux niveaux d'exposition rencontrés en pratique. Néanmoins, les efforts déployés par un certain nombre d'organisations internationales pour établir des lignes directrices destinées à protéger les travailleurs et la population contre des niveaux d'exposition potentiellement dangereux sont aussi évoqués.

Définition

Lorsqu'une tension ou une intensité électriques sont appliquées à un objet tel qu'un conducteur, celui-ci acquiert une charge qui exerce des forces sur les autres charges se trouvant à proximité. On distingue deux genres de forces: celle que produisent des charges électriques statiques, que l'on appelle *force électrostatique*, et celle qui ne se manifeste que lorsque des charges sont en mouvement (par exemple, quand un courant électrique circule dans un conducteur), que l'on appelle *force magnétique*. Les physiciens et les mathématiciens ont créé le concept de *champ* pour décrire l'existence et la distribution spatiale de ces forces. On parle donc de champs de forces ou, tout simplement, de champs électriques et magnétiques.

L'adjectif *statique* décrit une situation dans laquelle toutes les charges sont fixes dans l'espace, ou se déplacent d'un mouvement régulier, produisant des charges et des densités de courant qui sont constantes dans le temps. Si les charges sont fixes, nous aurons un champ électrique dont l'intensité en un point quelconque de l'espace dépend de la valeur et de la disposition géométrique de toutes les charges. Dans le cas d'un courant électrique constant circulant dans un circuit, nous aurons à la fois un champ électrique et un champ magnétique constants dans le temps (champs statiques), puisque la densité de charge en tout point du circuit demeure invariable.

Electricité et magnétisme sont deux phénomènes distincts tant que les charges et le courant sont statiques; dans de telles conditions, il n'existe aucune relation entre le champ électrique et le champ magnétique et l'on peut les traiter séparément (contrairement à ce qui se produit si les champs varient dans le temps). Les champs électriques et magnétiques statiques sont clairement caractérisés par des intensités constantes et indépendantes du temps, correspondant à la limite de fréquence nulle des ondes d'extrêmement basse fréquence.

Les champs électriques statiques

L'exposition naturelle et professionnelle

Un champ électrique statique est produit par un corps portant des charges électriques. De même, des charges électriques sont induites à la surface d'un objet placé dans un champ électrique statique. Par conséquent, le champ électrique à la surface d'un objet, comme sur une pointe, peut être plus intense que le champ électrique non perturbé qui aurait existé en l'absence de l'objet.

Tableau 49.9 • Résultats d'études portant sur des animaux soumis à des champs électriques statiques

Paramètres biologiques	Effets signalés	Conditions d'exposition
Hématologie et immunologie	Changements des fractions albumineuse et globulinique des protéines sériques chez le rat Réactions non cohérentes	Exposition continue à des champs de 2,8 à 19,7 kV/m entre 22 et 52 jours d'âge
	Pas de différences significatives dans les numérations globulaires, les protéines sériques ou la biochimie sanguine chez la souris	Exposition à 340 kV/m, 22 h/jour pour un total de 5 000 h
Système nerveux	Modifications significatives de l'électroencéphalogramme chez le rat. Toutefois, aucun indice clair de réponse cohérente	Exposition à des champs électriques atteignant 10 kV/m
	Pas de modification significative des concentrations et des taux d'utilisation de divers neurotransmetteurs dans le cerveau du rat mâle	Exposition à un champ de 3 kV/m pendant des périodes atteignant 66 h
Comportement	Des études sérieuses récemment réalisées ne signalent aucun effet sur le comportement des rongeurs	Exposition à des champs atteignant 12 kV/m
	Production d'un comportement d'évitement lié à la dose chez le rat mâle, sans influence des ions de l'air	Exposition à des champs électriques continus de 55 à 80 kV/m
Reproduction et développement	Pas de différences significatives dans le nombre total de descendants, ni dans le pourcentage de survivants chez la souris	Exposition à 340 kV/m, 22 h/jour, avant, pendant et après la gestation

Le champ à l'intérieur de l'objet peut être très petit ou nul. Un champ électrique exerce une force sur des objets portant une charge; il peut, par exemple, hérissier les poils du corps, ce qui est parfois perceptible.

En moyenne, la terre porte une charge superficielle négative, tandis que la haute atmosphère est chargée positivement. Le champ électrique statique résultant, près de la surface de la terre, a une intensité d'environ 130 V/m. Ce champ diminue avec l'altitude, passant à environ 100 V/m à 100 m, à 45 V/m à 1 km et à moins de 1 V/m à 20 km. Toutefois, les valeurs effectives varient considérablement, selon le profil local de température et d'humidité et la présence de contaminants ionisés. Au-dessous de formations orageuses et même à l'approche de telles formations, d'importantes variations de champ se produisent au niveau du sol parce que la partie inférieure d'un nuage est en général négative, tandis que la masse supérieure est positive. De plus, il existe une différence de potentiel entre le nuage et le sol. Au fur et à mesure de l'approche du nuage, le champ au sol commence parfois par augmenter pour s'inverser ensuite, le sol acquérant une charge positive. Dans ce processus, on peut observer des champs de 100 V/m à 3 kV/m même en l'absence d'éclairs locaux. Les inversions de champ peuvent se produire très rapidement, parfois en une minute et des intensités de champ élevées peuvent persister pendant toute la durée de l'orage. Comme les formations orageuses, les nuages ordinaires contiennent des charges électriques et peuvent donc modifier dans une forte mesure le champ électrique au sol. De plus, le champ peut doubler comparativement à sa valeur par beau temps en présence de brouillard, de pluie ou de grandes et de petites zones ionisées d'origine naturelle. Même par temps parfait, le champ électrique fluctue au cours du cycle journalier. Ces variations diurnes sont probablement dues à des changements assez réguliers de l'ionisation locale, à des fluctuations de la température et de l'humidité et aux changements correspondants de la conductivité électrique de l'atmosphère à proximité du sol, ainsi qu'au transfert cinétique des charges sous l'effet des mouvements locaux de l'air.

Les valeurs typiques des champs électrostatiques d'origine humaine se situent entre 1 et 20 kV/m dans les bureaux et dans les

logements. On trouve souvent des champs de cet ordre au voisinage d'appareils à haute tension comme les téléviseurs et les terminaux à écran de visualisation. Ils peuvent également être engendrés par frottement. Les lignes de transmission à courant continu, qui constituent un moyen économique de distribution de l'électricité sur de grandes distances, engendrent aussi des champs électriques et magnétiques.

Les champs électriques statiques sont d'une utilisation courante dans différentes branches: produits chimiques, textiles, aéronautique, papier, caoutchouc et transports.

Les effets biologiques

Les études expérimentales n'ont abouti à aucun résultat permettant de conclure que les champs électriques statiques peuvent nuire à la santé humaine. Les quelques rares études effectuées sur des animaux ne semblent pas non plus avoir confirmé la thèse de l'existence d'effets sur les gènes, sur la croissance de tumeurs ou sur les systèmes endocrinien ou cardio-vasculaire (le tableau 49.9 présente un résumé des résultats des études effectuées sur des animaux).

