Evolution des limites d'exposition recommandées pour les rayonnements électromagnétiques de 100 kHz à 300 GHz

A. DUCHÊNE*

RÉSUMÉ

Après un rappel succinct des premières normes de protection contre les micro-ondes établies aux Etats-Unis et en Union soviétique, l'auteur expose l'évolution actuelle des idées en ce domaine. Les principes généraux sur lesquels sont fondées les limites d'exposition récemment recommandées par le Comité international sur les rayonnements non-ionisants de l'Association internationale de radioprotection (IRPA/INIRC) et par l'American national standards institute (ANSI), pour un domaine de radiofréquences beaucoup plus large, sont passés en revue. Les différences entre les limites proposées par les deux organismes sont ensuite analysées.

ABSTRACT

After a short review of the first standards of protection against microwaves set up respectively in the United States and in the Soviet Union, the new trends in the field of radiofrequency radiation protection are stated. A short review is made of the basic considerations underlying the exposure limits recently recommended by the International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (IRPA/INIRC) and by the American National Standards Institute (ANSI) for a more extended frequency range. Finally, the differences existing between the limit values adopted by the two organizations are set forth.

Les rayonnements électromagnétiques de fréquence comprise entre 100 kHz et 300 GHz font partie du domaine des ondes radioélectriques, ou radiofréquences, qui, selon la classification de l'Union internationale des télécommunications, s'étend de 3 kHz à 3000 GHz. Le terme de radiofréquences recouvre donc également les rayonnements de fréquence comprise entre 300 MHz et 300 GHz qui sont généralement plus connus sous le nom de micro-ondes.

Les préoccupations concernant les effets éventuels des ondes radioélectriques sur la santé de l'homme ont commencé à apparaître pendant et immédiatement après la seconde guerre mondiale en liaison plus par-

* Commissariat à l'énergie atomique, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Département de protection sanitaire, BP 6, 92260 Fontenay-aux-Roses (France).

ticulièrement avec le développement des applications des ondes ultra-courtes ou hyperfréquences dans les grandes installations radar. Il est intéressant de noter que l'un des premiers dispositifs fonctionnant sur le principe du radar fut installé en 1934 sur le paquebot français *Normandie* pour détecter les icebergs. Pendant longtemps, le radar constitua le seul souci et dans la plupart des pays les premières recherches sur les effets biologiques des micro-ondes furent effectuées ou financées par les militaires et les premières normes de sécurité formulées par la marine ou par l'armée de l'air. Cependant, la croissance extrêmement rapide, au cours des quinze dernières années, des applications des hautes fréquences et des micro-ondes dans l'industrie, la recherche, la médecine, les télécommunications et même dans les produits à usage domestique, en particulier les fours à micro-ondes, a entraîné un nouvel intérêt pour les effets biologiques produits par ces rayonnements et ravivé une certaine inquiétude au sujet de leur influence éventuelle sur la santé.

C'est pourquoi, dans un nombre de plus en plus important de pays, les organismes compétents publics ou privés sont amenés à élaborer une réglementation ou des recommandations visant à protéger les travailleurs et le public contre d'éventuels effets nocifs de ces rayonnements. Mais du fait de divergences aussi bien sur les objectifs mêmes de la protection que sur l'interprétation de certaines données expérimentales ou observations humaines, les valeurs adoptées comme limites d'exposition jusqu'à ces dernières années différaient souvent de manière importante d'un pays à l'autre.

LES ANCIENNES NORMES DE SÉCURITÉ

La première norme de protection contre les micro-ondes fut introduite aux Etats-Unis en 1953. Les bases scientifiques en furent établies par H.P. Schwan [4] qui proposa la limite de 10 mW/cm^2 utilisée jusqu'à ces tout derniers temps aux Etats-Unis et dans certains pays occidentaux pour l'exposition professionnelle continue aux micro-ondes. Cette limite était fondée essentiellement sur les données dont on disposait alors quant à la chaleur produite par le métabolisme basal ($5 \text{ à } 10 \text{ mW/cm}^2$) et à la charge thermique additionnelle que l'organisme humain pouvait tolérer. Elle fut ensuite confirmée par l'American national standards institute (ANSI) à deux reprises, en 1966 et 1974, compte tenu des connaissances acquises sur les effets thermiques pathologiques susceptibles d'être produits par les micro-ondes.

