

Exposition professionnelle aux champs électromagnétiques

*Journée de la Société française de radioprotection (SFRP)
15 décembre 2004, Paris*

La parution récente de la directive européenne du 29 avril 2004 (encadré 1) portant sur les expositions professionnelles aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques a fait l'objet d'une réunion organisée par la SFRP (Société française de radioprotection), section Rayonnements non ionisants, sous la présidence de P. Louit et D. Choudat, à Paris le 15 décembre 2004.

Les principaux objectifs de cette journée étaient de présenter la nouvelle directive ainsi que ses implications pratiques aux médecins du travail, aux ingénieurs sécurité et à toute personne engagée dans la surveillance des risques au travail.

Après un rappel des sources d'exposition professionnelle possibles, des effets biologiques connus et des principes de métrologie dans ce domaine, des services de santé au travail de grandes entreprises françaises ont présenté les actions menées.

Introduction

P. Louit, Sous-direction des conditions de travail, ministère de l'Emploi, du Travail et de la Cohésion sociale

P. Louit a retracé l'historique de la directive « Champs électromagnétiques ». À l'origine de cette directive se trouve une proposition de la Commission européenne, présentée en 1994. Cette proposition concernait quatre agents physiques : le bruit, les vibrations, les champs électromagnétiques et les rayonnements optiques. En 1999, le Conseil avait adopté une recommandation relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (0-300 GHz). Fin 2002, le groupe des questions sociales du Conseil a été saisi d'un texte remanié, concernant les champs électromagnétiques. La position du

Conseil a été transmise au Parlement européen et la directive a été définitivement adoptée le 29 avril 2004 et publiée au *Journal Officiel de l'Union Européenne* le 30 avril (cf. encadré 1).

À la différence de la recommandation de 1999, cette directive concerne les travailleurs et s'impose aux États membres. Elle vise à assurer la protection des travailleurs contre les risques pour la santé et la sécurité dus à l'exposition aux champs électromagnétiques. La directive porte sur les effets reconnus nocifs à court terme sur le corps humain et ne traite pas de possibles effets à long terme car il n'existe pas de données scientifiques probantes permettant d'établir un lien de causalité. La directive s'appuie sur les recommandations de la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP), publiées en 1998.

Paysage des expositions professionnelles

J. Herrault, INRS, Centre de Lorraine

Les sources des champs électromagnétiques jusqu'à 60 GHz sont fréquemment rencontrées dans l'industrie. Afin de permettre aux personnes concernées par la prévention des risques au travail de réaliser une évaluation des risques, la connaissance des différentes applications professionnelles s'impose. En fonction des

Y. GANEM

Département Études
et assistance
médicales, INRS,
Centre de Paris.



Documents
pour le Médecin
du Travail
N° 102
2^e trimestre 2005

225

La directive 2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004

concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (dix-huitième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1 de la directive 89/391/CEE). Publiée au *Journal Officiel de l'Union Européenne, JOUE*, L159 le 30 avril 2004, rectific. du *JOUE* L184 du 24 mai 2004.

Dans la directive, sont décrites les prescriptions minimales afin de promouvoir l'amélioration, en particulier, du milieu de travail, pour garantir un meilleur niveau de protection de la santé et de la sécurité des travailleurs concernant les risques liés aux champs électromagnétiques en raison de leurs incidences sur la santé et la sécurité des travailleurs. Toutefois, la présente directive ne traite pas des effets à long terme, y compris les effets cancérogènes qui pourraient se produire en raison d'une exposition à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variant dans le temps, à propos desquels il n'existe pas de données scientifiques probantes qui permettent d'établir un lien de causalité.

Elle indique également que l'on peut réduire plus efficacement le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques en introduisant des mesures préventives dès le stade de la conception des postes et lieux de travail, ainsi qu'en donnant la priorité, lors du choix des équipements, procédés et méthodes de travail, à la réduction des risques à la source. Des dispositions sur les équipements et les méthodes de travail contribuent dès lors à la protection des travailleurs qui les utilisent.