Par ailleurs, aucune étude *in vitro* n'a été réalisée pour évaluer les effets de l'exposition de cellules à des champs électriques statiques.

Des calculs théoriques permettent de penser qu'un champ électrique statique induit une charge à la périphérie du corps d'une personne exposée que celle-ci peut percevoir en cas de décharge par l'intermédiaire d'un objet mis à la terre. Sous l'effet d'un potentiel assez élevé, l'air s'ionise et peut conduire un courant électrique, par exemple, entre un objet chargé et une personne en contact avec la terre. La *tension de claquage* dépend d'un certain nombre de facteurs, dont la forme de l'objet chargé et les conditions atmosphériques. Les valeurs typiques des champs électriques correspondants se situent entre 500 et 1 200 kV/m.

Selon des rapports provenant de quelques pays, des opérateurs de terminaux à écran de visualisation auraient souffert de troubles cutanés, mais la relation précise entre ces troubles et le travail sur ce type de matériel n'apparaît pas clairement. On a émis l'hypothèse que les champs électriques statiques pouvaient avoir causé

ces troubles. Il est également possible que la charge électrostatique de l'opérateur ait joué un rôle. Toutefois, les données de recherche disponibles nous imposent de considérer comme hypothétique toute relation entre les champs électrostatiques et des troubles cutanés.

Le mesurage, la prévention et les normes d'exposition

Le mesurage de l'intensité d'un champ électrique statique peut se ramener au mesurage des tensions ou des charges électriques. On trouve dans le commerce différents voltmètres électrostatiques permettant d'effectuer, sans contact matériel, des mesurages précis de champs électrostatiques et d'autres sources à haute impédance. Certains appareils recourent à un hacheur électrostatique pour réduire la dérive et à une rétroaction négative pour améliorer la précision et réduire la sensibilité à l'écart entre la sonde et la surface. Dans certains cas, l'électrode électrostatique «regarde» la surface étudiée par une petite ouverture ménagée à la base de la sonde. Le signal alternatif haché induit sur cette sonde est proportionnel à la différence de potentiel entre la surface et la sonde. Des adaptateurs à gradient sont utilisés comme accessoires des voltmètres électrostatiques, leur permettant alors de mesurer l'intensité du champ électrostatique et de donner une lecture directe en volts par mètre d'écart entre la surface étudiée et la plaque mise à la terre de l'adaptateur.

Il n'existe pas actuellement de données fiables pouvant servir de base à la définition de limites d'exposition aux champs électriques statiques. En principe, il serait possible de déduire une limite d'exposition de la tension minimale de claquage dans l'air; toutefois, le champ qui s'exerce sur une personne placée dans un champ électrique statique varie avec l'orientation et la forme du corps, ce qu'on doit prendre en compte lorsqu'on cherche à définir une limite appropriée.

Aux Etats-Unis, la Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)) a recommandé des valeurs limites d'exposition sous la forme de TLV (1995). Ces TLV représentent l'intensité maximale du champ électrique statique auquel pratiquement tous les travailleurs peuvent être exposés sans protection, de façon répétée, en milieu de travail, sans risque d'effets nocifs. Selon l'ACGIH, l'exposition professionnelle à des champs électriques statiques ne devrait pas dépasser 25 kV/m. Cette valeur devrait servir de guide pour contrôler l'exposition et, compte tenu de la sensibilité individuelle, ne devrait pas être considérée comme fixant une ligne de démarcation claire entre des niveaux sûrs et des niveaux dangereux (cette limite correspond à l'intensité du champ dans l'air, à l'écart de surfaces conductrices pouvant engendrer des risques notables par décharges, par étincelles et par courants de contact, et s'applique à une exposition tant partielle que totale du corps). Il faudrait prendre soin d'éliminer tous les objets non mis à la masse ou de les raccorder à une prise de terre ou encore de porter des gants isolants en les manipulant. De manière générale la prudence dicte de recourir à des équipements ou dispositifs de protection (vêtements, gants, matériaux isolants, etc.) dans tous les champs d'une intensité supérieure à 15 kV/m.

Selon l'ACGIH, les connaissances actuelles relatives aux réactions humaines et aux effets biologiques possibles des champs électriques statiques ne permettent pas de fixer des TLV fiables sous forme de moyennes pondérées dans le temps. A défaut de renseignements précis provenant du fabricant relatifs à la compatibilité électromagnétique, il est recommandé de maintenir à 1 kV/m ou moins l'exposition des patients portant des stimulateurs cardiaques ou d'autres dispositifs électroniques à usage médical.

D'après une norme DIN allemande, l'exposition professionnelle aux champs électriques statiques ne devrait pas dépasser 40 kV/m. Une limite de 60 kV/m est autorisée pendant de courtes périodes (jusqu'à 2 h par jour).

Au Royaume-Uni, le National Radiological Protection Board (NRPB, 1993) a publié en 1993 un avis au sujet des restrictions à imposer à l'exposition des personnes à des champs et à des rayonnements électromagnétiques, y compris les champs électriques et magnétiques statiques. Le document du NRPB fournit des niveaux d'investigation auxquels on doit comparer les valeurs mesurées des champs pour déterminer s'il y a ou non conformité avec les limites de base. Si le champ auquel une personne est exposée dépasse le niveau d'investigation applicable, on doit vérifier la conformité aux limites de base. Les facteurs à considérer lors d'une telle vérification comprennent, par exemple, l'efficacité du couplage entre la personne et le champ, la distribution spatiale du champ dans l'espace occupé par la personne et la durée de l'exposition.

D'après le NRPB, il n'est pas possible de recommander des limites de base destinées à éviter les effets directs de l'exposition à des champs électriques statiques. Le NRPB définit plutôt des valeurs ayant pour objet de prévenir les effets gênants d'une perception directe de la charge électrique superficielle et les effets indirects tels que les chocs électriques. Pour la plupart des individus, il n'y a pas de perception gênante de la charge électrique superficielle agissant directement sur le corps dans des champs statiques inférieurs à environ 25 kV/m, chiffre identique à celui que recommande l'ACGIH. Pour éviter les étincelles (effets indirects) qui sont une cause de stress, le NRPB recommande que les courants continus par contact soient limités à moins de 2 mA. Quant aux chocs électriques produits par des sources à faible impédance, on peut les éviter en se conformant aux consignes de sécurité électrique établies pour le matériel en cause.

Les champs magnétiques statiques

L'exposition naturelle et professionnelle

Le corps est relativement «transparent» aux champs magnétiques statiques, qui réagissent directement avec les matériaux magnétiquement anisotropes (dont les propriétés ont des valeurs différentes lorsqu'elles sont mesurées selon différents axes) et les charges en mouvement.