Ce sont, par contre, des considérations biologiques de caractère tout à fait différent qui ont servi à la fixation des premières normes de sécurité en Union soviétique en 1959. Celles-ci furent établies d'une part, sur la base de certaines modifications fonctionnelles observées chez l'animal pour des expositions de 1 h à 1 mW/cm^2 , d'autre part, à la suite d'observations faites sur des personnes professionnellement exposées aux micro-ondes chez qui on avait signalé des perturbations du fonctionnement des systèmes nerveux et cardiovasculaire pour des densités de puissance inférieures à $0,1 \text{ mW/cm}^2$. Aux seuils ainsi déterminés, on appliqua des facteurs de sécurité importants, ce qui aboutit à

la fixation de limites extrêmement prudentes telles que la valeur de $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour une exposition professionnelle de 8 à 10 heures par jour. Toutefois, les incertitudes liées aux mesures de rayonnement faites à cette époque et le manque de données sur les conditions d'exposition qui existaient dans ces études, font qu'il est impossible d'en tirer des conclusions sûres.

Par la suite, de nombreux pays adoptèrent pour l'exposition professionnelle continue des limites intermédiaires entre ces deux valeurs et, compte tenu des limites fixées pour les expositions de courte durée ou en fonction des caractéristiques d'émission du rayonnement, on se trouve placé vers la fin des années 1970 devant un éventail assez large de limites utilisées à travers le monde.

De nouvelles données sur les effets biologiques des radiofréquences et une meilleure connaissance des processus d'interaction biophysiques ont amené très récemment certains organismes et, en premier lieu, le Comité international sur les rayonnements non-ionisants de l'Association internationale de radioprotection (IRPA/INIRC) et l'American national standards institute (ANSI) à proposer un nouveau système de limitation des expositions aux rayonnements électromagnétiques de fréquence comprise entre 100 kHz et 300 GHz [1, 2].

Avant d'examiner les limites elles-mêmes, il convient de rappeler brièvement les considérations générales sur lesquelles elles sont fondées.

FACTEURS PHYSIQUES ET BIOLOGIQUES

La nature et l'importance physiologique des effets produits par les radiofréquences dépendent d'un grand nombre de facteurs dont les principaux peuvent être résumés comme suit :

- *facteurs physiques liés au rayonnement incident*, tels que l'intensité du champ électrique et du champ magnétique, la fréquence du rayonnement, le mode d'émission (continu ou pulsé) et, le cas échéant, la durée et la puissance de crête ou moyenne des impulsions...;
- *facteurs liés aux modalités d'exposition*, durée et répartition de l'exposition dans le temps (exposition continue ou intermittente), orientation du sujet exposé dans le champ de rayonnement, distance par rapport à la source, distribution spatiale de l'exposition (exposition totale ou partielle de l'organisme) ;
- *facteurs liés aux caractéristiques biologiques*, en particulier la nature, la constitution cellulaire et même moléculaire des tissus exposés, leurs propriétés électriques, certaines caractéristiques physiologiques comme l'irrigation sanguine lorsqu'il s'agit d'effets thermiques, les dimensions de l'organe ou du sujet, l'importance fonctionnelle des tissus ou organes atteints, etc.

Bien que le rôle précis joué par ces différents paramètres, leur interférence et plus particulièrement leur relation quantitative avec l'effet biologique produit ne soient pas encore complètement élucidés, l'amélioration des modèles théoriques et expérimentaux utilisés pour reproduire le corps humain et l'emploi de moyens de calcul modernes ont

permis de mieux connaître les variations et la distribution de l'énergie absorbée dans l'organisme humain en fonction des caractéristiques du rayonnement, des conditions de l'exposition et des caractéristiques du sujet exposé.