La conformité aux valeurs limites d'exposition et aux valeurs déclenchant l'action devrait fournir un niveau élevé de protection par rapport aux effets avérés sur la santé qui peuvent résulter de l'exposition à des champs électromagnétiques, mais ne pourra pas nécessairement empêcher des problèmes d'interférence avec des appareils médicaux tels que les prothèses métalliques, les stimulateurs cardiaques, les défibrillateurs, les implants cochléaires et autres implants, ni des effets sur leur fonctionnement ; des interférences en particulier avec des stimulateurs cardiaques peuvent se produire à des niveaux inférieurs aux valeurs déclenchant l'action, et devraient donc entraîner l'adoption de précautions appropriées et de mesures de protection.

gammes de fréquence mises en œuvre par les machines ou équipements, ces applications peuvent être classées en cinq familles ; une sixième famille regroupe toutes les télécommunications quelle que soit leur fréquence (*tableau I et figure 1*).

La famille des champs statiques se rencontre principalement dans l'industrie sous forme d'électrolyseurs et dans les laboratoires utilisant la résonance magnétique nucléaire (RMN).

La famille des champs électromagnétiques de très basse fréquence se rencontre principalement dans la distribution de l'électricité (lignes haute tension, transformateurs et lignes basse tension) et le soudage.

La famille des champs électromagnétiques de moyenne fréquence se rencontre principalement dans les appareils utilisant le chauffage par induction et les fours de fusion.

La famille des champs électromagnétiques de haute fréquence utilise l'effet diélectrique. Elle se rencontre

principalement dans le soudage (type presse haute fréquence) et le chauffage (séchage du bois).

La famille des champs électromagnétiques hyperfréquence se situe à une fréquence de 2,45 GigaHz. La principale application est le four micro-ondes.

La sixième famille est celle des télécommunications qui regroupe les antennes relais de radiotéléphonie et les stations hertziennes.

Un dépassement des valeurs limites d'exposition préconisées par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) peut être retrouvé dans trois situations :

- zones situées à proximité des aménées de courant ;
- pinces de soudage par point à câble ;
- presses haute fréquence (modèles anciens).

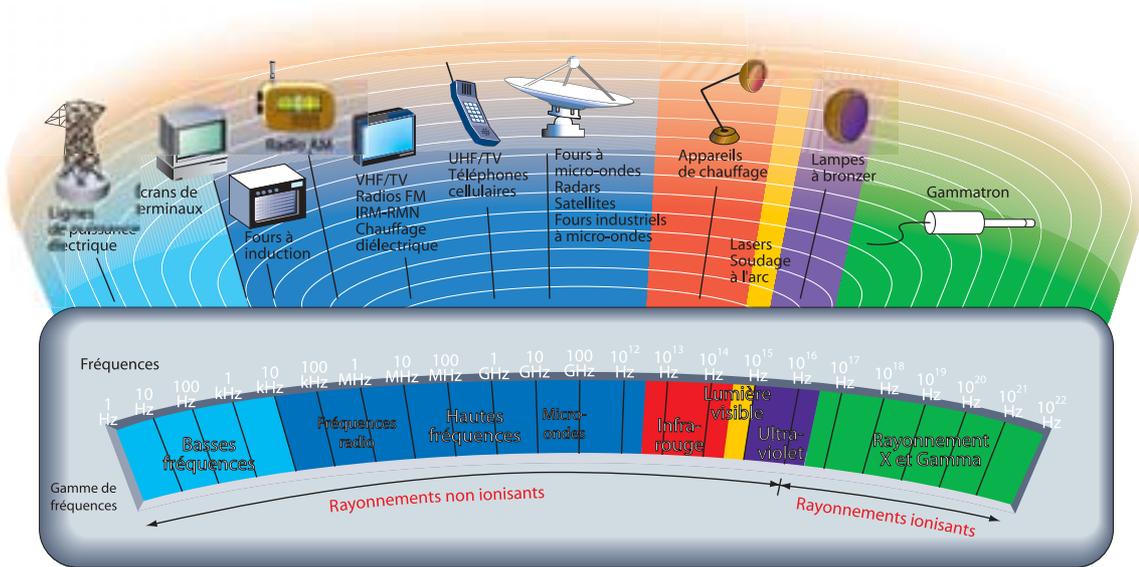
Quelle que soit la gamme de fréquence dans laquelle se situe l'application et en référence à la nouvelle directive, les valeurs déclenchant l'action sont presque toujours respectées.

TABLEAU I

Famille des principales applications des champs électromagnétiques et leurs gammes de fréquences.

	Famille	Gamme de fréquences (Hz)
1	Statique	0
2	ELF	50-60
3	Moyennes fréquences	50 à plusieurs Méga
4	Hautes fréquences	Quelques Méga
5	Hyper fréquences	2.45 Giga
6	Télécommunications	Variable

Fig. : Le spectre électromagnétique.