Le champ magnétique naturel est la somme du champ interne dû à la terre agissant comme un aimant permanent, et d'un champ externe produit dans l'environnement par des facteurs tels que l'activité solaire et les conditions atmosphériques. Le premier est dû aux courants qui circulent dans l'écorce terrestre. Son intensité varie sensiblement avec le lieu; sa valeur moyenne va de 28 A/m environ à l'équateur (ce qui correspond à une densité de flux magnétique d'environ 35 mT dans un milieu non magnétique comme l'air) à 56 A/m au-dessus des pôles géomagnétiques (près de 70 mT dans l'air).

L'intensité des champs magnétiques artificiels dépasse celle des champs naturels de plusieurs ordres de grandeur. Les sources artificielles de champs magnétiques statiques comprennent tous les dispositifs ayant des circuits à courant continu, ce qui englobe de nombreux appareils électroménagers et matériels industriels.

Dans les lignes de transport d'électricité à courant continu, les champs magnétiques statiques sont produits par les charges en mouvement (c'est-à-dire par le courant électrique) dans les conducteurs. Dans le cas d'une ligne aérienne, la densité du flux magnétique au niveau du sol est d'environ 20 mT pour une ligne à ± 500 kV. Dans le cas d'une ligne de transmission souterraine enfouie à 1,4 m de profondeur et portant un courant maximum d'environ 1 kA, la densité maximale du flux magnétique est inférieure à 10 mT au niveau du sol.

Les principales technologies utilisant des champs magnétiques statiques importants sont énumérées dans le tableau 49.10 qui indique les niveaux d'exposition correspondants.

Tableau 49.10 • Principales technologies utilisant des champs magnétiques statiques importants et niveaux d'exposition correspondants

Dispositifs et procédés	Niveaux d'exposition
Technologies énergétiques	
Réacteurs à fusion thermonucléaire	Champs périphériques atteignant 50 mT dans les zones accessibles au personnel Moins de 0,1 mT hors du site du réacteur
Systèmes magnétohydrodynamiques	Environ 10 mT à 50 m; 100 µT seulement à plus de 250 m
Systèmes de stockage d'énergie à aimants supraconducteurs	Champs périphériques atteignant 50 mT en des endroits accessibles aux opérateurs
Génératrices et lignes de transmission à supraconducteurs	Champs périphériques fixés à moins de 100 mT
Installations de recherche	
Chambres à bulles	Durant les changements de pellicule, champ d'environ 0,4-0,5 T au niveau des pieds et d'environ 50 mT au niveau de la tête
Spectromètres à supraconducteurs	Près de 1 T en des endroits accessibles aux opérateurs
Accélérateurs de particules	Le personnel est rarement exposé, l'accès aux zones à rayonnement intense étant interdit, sauf pendant les périodes de maintenance
Installations de séparation isotopique	Expositions de courte durée à des champs atteignant 50 mT D'ordinaire, l'intensité du champ est inférieure à 1 mT
Industrie	
Production de l'aluminium	Intensités atteignant 100 mT en des endroits accessibles aux opérateurs
Procédés électrolytiques	Intensités moyenne et maximale atteignant respectivement 10 et 50 mT
Production d'aimants	2-5 mT aux mains des travailleurs et 300-500 µT au niveau du thorax et de la tête
Médecine	
Imagerie et spectroscopie par résonance magnétique nucléaire	Sans écran, un aimant de 1 T produit environ 0,5 mT à 10 m et un aimant de 2 T le même champ à 13 m

Les effets biologiques

Les résultats d'expériences sur des animaux de laboratoire révèlent que des champs magnétiques statiques allant jusqu'à 2 T n'ont aucun effet notable sur les nombreux facteurs de développement, de comportement ou physiologiques pris en compte. Des études effectuées sur des souris n'ont pas non plus révélé d'effets nocifs sur des fœtus exposés à des champs magnétiques atteignant 1 T.

En théorie, un puissant champ magnétique pourrait freiner la circulation du sang et provoquer une hausse de la tension sanguine. A 5 T, la circulation devrait en principe baisser au maximum de quelques points en pourcentage; aucune baisse cependant n'a été observée en pratique chez des sujets soumis à 1,5 T.

Certaines études effectuées sur des sujets s'occupant de la fabrication d'aimants permanents font état de symptômes subjectifs et de perturbations fonctionnelles: irritabilité, fatigue, maux de tête, perte d'appétit, bradycardie (ralentissement du rythme cardiaque), tachycardie (accélération du rythme cardiaque), hypotension, altérations de l'électroencéphalogramme, démangeaisons, sensations de brûlure et engourdissements. Toutefois, l'absence d'analyse ou d'évaluation statistique de l'incidence des risques physiques ou chimiques dans le milieu de travail réduit sensiblement la validité de ces observations et en rend l'évaluation difficile. Quoique ces études ne soient pas concluantes, on peut en tirer une conclusion, à savoir que s'il y a effectivement des effets à long terme, ils sont très subtils, car aucun effet cumulatif important n'a été signalé. Des personnes exposées à une densité de flux magnétique de 4 T auraient éprouvé les effets sensoriels associés au mouvement dans un champ magnétique: étourdissements,

nausées, goût métallique dans la bouche et sensation de «vertige magnétique» en bougeant les yeux ou la tête. Toutefois, deux enquêtes épidémiologiques portant sur l'état de santé général des travailleurs chroniquement soumis à des champs magnétiques statiques n'ont révélé aucun effet notable sur la santé. Des chercheurs ont examiné les données médicales de 320 travailleurs d'usines où il existait de grands bassins d'électrolyse servant à des procédés de séparation chimique et où l'on pouvait mesurer une induction statique moyenne de 7,6 mT, avec un maximum à 14,6 mT. Par rapport au groupe témoin de 186 travailleurs, le groupe exposé présentait de légères modifications dans la numération des globules blancs, qui restait cependant dans l'intervalle normal. Aucun des changements transitoires observés en ce qui concerne la tension ou d'autres paramètres sanguins n'a été considéré comme indiquant un effet préjudiciable notable associé à l'exposition au champ magnétique. Dans une autre étude, on a évalué la prévalence de la maladie parmi 792 travailleurs exposés à des champs magnétiques statiques en milieu de travail. Le groupe témoin comptait 792 travailleurs non exposés présentant les mêmes caractéristiques d'âge, de race et de situation socio-économique que le groupe principal. L'exposition au champ magnétique allait de 0,5 mT pendant de longues périodes à 2 T pendant plusieurs heures. On n'a pas observé de variation statistiquement significative dans la prévalence de 19 catégories de maladies entre le groupe exposé et le groupe témoin. Il n'y avait pas non plus de différence de prévalence chez un sous-groupe de 198 personnes exposées à 0,3 T ou plus pendant des périodes d'au moins une heure par rapport au reste de la population exposée, ni par rapport aux membres correspondants du groupe témoin.