Parmi les divers facteurs tant physiques que biologiques qui influent sur l'absorption de l'énergie dans l'organisme, la fréquence du rayonnement qui déterminera notamment sa profondeur de pénétration dans les tissus et l'apparition, dans certains cas, de phénomènes spéciaux comme la résonance, joue un rôle particulièrement important. Du point de vue de l'interaction du rayonnement et de l'organisme humain, le domaine des radiofréquences peut être grossièrement divisé en quatre parties :

1. Le domaine des fréquences inférieures à 30 MHz, dans lequel il n'y a pas de résonances ; l'absorption d'énergie est superficielle au niveau du tronc, mais non au niveau du cou ou des chevilles, et elle décroît rapidement avec la fréquence.
2. Le domaine des résonances, compris entre 30 et 300 MHz pour les résonances dans l'organisme entier et allant jusqu'à 400 MHz si l'on considère les résonances au niveau de la tête.
C'est la région où l'absorption d'énergie est amplifiée par les résonances et peut être nettement plus élevée que ne le laisserait supposer l'intensité du rayonnement incident. La fréquence à laquelle l'absorption d'énergie est maximale dépend de la taille du sujet (70 MHz pour une personne de 1,75 m ; > 100 MHz pour les enfants). Les limites devront donc être fixées à un niveau assez bas pour tenir compte des cas les plus défavorables.
3. La région des points chauds, allant d'environ 400 MHz à 2000 MHz. Le pourcentage d'énergie absorbée décroît en $1/f$ lorsque la fréquence croît, mais on observe des points chauds, c'est-à-dire des régions localisées où l'absorption d'énergie est élevée. La dimension de ces points chauds est de plusieurs centimètres à 915 MHz et diminue lorsque la fréquence croît.
4. La région d'absorption superficielle au-delà d'environ 2000 MHz, où l'élévation de température est essentiellement localisée à la surface avec un chauffage superficiel un peu analogue à celui produit par le rayonnement infra-rouge à des fréquences nettement supérieures.

Ces variations de l'énergie absorbée en fonction de la fréquence constituent un facteur important pour la fixation des limites d'exposition.

GRANDEURS ET UNITÉS

Sur le plan de la protection contre les radiofréquences, l'introduction récente d'une nouvelle grandeur permettant d'exprimer quantitativement l'échange d'énergie entre rayonnement et matière vivante constitue, sans aucun doute, une étape importante. Cette grandeur, définie en anglais comme le *Specific absorption rate* (SAR), rend compte de l'énergie absorbée par unité de temps et de masse et s'exprime en watts par kilogramme. Elle est généralement connue en France sous le nom de *taux*

d'absorption spécifique (TAS). Toutefois, selon la Commission de terminologie des télécommunications*, il apparaît que cette appellation est impropre, le terme "taux" désignant un pourcentage ou une fraction décimale et ne correspondant pas à l'anglais "rate" lorsque celui-ci implique une notion de temps. Il nous paraît donc préférable de désigner cette grandeur par sa dénomination plus exacte de *débit d'absorption spécifique* (DAS).

Le débit d'absorption spécifique peut être calculé et, dans certains cas, mesuré. Dans la pratique, cependant, ces mesures sont généralement difficiles à effectuer et la protection est assurée en limitant les paramètres caractéristiques du champ de rayonnement, plus aisément accessibles à la mesure, que l'on détermine habituellement en un lieu de l'espace sans récepteur où le sujet peut être exposé. Les grandeurs et unités utilisées sont les suivantes :

- *La puissance traversant l'unité de surface*, généralement appelée densité de puissance et, plus rarement, puissance surfacique ou débit de fluence énergétique. Selon le système international d'unités, elle s'exprime en watts par mètre carré, mais on utilise aussi fréquemment le milliwatt par centimètre carré et même le microwatt par centimètre carré.
- *L'intensité du champ électrique (E)* ou celle du *champ magnétique (H)*, qui s'expriment respectivement en volts par mètre ou en ampères par mètre.

Lorsque la distance à la source est supérieure à environ une longueur d'onde, les deux champs sont en phase et la densité de puissance est égale au produit de E et de H. A une distance suffisamment éloignée de la source pour que celle-ci puisse être considérée comme ponctuelle (conditions de champ lointain), le rapport E/H est égal à 377 ohms (ou 120π) et la densité de puissance peut alors être obtenue par la relation $E^2/377$ ou $H^2 \times 377$. Compte tenu de ces relations, la détermination ou la limitation de l'une quelconque de ces trois grandeurs entraînera automatiquement celle des deux autres.

En champ proche, cette relation n'est plus valable et il faudra déterminer séparément l'intensité du champ électrique et celle du champ magnétique.

CONSIDÉRATIONS BIOLOGIQUES

Les effets biologiques produits par les rayonnements électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences font l'objet d'un grand nombre de publications. La littérature scientifique sur ce sujet a été évaluée et analysée indépendamment par l'IRPA/INIRC [3] et par l'ANSI [1].

Si, dans le cas de l'exposition professionnelle, les recommandations faites par les deux organismes à la suite de ces études ont le même ob-

* Arrêté du 27 avril 1982 portant enrichissement du vocabulaire des télécommunications, annexe, paragraphe 1.16. Journal officiel, numéro complémentaire n° 45 du 24 juin 1982.

jectif, qui est de limiter le débit d'absorption spécifique à 0,4 W/kg en moyenne sur l'organisme entier, quelques différences d'opinion sur les pratiques de sécurité à adopter les ont amenés à recommander des limites pratiques légèrement différentes.

En conclusion de son analyse, l'ANSI estima que les nouvelles connaissances acquises justifiaient une révision de ses recommandations antérieures, malgré l'existence de lacunes reconnues dans les données scientifiques de base. Les recommandations publiées par l'ANSI en 1982 ont été établies sur la base des rapports alors disponibles qui présentaient des observations positives, reproductibles et des informations dosimétriques suffisantes. Les effets biologiques observés ont ensuite été évalués quant à leurs conséquences possibles pour la santé de l'homme. L'indicateur considéré comme étant le plus sensible d'un effet nocif a été l'observation de modifications du comportement chez les animaux (convulsions, baisse de l'endurance ou de l'activité, réactions d'aversion vis-à-vis du champ de rayonnement). Par contre, il n'a pas été tenu compte des effets biologiques pour lesquels aucune influence sur la santé n'a pu être mise en évidence, comme par exemple l'efflux d'ions calcium à partir des tissus cérébraux observé sous l'effet de champs modulés à certaines fréquences. Sur la base de ces données, l'ANSI tira la conclusion qu'aucun effet nocif n'était produit chez les animaux au cours d'une exposition de durée inférieure à 1 heure si le débit d'absorption spécifique évalué en moyenne sur l'organisme entier ne dépassait pas 4 W/kg. A cette valeur, il fut décidé d'appliquer un facteur de sécurité de 10 pour tenir compte de certaines incertitudes et de ce qu'un effet transitoire dû à une exposition de courte durée pouvait correspondre à un dommage à la suite d'une exposition prolongée.

La limite fondamentale ainsi déterminée appelle, cependant, les remarques suivantes :

- Elle ne tient pas compte d'une éventuelle variation de l'efficacité biologique relative avec la fréquence, la plupart des données expérimentales ayant été obtenues pour des fréquences comprises entre 900 MHz et 10 000 MHz, souvent à 2 450 MHz.
- Elle a été déterminée essentiellement par expérimentation sur l'animal, car on dispose de très peu d'observations faites sur l'homme, et l'extrapolation de l'animal à l'homme comporte toujours des incertitudes.
- Elle représente une moyenne sur l'organisme entier alors que la déposition de l'énergie dans l'organisme est très hétérogène et peut conduire à des gradients de température localisés élevés dont nos connaissances ne permettent pas encore de prévoir les effets. C'est pourquoi, d'ailleurs, les deux organismes ont également prévu une limite pour le DAS évalué en moyenne pour chaque gramme de tissu.