Dans un rapport traitant des travailleurs de l'industrie de l'aluminium, on a fait état d'un taux élevé de décès par leucémie. Bien que l'étude épidémiologique ait semblé indiquer un risque accru de cancer pour les personnes directement employées à la production d'aluminium — dans laquelle les travailleurs sont exposés à des champs magnétiques statiques puissants —, il n'existe à l'heure actuelle aucune indication claire quant à la nature des facteurs cancérigènes rencontrés dans le milieu de travail. La réduction de l'aluminium produit différents composés (goudron, brais volatilisés, vapeurs de fluorure, oxydes de soufre et gaz carbonique), dont certains sont plus plausibles que les champs magnétiques comme agents cancérigènes.

En France, une étude concernant des travailleurs de l'aluminium a par contre montré que les décès par cancer et la mortalité générale parmi les travailleurs ne présentaient pas de différences significatives par rapport à l'ensemble de la population française de sexe masculin (Mur et coll., 1987).

Une autre étude a également abouti à des résultats négatifs. Elle portait sur des travailleurs d'une usine où des courants continus de 100 kA utilisés pour produire du chlore par électrolyse engendraient des densités de flux magnétique statique comprises entre 4 et 29 mT aux endroits où se tenaient les travailleurs. Sur une période de 25 ans, les taux observés et les taux attendus de cancer parmi les sujets de l'étude ne présentaient pas de différences significatives.

Le mesurage, la prévention et les normes d'exposition

Au cours des trente dernières années, le mesurage des champs magnétiques a considérablement évolué, les progrès techniques réalisés ayant permis de mettre au point de nouvelles méthodes de mesure et d'améliorer les anciennes.

Les deux types de sondes les plus courants sont la bobine blindée et la sonde à effet Hall, qui constituent l'élément de base de la plupart des appareils de mesure du champ magnétique. Récemment, des dispositifs à semi-conducteurs, comme les transistors bipolaires et les transistors à effet de champ, ont été proposés comme capteurs de champ magnétique. Ils offrent certains avantages par rapport aux sondes à effet Hall: plus grande sensibilité, meilleure résolution spatiale et plus grande largeur de bande.

Le principe de la technique de mesurage par résonance magnétique nucléaire (RMN) consiste à déterminer la fréquence de résonance d'un spécimen dans le champ magnétique à mesurer. Il s'agit d'une mesure absolue qui peut être effectuée avec une très grande précision. L'intervalle de mesure va d'environ 10 mT à 10 T, sans limites définies. Dans les mesures de champ basées sur la méthode de la résonance magnétique protonique, on peut facilement obtenir une précision de l'ordre de 10^{-4} à l'aide d'un appareil simple et atteindre une précision de 10^{-6} en prenant beaucoup de précautions et en utilisant un équipement perfectionné. La faiblesse inhérente de la RMN réside dans le fait qu'elle est limitée aux champs à faible gradient et qu'elle ne donne aucune information sur la direction du champ.

Récemment, plusieurs dosimètres individuels permettant de surveiller l'exposition à des champs magnétiques statiques ont été mis au point.

Les mesures de protection applicables à l'utilisation industrielle et scientifique des champs magnétiques peuvent être des dispositions s'appliquant à la conception du matériel, des mesures imposant une distance d'éloignement et des mesures organisationnelles de prévention. Une autre catégorie de mesures de prévention d'ordre général, le port d'un équipement de protection individuelle (par exemple, vêtements et casques spéciaux), ne s'applique pas dans le cas des champs magnétiques. La protection contre les risques liés à l'incompatibilité électromagnétique en ce qui concerne le matériel électronique médical ou d'urgence et les im-

plants chirurgicaux et dentaires devrait encore faire l'objet de recherches. Les forces mécaniques qui s'exercent sur des implants et des objets libres ferromagnétiques (contenant du fer) dans les installations où règnent des champs magnétiques intenses imposent de prendre des précautions pour se prémunir contre les risques pour la sécurité et la santé.

Les techniques destinées à minimiser l'exposition à des champs magnétiques intenses au voisinage des grandes installations industrielles et de recherche relèvent de quatre catégories:

1. distance et temps;
2. blindage magnétique;
3. interférences électromagnétiques et compatibilité;
4. mesures administratives.

La mesure la plus courante pour limiter l'exposition du personnel à proximité des installations mettant en œuvre des aimants importants consiste à mettre en place des zones à accès contrôlé et des signaux de mise en garde. Les mesures organisationnelles de ce genre sont généralement préférables à la solution du blindage magnétique, qui peut être extrêmement coûteuse. Cependant, les objets libres constitués de matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques (faits de tout matériau pouvant s'aimanter) peuvent se transformer en dangereux projectiles s'ils sont soumis à d'intenses gradients de champ magnétique. On ne peut prévenir ce risque qu'en éliminant de la zone les objets métalliques non fixés, y compris ceux portés par le personnel qui s'y trouve. Les objets tels que ciseaux, limes à ongles, tournevis et scalpels devraient être interdits dans le voisinage immédiat.

Les premières recommandations relatives aux champs magnétiques statiques ont été élaborées sous forme de guide non officiel dans l'ex-Union soviétique. Fondées sur des recherches cliniques, ces recommandations proposaient de limiter l'intensité du champ magnétique statique en milieu de travail à 8 kA/m (10 mT).

Aux Etats-Unis, l'ACGIH a publié des valeurs limites d'exposition (TLV) aux champs magnétiques statiques que la plupart des travailleurs pouvaient supporter de façon répétée, jour après jour, sans effets nocifs pour leur santé. Comme dans le cas des champs électriques, ces valeurs devaient servir de guide pour le contrôle de l'exposition aux champs magnétiques statiques, mais ne devaient pas être considérées comme établissant une ligne de démarcation nette entre les niveaux non dangereux et les niveaux dangereux. D'après l'ACGIH, l'exposition professionnelle courante ne devrait pas dépasser 60 mT, comme moyenne sur tout le corps, ou 600 mT aux extrémités, sur une base quotidienne pondérée dans le temps. Une densité de flux de 2 T est à considérer comme valeur plafond. Il ne faut pas perdre de vue non plus que les forces mécaniques exercées sur les outils et les implants médicaux en matières ferromagnétiques constituent un risque pour la sécurité.

En 1994, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)) (1994) a publié des lignes directrices établissant une distinction entre les limites d'exposition des travailleurs et du public aux champs magnétiques statiques. Les limites recommandées sont résumées dans le tableau 49.11. Aux densités de flux magnétique dépassant 3 mT, des précautions sont recommandées contre le danger de projection d'objets métalliques sous l'effet du champ magnétique. Une intensité de 1 mT, par contre, peut perturber le fonctionnement des montres analogiques, des cartes de crédit, des bandes magnétiques et des disques informatiques, mais ne constitue pas un risque pour l'individu.

On peut autoriser l'accès occasionnel du public à des installations spéciales où les densités de flux magnétique dépassent 40 mT, dans des conditions strictement contrôlées, pour autant

Tableau 49.11 • Limites d'exposition aux champs magnétiques statiques recommandées par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP)

Type d'exposition	Densité de flux magnétique
Professionnelle	
Journée de travail complète (moyenne pondérée)	200 mT
Limite maximale	2 T
Bras et jambes	5 T
Grand public	
Exposition continue	40 mT

que la limite d'exposition professionnelle applicable ne soit pas dépassée.

Les limites d'exposition de l'ICNIRP ont été fixées en fonction d'un champ homogène. Dans le cas des champs non homogènes (c'est-à-dire présentant des variations internes), la densité moyenne de flux magnétique doit être mesurée sur une surface de 100 cm².

D'après un document du NRPB, l'imposition de restrictions sur l'exposition aiguë à des champs de moins de 2 T permettrait d'éviter des réactions sensibles telles que les vertiges ou nausées et les effets négatifs sur la santé résultant de l'arythmie cardiaque ou d'un affaiblissement des facultés intellectuelles. Malgré le manque

relatif de résultats concluants provenant d'études de populations exposées quant aux effets possibles à long terme des champs intenses, le NRPB considère qu'il est préférable de limiter à moins de 200 mT (soit un dixième de la limite destinée à prévenir les réactions aiguës) l'exposition à long terme pondérée sur une période de 24 heures. Ces valeurs sont très semblables à celles que recommande l'ICNIRP, mais légèrement supérieures aux TLV de l'ACGIH.

Les personnes ayant des stimulateurs cardiaques, d'autres implants avec circuit électronique ou des implants de matériaux ferromagnétiques pourraient ne pas être correctement protégées par les limites mentionnées ici. La majorité des stimulateurs cardiaques, cependant, ne devraient pas être sensibles à des champs d'une intensité inférieure à 0,5 mT. Les personnes portant certains implants ferromagnétiques ou dispositifs à circuit électronique (autres que des stimulateurs cardiaques) pourraient être affectées par des champs dépassant quelques mT.

Il existe d'autres recommandations sur les limites d'exposition professionnelle. Trois d'entre elles sont en vigueur dans des laboratoires de physique des hautes énergies: Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (Stanford Linear Accelerator Center), Laboratoire national Lawrence Livermore, Californie (Lawrence Livermore National Laboratory, California) et le Laboratoire européen pour la physique des particules de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), Genève, à quoi il faut ajouter les recommandations provisoires appliquées par le ministère américain de l'Énergie (Department of Energy (DOE)).

En Allemagne, d'après une norme DIN, l'exposition professionnelle à des champs magnétiques statiques ne devrait pas dépasser 60 kA/m (environ 75 mT). Si seules les extrémités sont exposées, cette limite est fixée à 600 kA/m, et des intensités de champ atteignant 150 kA/m sont autorisées pour de courtes périodes d'exposition du corps entier (jusqu'à 5 min/h).

Références bibliographiques

Allen, S.G., 1991: «Radiofrequency field measurements and hazard assessment», *Journal of Radiological Protection*, vol. 11, n° 1, pp. 49-62.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1992: *Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices* (Cincinnati).

— 1993: *1993-1994 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices* (Cincinnati).

— 1994: *1994-1995 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices* (Cincinnati).

— 1995: *1995-1996 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices* (Cincinnati).

— 1996: *TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents; Biological Exposure Indices* (Cincinnati).

American National Standards Institute (ANSI), 1993: *Safe Use of Lasers*, ANSI Z136.1 (New York).

— 1996: *Safe Use of Lasers in Health Care Facilities*, ANSI Z136.3 (New York).

— 1999a: *Safety in Welding, Cutting and Allied Processes*, ANSI Z49.1 (revision of ANSI Z49.1-1994) (New York).

— 1999b: *Practice for Occupational and Educational Eye and Face Protection*, ANSI Z87.1 (reaffirmation of ANSI Z87.1-1989) (New York).

Aniolczyk, H., 1981: «Measurements and hygienic evaluation of electromagnetic fields in the environment of diathermy, welding machines and induction heaters» (en polonais), *Medycyna Pracy*, vol. 32, n° 2, pp. 119-128.

Bassett, C.A., Mitchell, S.N. et Gaston, S.R., 1982: «Pulsing electromagnetic field treatment in ununited fractures and failed arthrodeses», *Journal of the American Medical Association*, vol. 247, n° 5, pp. 623-628.

Bassett, C.A., Pawluk, R.J. et Pilla, A.A., 1974: «Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields», *Science*, vol. 184, n° 136, pp. 575-577.

Berger, D., Urbach, F. et Davies, R.E., 1968: «The action spectrum of erythema induced by ultraviolet radiation», dans W. Jadassohn et C.G. Schirren (directeurs de publication): *Preliminary Report XIII. Congressus Internationalis Dermatologiae, München* (New York, Springer Verlag).

Bernhardt, J.H., 1988a: «The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects», *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 27, n° 1, p. 1-27.

— 1988b: «Extremely low frequency (ELF) electric fields», dans M.H. Repacholi (directeur de publication): *Non-Ionizing Radiation: Physical Characteristics, Biological Effects and Health Hazard Assessment* (Melbourne, International Non-Ionizing Radiation Workshop).

Bernhardt, J.H. et Matthes, R., 1992: «ELF and RF electromagnetic sources», dans M.W. Greene (directeur de publication): *Non-Ionizing Radiation Protection* (Vancouver, UBC Press).

Bini, M., Checucci, A., Ignesti, A., Millanta, L., Olmi, R., Rubino, N. et Vanni, R., 1986: «Exposure of workers to intense RF electric fields that leak from plastic sealers», *Journal of Microwave Power, Electromagnetic Energy*, vol. 21, n° 1, pp. 33-40.

Buhr, E., Sutter, E. et The Health Council of the Netherlands, 1989: «Dynamic filters for protective devices», dans G.J. Mueller et D.H. Sliney (directeurs de publication): *Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology* (Bellingham, Washington, SPIE).

Bureau international du Travail (BIT), 1993a: *Protection of Workers from Power Frequency Electric and Magnetic Fields: A Practical Guide*, Occupational Safety and Health Series No. 69 (Genève).

— 1993b: *Visual Display Units — Radiation Protection Guidance*, *ibid.*, No. 70 (Genève).

Bureau of Radiological Health, 1981: *An Evaluation of Radiation Emission from Video Display Terminals* (Rockville, Maryland).

Cleuet, A., Mayer, A., Maillat, H. et Courrier, G., 1980: «Risques liés à l'utilisation industrielle des lasers», dans *Cahiers de notes documentaires — Sécurité et hygiène du travail*, n° 99, note n° 1246-99.80, pp. 207-222 (Paris, Institut national de recherche et de sécurité (INRS)).

Coblentz, W.R., Stair, R. et Hogue, J.M., 1931: «The spectral erythemic relation of the skin to ultraviolet radiation», dans *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Washington, DC, National Academy of Sciences).