LES RECOMMANDATIONS DE L'IRPA/INIRC

Les limites présentées ci-dessous ont été approuvées par le Conseil exécutif de l'IRPA en juillet 1983 [2]. Elles tiennent compte des connaissances acquises à cette date, ainsi que des commentaires reçus après

qu'un premier projet eut été diffusé en 1982 à toutes les sociétés affiliées à l'IRPA. Il faut noter que ce sont les premières limites recommandées en ce domaine par un organisme international.

a) Limites d'exposition pour les travailleurs

Aux fréquences égales ou supérieures à 10 MHz, le DAS résultant d'une exposition professionnelle ne doit pas dépasser 0,4 W/kg lorsqu'il est évalué en moyenne sur l'organisme entier et 4 W/kg en moyenne sur tout gramme de tissu. De plus, cette limite doit être respectée en moyenne sur toute période de 6 minutes. Le DAS ne pouvant être déterminé que par calcul ou par calorimétrie, on en a déduit les limites pratiques qu'il convient d'appliquer à l'intensité du champ ou à la densité de puissance pour que l'énergie déposée en moyenne dans l'organisme entier ne dépasse pas 0,4 W/kg. Compte tenu des variations de l'énergie absorbée avec la fréquence, ces limites pratiques varieront approximativement selon les quatre domaines de fréquence déterminés ci-dessus.

Aux fréquences inférieures à 10 MHz, où l'énergie absorbée est très faible et décroît rapidement avec la fréquence, les limites sont fondées sur des considérations différentes et l'INIRC a tenu compte, en particulier, des brûlures et chocs électriques que l'individu peut ressentir par contact avec des objets suffisamment grands non mis à la terre lorsque le champ est supérieur à 200 V/m. D'autre part, étant donné les longueurs d'onde correspondant à ces fréquences, on se trouve alors dans des conditions de champ proche, et les intensités effectives du champ électrique et du champ magnétique devront être déterminées séparément et respecter les limites indiquées.

Les limites pratiques recommandées par l'INIRC pour l'exposition professionnelle sont données dans le tableau I.

TABLEAU I

Limites d'exposition professionnelle

Domaine de fréquence MHz	Champ électrique V/m	Champ magnétique A/m	Densité de puissance (ondes planes)	
			W/m ²	mW/cm ²
0,1 - 1	194	0,51	100*	10*
1 - 10	$194/f^{1/2}$	$0,51/f^{1/2}$	$100/f^*$	$10/f^*$
10 - 400	61	0,16	10	1
400 - 2 000	$3 f^{1/2}$	$0,008 f^{1/2}$	$f/40$	$f/400$
2 000 - 300 000	137	0,36	50	5

f = fréquence en MHz.

* = valeurs données à titre indicatif seulement.

Ces limites s'appliquent à l'exposition totale ou partielle de l'organisme à partir d'une ou de plusieurs sources. Elles doivent être respectées en moyenne sur toute période de 6 minutes pendant la journée de travail. Toutefois, aux fréquences inférieures ou égales à 10 MHz, les limites peuvent être éventuellement dépassées à condition que toutes les précautions nécessaires soient prises pour éviter brûlures ou chocs électriques et que l'intensité du champ ne dépasse pas 615 V/m ou 1,6 A/m. Aux fréquences supérieures à 10 MHz, la dérogation à ces limites sera subordonnée à la démonstration que le DAS reste inférieur à 0,4 W/kg en moyenne sur l'organisme entier et à 4 W/kg en moyenne sur tout gramme de tissu.

Bien que l'on dispose de très peu d'informations sur les effets associés à des impulsions courtes de puissance élevée, il est, de plus, recommandé que les valeurs de crête instantanées des champs pulsés ne dépassent pas 100 fois les limites indiquées.

b) Limites d'exposition pour les personnes du public

Pour l'exposition du public, un facteur de sécurité additionnel égal à 5 a été incorporé aux limites fixées ci-dessus pour les travailleurs, afin de tenir compte de la présence possible d'individus plus sensibles aux rayonnements et de ce que le public peut être exposé 24 heures par jour pendant des périodes prolongées.

c) Exclusion

Une dérogation au respect de ces limites a, cependant, été prévue pour des appareils de faible puissance, tels que les émetteurs-récepteurs portatifs ou mobiles, à condition que leur puissance de sortie soit au plus égale à 7 watts. Ces appareils, en effet, n'engendrent que des champs extrêmement localisés, mais dont la valeur peut parfois dépasser les limites.