Cole, C.A., Forbes, D.F. et Davies, P.D., 1986: «An action spectrum for UV photocarcinogenesis», *Photochemistry and Photobiology*, vol. 43, n° 3, pp. 275-284.

Commission électrotechnique internationale (CEI), 1993: *Sécurité des appareils à laser — Partie 1: Classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur*, CEI 60825-1 (Genève).

- Commission internationale de l'éclairage (CIE), 1987: *International Lighting Vocabulary*, 4^e édition (Vienne).
- Cullen, A.P., Chou, B.R., Hall, M.G. et Jany, S.E., 1984: «Ultraviolet-B damages corneal endothelium», *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, vol. 61, n° 7, pp. 473-478.
- Duchêne, A.R., Lakey, J.R.A. et Repacholi, M.H., 1991: *IRPA Guidelines on Protection Against Non-Ionizing Radiation* (New York, Pergamon Press).
- Elder, J.A., Czerki, P.A., Stuchly, M.A., Mild, K.H. et Sheppard, A.R., 1991: «Les radiofréquences», dans M.J. Suess et D.A. Benwell-Morison (directeurs de publication): *La protection contre les rayonnements non ionisants* (Copenhague, bureau régional de l'Europe de l'OMS).
- Eriksen, P., 1985: «Time resolved optical spectra from MIG welding arc ignition», *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 46, n° 3, pp. 101-104.
- Everett, M.A., Olsen, R.L. et Sayer, R.M., 1965: «Ultraviolet erythema», *Archives of Dermatology*, vol. 92, n° 6, pp. 713-719.
- Fitzpatrick, T.B., Pathak, M.A., Harber, L.C., Seiji, M. et Kukita, A., 1974: *Sunlight and Man, Normal and Abnormal Photobiologic Responses* (Tokyo, University of Tokyo Press).
- Forbes, P.D. et Davies, P.D., 1982: «Factors that influence photocarcinogenesis», chap. 7, dans J.A. Parrish, L. Kripke et W.L. Morison (directeurs de publication): *Photoimmunology* (New York, Plenum).
- Freeman, R.G., Owens, D.W., Knox, J.M. et Hudson, H.T., 1966: «Relative energy requirements for an erythral response of skin to monochromatic wavelengths of ultraviolet present in the solar spectrum», *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 47, n° 6, pp. 586-592.
- Grandolfo, M. et Mild, K.H., 1989: «Worldwide public and occupational radiofrequency and microwave protection», dans G. Franceschetti, O.P. Gandhi et M. Grandolfo (directeurs de publication): *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides* (New York, Plenum).
- Greene, M.W. (directeur de publication), 1992: *Non ionizing radiation: Proceedings of the 2nd International Non-Ionizing Radiation Workshop* (Vancouver, UBC Press).
- Ham, W.T., 1989: «The photopathology and nature of the blue-light and near-UV retinal lesion produced by lasers and other optic sources», dans M.L. Wolbarsht (directeur de publication): *Laser Applications in Medicine and Biology* (New York, Plenum).
- Ham, W.T., Mueller, H.A., Ruffolo, J.J., Guerry, D., III et Guerry, R.K., 1982: «Action spectrum for retinal injury from near ultraviolet radiation in the aphakic monkey», *American Journal of Ophthalmology*, vol. 93, n° 3, pp. 299-306.
- Hausser, K.W., 1928: «Influence of wavelength in radiation biology», *Strahlentherapie*, vol. 28, pp. 25-44.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1990a: *IEEE COMAR Position of RF and Microwaves* (New York).
- 1990b: *IEEE COMAR Position Statement on Health Aspects of Exposure to Electric and Magnetic Fields from RF Sealers and Dielectric Heaters* (New York).
- 1991: *IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields 3 KHz to 300 GHz* (New York).
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 1994: «Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields», *Health Physics*, vol. 66, n° 1, pp. 100-106.
- 1996a: «Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 1000 µm», *ibid.*, vol. 71, n° 5, pp. 804-819.
- 1996b: «Health issues related to the use of handheld radiotelephones and base transmitters», *ibid.*, vol. 70, n° 4, pp.587-593.
- International Radiation Protection Association (IRPA), 1988a: «Alleged radiation risks from visual display units», *ibid.*, vol. 54, n° 2, pp. 231-232.
- 1988b: «Guidelines on limits of exposure to radio-frequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz», *ibid.*, vol. 54, n° 1, pp. 115-123.
- 1989: «Proposed change to the IRPA 1985 guidelines limits of exposure to ultraviolet radiation», *ibid.*, vol. 56, n° 6, pp. 971-972.
- 1990: «Guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields», *ibid.*, vol. 58, n° 1, pp. 113-122.
- Kolmodin-Hedman, B., Mild, K.H., Hagberg, M., Jönsson, E., Andersson, M.C. et Eriksson, A., 1988: «Health problems among operators of plastic welding machines and exposure to radiofrequency electromagnetic fields», *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 60, n° 4, pp. 243-247.
- Krause, N., 1986: «Exposure of people to static and time variable magnetic fields in technology, medicine, research and public life: Dosimetric aspects», dans J.H. Bernhardt (directeur de publication): *Biological Effects of Static and ELF-magnetic Fields* (Munich, MMV Medizin Verlag).
- Lövsund, P. et Mild, K.H., 1978: *Low Frequency Electromagnetic Field Near Some Induction Heaters* (Stockholm, Stockholm Board of Occupational Health and Safety).
- Lövsund, P., Oberg, P.A. et Nilsson, S.E.G., 1982: «ELF magnetic fields in electrosteel and welding industries», *Radio-Science*, vol. 17, n°5S, pp. 355-385.
- Luckiesh, M.L., Holladay, L. et Taylor, A.H., 1930: «Reaction of untanned human skin to ultraviolet radiation», *Journal of the Optical Society of America*, vol. 20, pp. 423-432.
- McKinlay, A.F., Andersen, J.B., Bernhardt, J.H., Grandolfo, M., Hossmann, K.A., van Leeuwen, F.E., Mild, K.H., Swerdlow, A.J., Verschaeve L. et Veyret, B.: «Proposal for a research programme by a European Commission Expert Group. Possible health effects related to the use of radiotelephones», rapport non publié.
- McKinlay, A.F. et Diffey, B.L., 1987: «A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin», dans W.R. Passchler et B.F.M. Bosnjakovic (directeurs de publication): *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (Amsterdam, Elsevier).
- Mild, K.H., 1980: «Occupational exposure to radio-frequency electromagnetic fields», *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, pp. 12-17.
- Mitbreit, I.M. et Manyachin, V.D., 1984: *Influence of magnetic fields on the repair of bone* (Moscou, Nauka).
- Mur, J.M., Moulin, J.J., Meyer-Bisch, C., Massin, N., Coulon, J.P. et Loulergue, J., 1987: «Mortality of aluminium reduction plant workers in France», *International Journal of Epidemiology*, vol. 16, n° 2, pp. 257-264.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 1981: *Radiofrequency Electromagnetic Fields. Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction, and Measurements* (Bethesda, Maryland).
- 1986: *Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields*, NCRP Report No. 86 (Bethesda, Maryland).
- National Radiological Protection Board (NRPB), 1992: *Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer: Report of an Advisory Group on Non-Ionizing Radiation* (Chilton, Didcot, Royaume-Uni).
- 1993: *Statement by the NRPB. Restrictions on Human Exposure to Static and Time-Varying Electromagnetic Fields and Radiations* (Chilton, Didcot, Royaume-Uni).
- National Research Council (NRC), 1996: *Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields* (Washington, DC, NAS Press).
- Olsen, E.G. Ringvold, A., 1982: «Human cornea endothelium and ultraviolet radiation», *Acta Ophthalmologica*, vol. 60, n° 1, pp. 54-56.
- Organisation mondiale de la santé (OMS), 1981: *Fréquences radioélectriques et hyperfréquences, Critères d'hygiène de l'environnement*, n° 16 (Genève).
- 1982: *Lasers and Optical Radiation*, Environmental Health Criteria No. 23 (Genève).
- 1984: *Extremely Low Frequency (ELF) fields*, *ibid.*, No. 35 (Genève).
- 1987: *Magnetic Fields*, *ibid.*, No. 69 (Genève).
- 1991: *La protection contre les rayonnements non ionisants*, 2^e édition (Copenhague, Bureau régional de l'Europe).
- 1993: *Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz)*, Environmental Health Criteria No. 137 (Genève).
- 1994: *Ultraviolet Radiation*, *ibid.*, No. 160 (Genève).
- Parrish, J.A., Jaenicke, K.F. et Anderson, R.R., 1982: «Erythema and melanogenesis: Action spectra of normal human skin», *Photochemistry and Photobiology*, vol. 36, n° 2, pp. 187-191.
- Passchier, W.R., Bosnjakovic, B.F.M., 1987: *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (Amsterdam, Elsevier).
- Pitts, D.G., 1974: «The human ultraviolet action spectrum», *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, vol. 51, n° 12, pp. 946-960.
- Pitts, D.G., Cullen, A.P. et Hacker, P.D., 1977a: «Ocular effects of ultraviolet radiation from 295 to 365 nm», *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, vol. 16, n° 10, pp. 932-939.
- 1977b: *Ultraviolet Effects from 295 to 400 nm in the Rabbit Eye* (Cincinnati, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)).
- Pitts, D.G. et Tredici, T.J., 1971: «The effects of ultraviolet on the eye», *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 32, n° 4, pp. 235-246.
- Polk, C. et Postow, E., 1986: *CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields* (Boca Raton, Floride, CRC Press).
- Repacholi, M.H., 1985: «Video display terminals — Should operators be concerned?», *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine* vol. 8, n° 2, pp. 51-61.
- 1990: «Cancer from exposure to 50760 Hz electric and magnetic fields: A major scientific debate», *ibid.*, vol. 13, n° 1, pp. 4-17.
- Repacholi, M.H., Basten, A., Gebiski, V., Noonan, D., Finnie J. et Harris, A.W., 1997: «Lymphomas in E mu-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields», *Radiation Research*, vol. 147, n° 5, pp. 631-640.
- Riley, M.V., Susan, S., Peters, M.I. et Schwartz, C.A., 1987: «The effects of UVB irradiation on the corneal endothelium», *Current Eye Research*, vol. 6, n° 8, pp. 1021-1033.
- Ringvold, A., 1980a: «Cornea and ultraviolet radiation», *Acta Ophthalmologica*, vol. 58, n° 1, pp. 63-68.
- 1980b: «Aqueous humour and ultraviolet radiation», *ibid.*, pp. 69-82.
- 1983: «Damage of the cornea epithelium caused by ultraviolet radiation. A scanning electron microscopic study in rabbit», *ibid.*, vol. 61, n° 5, pp. 898-907.
- Ringvold, A. et Davanger, M., 1985: «Changes in the rabbit corneal stroma caused by UV-radiation», *ibid.*, vol. 63, n° 5, pp. 601-606.
- Ringvold, A., Davanger, M. et Olsen, E.G., 1982: «Changes of the cornea endothelium after ultraviolet radiation», *ibid.*, vol. 60, n° 1, pp. 41-53.
- Roberts, N.J., Jr. et Michaelson, S.M., 1985: «Epidemiological studies of human exposures to radiofrequency radiation: A critical review», *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 56, n° 3, pp. 169-178.

- Roy, C.R., Joyner, K.H., Gies, H.P. et Bangay, M.J., 1984: «Measurement of electromagnetic radiation emitted from visual display terminals (VDTs)», *Radiation Protection of Australia*, vol. 2, n° 1, pp. 26-30.
- Scotto, J., Fears, T.R. et Gori, G.B., 1980: *Measurements of Ultraviolet Radiations in the United States and Comparisons With Skin Cancer Data* (Washington, DC, US Government Printing Office).
- Sienkiewicz, Z.J., Saunder, R.D. et Kowalczyk, C.I., 1991: *Biological Effects of Exposure to Non-Ionizing Electromagnetic Fields and Radiation. II. Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields* (Chilton, Didcot, Royaume-Uni, National Radiation Protection Board (NRPB)).
- Silverman, C., 1990: «Epidemiological studies of cancer and electromagnetic fields», chap. 17, dans O.P. Gandhi (directeur de publication): *Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy* (Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall).
- Sloney, D.H., 1972: «The merits of an envelope action spectrum for ultraviolet radiation exposure criteria», *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 33, n° 10, pp. 644-653.
- 1986: Physical factors in cataractogenesis: Ambient ultraviolet radiation and temperature», *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, vol. 27, n° 5, pp. 781-790.
- 1987: «Estimating the solar ultraviolet radiation exposure to an intraocular lens implant», *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, vol. 13, n° 5, pp. 296-301.
- 1992: «A safety manager's guide to the new welding filters», *Welding Journal*, vol. 71, n° 9, pp. 45-47.
- Sloney, D.H. et Wolbarsht, M.L., 1980: *Safety With Lasers and Other Optical Sources* (New York, Plenum).
- Smith, K.C., 1988: *The Science of Photobiology* (New York, Plenum).
- Stenson, S., 1982: «Ocular findings in xeroderma pigmentosum: Report of two cases», *Annals of Ophthalmology*, vol. 14, n° 6, pp. 580-585.
- Sterenborg, H.J.C.M. et van der Leun, J.C., 1987: «Action spectra for tumorigenesis by ultraviolet radiation», dans *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, op. cit.
- Stuchly, M.A., 1986: «Human exposure to static and time-varying magnetic fields», *Health Physics*, vol. 51, n° 2, pp. 215-225.
- Stuchly, M.A. et Lécuier, D.W., 1985: «Induction heating and operator exposure to electromagnetic fields», *ibid.*, vol. 49, n° 5, pp. 693-700.
- 1989: «Exposure to electromagnetic fields in arc welding», *ibid.*, vol. 56, n° 3, pp. 297-302.
- Szmigielski, S., Bielec, M., Lipski, S. et Sokolska, G., 1988: «Immunologic and cancer related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields», dans A.A. Mario (directeur de publication): *Modern Bioelectricity* (New York, Marcel Dekker).
- Taylor, H.R., West, S.K., Rosenthal, F.S., Muñoz, B., Newland, H.S., Abbey, H. et Emmett, E.A., 1988: «Effect of ultraviolet radiation on cataract formation», *New England Journal of Medicine*, vol. 319, n° 22, pp. 1429-1433.
- Tell, R.A., 1983: «Instrumentation for measurement of electromagnetic fields: Equipment, calibrations, and selected applications», dans M. Grandolfo, Michaelson, S.M. et Rindi, A. (directeurs de publication): *Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation, Radiofrequency and Microwave Energies* (New York, Plenum).
- Urbach, F., 1969: *The Biologic Effects of Ultraviolet Radiation* (New York, Pergamon Press).
- Zaffanella, L.E. et Deno, D.W., 1978: *Electrostatic and Electromagnetic Effects of Ultra-High-Voltage Transmission Lines* (Palo Alto, Californie, Electric Power Research Institute).
- Zuclich, J.A. et Connolly, J.S., 1976: «Ocular damage induced by near-ultraviolet laser radiation», *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, vol. 15, n° 9, pp. 760-764.