Sauf dans le domaine des fréquences inférieures à 30 MHz et à de légères différences près, les limites d'exposition recommandées par l'INIRC sont très proches des normes de protection adoptées par l'ANSI en juillet 1982.

LES NORMES DE PROTECTION DE L'ANSI

Les normes de protection recommandées par l'ANSI [1] pour l'exposition aux champs électromagnétiques de fréquence comprise entre 300 kHz et 100 GHz sont exprimées en termes de carré de l'intensité du champ électrique (E^2) et de l'intensité du champ magnétique (H^2) ainsi qu'en densité de puissance équivalente.

La figure 1 permet de comparer les limites proposées par l'ANSI en termes de densité de puissance à celles recommandées par l'IRPA/INIRC.

Fig. 1.

En résumé, les recommandations de l'ANSI et de l'INIRC diffèrent principalement sur les points suivants :

- Dans le domaine des fréquences inférieures à 30 MHz, les limites de l'ANSI sont nettement plus élevées. Aux intensités de champ proches de ces valeurs, il existe certains risques de brûlures et de chocs électriques et il conviendra de veiller à ce que les objets métalliques suffisamment grands soient éliminés, mis à la terre ou manipulés avec des gants isolants.
- Entre 300 MHz et 2 000 MHz, les limites d'exposition recommandées par l'INIRC sont un peu plus basses parce qu'elles tiennent compte d'un pic de résonance dans la tête vers 350 MHz qui a été récemment confirmé.
- La limite adoptée par l'ANSI pour le DAS évalué en moyenne sur tout gramme de tissu est de 8 W/kg.
- Aucun facteur de sécurité supplémentaire n'est recommandé par l'ANSI pour l'exposition du public.

AUTRES PROJETS

Aux Etats-Unis, des projets de recommandations sur les limites d'exposition sont actuellement à l'étude au sein de divers autres organismes tels que le National council on radiation protection and measurements

(NCRP) qui s'intéresse à la protection des travailleurs et des personnes du public et l'Environmental protection agency (EPA), organisme fédéral chargé de la protection de la population et de l'environnement. L'American conference of governmental industrial hygienists (ACGIH), qui a également modifié ses recommandations en 1983, a cependant maintenu la limite de 10 mW/cm² pour les fréquences supérieures à 1 GHz.

En Europe, la Commission des Communautés européennes (CCE) a entrepris de réviser le "Projet de directive pour la protection des travailleurs et des personnes du public contre les dangers des micro-ondes", publié en 1980, afin d'en étendre le champ d'application aux rayonnements électromagnétiques de fréquence comprise entre 100 kHz et 300 GHz et de tenir compte des nouvelles données scientifiques publiées entre temps.

En France, le ministère du Travail suit attentivement les travaux de la CCE ainsi que les nouvelles données publiées, en vue de la promulgation d'une réglementation sur ce sujet en temps voulu.

CONCLUSION

Les progrès réalisés au cours des dernières années dans la connaissance de l'interaction des radiofréquences et de l'organisme vivant ont permis d'établir un nouveau système de limitation des expositions qui tient compte des variations de l'énergie cédée aux tissus en fonction de la fréquence. Il faut espérer que cette nouvelle approche, jointe aux efforts faits par plusieurs organisations internationales comme l'Association internationale de radioprotection, l'Organisation mondiale de la santé et le Bureau international du travail pour réaliser une coopération internationale dans le domaine de la protection contre les rayonnements non-ionisants, permettront d'aboutir à un accord sur les principes fondamentaux de protection contre les radiofréquences et sur des limites d'exposition acceptées par tous.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). Safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields (300 kHz to 100 GHz). New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1982.
- [2] INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION/INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE (IRPA/INIRC). Interim guidelines on limits of exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Physics*, 1984 (sous presse).
- [3] PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE ET ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RADIOPROTECTION. Fréquences radioélectriques et hyperfréquences (Critères d'hygiène de l'environnement, 16). Genève : OMS, 1981.
- [4] SCHWAN J.P. Microwave and RF hazard standard considerations. *J. Microwave Power*, 1982, 17, 1-9.