Références complémentaires

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1990: *A Guide for Control of Laser Hazards* (Cincinnati).

— 1991: *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, 1990-1991* (Cincinnati).

— 1994: *Annual Report of ACGIH Physical Agents Threshold Limit Values Committee* (Cincinnati).

Avdeev, P.S., Berezin, Y.D., Gudakovskii, Y.P., Muratov, V.R., Murzin, A.G. et Fromzel, V.A., 1978: «Experimental determination of maximum permissible exposure to laser radiation of 1.54 μ wavelength», *Soviet Journal of Quantum Electronics*, vol. 8, pp. 137-141.

Bargeron, C.B., Deters, O.J., Farrell, R.A. et McCally, R.L., 1989: «Epithelial damage in rabbit corneas exposed to CO₂ laser radiation», *Health Physics*, vol. 56, n° 1, pp.85-95.

British Standards Organisation (BSO), 1984: *Radiation Safety of Laser Products and Systems* (Londres).

Deutsche Institut für Normung (DIN), 1984: *Radiation Safety of Laser Products* (Berlin).

Deutsche Kommission für Elektrotechnik (DKE), 1996: *Electromagnetic Field Limit* (Berlin).

Fankhauser, F., 1977: «Physical and biological effects of laser radiation», *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, vol. 170, n° 2, p. 219.

Gabel, V.P. et Birngruber, R., 1981: «A comparative study of threshold lesions in the retinae of human volunteers and rabbits», *Health Physics*, vol. 40, n° 2, pp. 238-240.

Geeraets, W.J. et Berry, E.R., 1968: «Ocular spectral characteristics as related to hazards from lasers and other light sources», *American Journal of Ophthalmology*, vol. 66, n° 1, pp. 15-20.

Grandolfo, M., Michaelson, S.M. et Rindi, A., 1985: *Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields* (New York, Plenum).

Grossweiner, L.I., 1984: «Photochemistry of proteins: A review», *Current Eye Research*, vol. 3, n° 1, pp. 137-144.

Harding, J.J. et Dille, K.J., 1976: «Structural proteins of the mammalian lens: A review with emphasis on

changes in development, aging and cataract», *Experimental Eye Research*, vol. 22, n° 1, pp. 1-73.

International Radiation Protection Association (IRPA), 1985: «Guidelines for limits of human exposure to laser radiation», *Health Physics*, vol. 48, n° 2, pp. 341-359.

— 1988: «Recommendations for minor updates to the IRPA 1985 guidelines on limits of exposure to laser radiation», *ibid.*, vol. 54, n° 5, pp. 573-574.

International Radiation Protection Association (IRPA) et International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 1988: «Alleged radiation risks from visual display units — A Statement», *Health Physics*, vol. 54, n° 2, pp. 231-232.

Ministère de la Santé de l'URSS, 1982: *Sanitary Norms for Designing and Operating Lasers (en russe)* (Moscou).

Parrish, J.A., Anderson, R.R., Urbach, F. et Pitts, D.G., 1978: *UVA, Biological Effects of Ultraviolet Radiation With Emphasis on Human Responses to Longwave Radiation* (New York, Plenum).

Pitts, D.G. et Cullen, A.P., 1981: «Determination of infrared radiation levels for acute ocular cataractogenesis», *Albrecht von Graefes Archiv für Klinische und Experimentelle Ophthalmologie*, vol. 217, n° 4, pp. 285-297.

Sloney, D.H., 1987: «Unintentional exposure to ultraviolet radiation: Risk reduction and exposure limits», dans W.R. Passchler et B.F.M. Bosnjakovic (directeurs de publication): *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (Amsterdam, Elsevier).

Sloney, D.H. et Trokel, S., 1992: *Medical Lasers and Their Safe Use* (New York, Springer Verlag).

Stuck, B.E., Lund, D.J. et Beatrice, E.S., 1981: «Ocular effects of holmium (2.06 micrometers) and erbium (1.54 micrometer) laser radiation», *Health Physics*, vol. 40, n° 6, pp. 835-846.

Suess, M.J. et Benwell-Morison, D.A., 1991: *La protection contre les rayonnements ionisants* (Copenhague, Bureau régional de l'Europe de l'OMS).

The Health Council of the Netherlands, 1979: *Recommendations Concerning Acceptable Levels of Electromagnetic Radiation in the Wavelength Range from 100 nm and Other Optical Radiation Sources* (New York, Plenum).

Tung, W.H., Chylack, L.T.J. et Andley, U.P., 1988: «Lens hexokinase deactivation by near-UV irradiation», *Current Eye Research*, vol. 7, n° 3, pp. 257-263.

Urbach, F. et Gange, R.W., 1986: *The Biological Effects of UVA Radiation* (Westport, Connecticut, Praeger).

Willis, I., Kligman, A. et Epstein, J., 1972: «Effects of long ultraviolet rays on human skin: Photoprotective or photoaugmentative?», *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 59, n° 6, pp. 416-420.

Yanuzzi, L.A., Fisher, L.Y., Krueger, A. et Slakter, J., 1987: «Solar retinopathy: A photobiological and geophysical analysis», *Transactions of the American Ophthalmological Society*, vol. 85, pp. 120-158.

Zuclich, J.A., 1989: «Ultraviolet-induced photochemical damage in ocular tissues», *Health Physics*, vol. 56, n° 5, pp. 671-682.