© INRS (WAG)

Bases physiques et biologiques de la directive : les courants induits

N. Burais, CEGELY - École centrale de Lyon

En milieu industriel, l'utilisation croissante des nouvelles technologies multiplie les sources de champs électromagnétiques. Les systèmes concernés peuvent être sommairement répartis en diverses catégories en fonction de la fréquence et/ou des énergies mises en jeu :

- transport et distribution de l'électricité ;
- systèmes de conversion électromagnétique, électromécanique ou électrothermique ;
- transmission d'information par voie hertzienne.

Dans le domaine des basses fréquences, le champ électromagnétique rayonné par ces systèmes se compose :

- du champ électrique E lié à la présence de différence de potentiel ;
- du champ magnétique H résultant du passage du courant.

Ces champs E et H alternatifs induisent des courants électriques dans le corps humain dont la répartition caractérisée par la densité de courant J (A.m⁻²) est très différente.

Dans la gamme des basses fréquences, les effets thermiques induits étant inexistantes, la valeur J constitue la seule variable intéressante pour quantifier ces phénomènes dans un contexte normatif et les corréler à d'éventuels effets sur la santé.

La difficulté majeure rencontrée actuellement est la mesure des courants induits. La modélisation numérique (équation de « Maxwell ») permet grâce à la

connaissance de la répartition des champs et courants dans le corps humain de simuler ces phénomènes.

Débit d'absorption spécifique (DAS) et effets thermiques

R. de Sèze, INERIS

R. de Sèze a rappelé les principaux effets des champs électromagnétiques Radiofréquences sur l'homme sur lesquels se base la nouvelle directive européenne du 29 avril 2004.

MÉCANISME D'INTERACTION

Il existe un seul mécanisme d'interaction connu et expérimentalement validé des champs électromagnétiques radiofréquences avec les organismes biologiques : c'est la conversion dans les tissus de l'énergie électromagnétique en chaleur, appelée en physique « relaxation diélectrique ». Sous l'effet du champ électromagnétique radiofréquence, les molécules biologiques polarisées transforment l'énergie électromagnétique du rayonnement en énergie mécanique. Les forces de frottement avec les molécules avoisinantes, liées à la viscosité du milieu, transforment cette énergie mécanique en chaleur. Il se produit alors une absorption de cette énergie et dissipation sous forme de chaleur dans les tissus biologiques caractérisée par la grandeur physique débit d'absorption spécifique (DAS) en watt/kg.

EFFETS BIOLOGIQUES, EFFETS SANITAIRES ET EFFETS THERMIQUES (encadré 2)

Les diverses études publiées montrent que pour une très large gamme d'intensités, les champs électromagnétiques peuvent avoir un effet sur la plupart des systèmes physiologiques. De nombreuses études in vivo ont permis de déterminer des valeurs seuils d'un effet potentiellement nocif des champs radiofréquences. Il a été déterminé le niveau le plus bas du DAS auquel peut être observé un effet critique : $DAS = 4 \text{ W/kg}$. Cet effet est une modification comportementale et plus précisément une perturbation de l'apprentissage chez les rongeurs. Il peut s'accompagner d'une élévation de la température corporelle jusqu'à 1°C . C'est pourquoi les effets observés avec les champs radiofréquences sont dits « thermiques ». A partir des effets observés, les organismes de normalisation tels que l'ICNIRP ont établi des valeurs limites de DAS avec un facteur de précaution de 10 ; ainsi la valeur de $0,4 \text{ W/Kg}$ a été choisie comme valeur limite de DAS à ne pas dépasser pour une exposition corps entier. Les valeurs de référence sont ensuite calculées en fonction de la fréquence pour que ce DAS ne soit pas dépassé. D'autres effets ont pu être observés, tels que le « click » micro-onde ou l'augmentation de la perméabilité hémato-encéphalique, mais restent dans les limites de variations physiologiques normales. Des mécanismes théoriques d'interaction des champs radiofréquences ont également été suggérés mais sans confirmation expérimentale.

ENCADRÉ II

Quelques définitions

On appelle « effets biologiques » des changements d'ordre physiologique, biochimique ou comportemental qui sont induits dans un organisme, un tissu ou une cellule en réponse à une stimulation extérieure. Tout effet biologique peut conduire, mais pas toujours, à des effets nocifs pour la santé ; il peut manifester simplement la réponse adaptative normale de la cellule, du tissu ou de l'organisme à cette stimulation (par exemple, la sudation quand il fait chaud).

Un « effet sanitaire » est un effet biologique qui peut mettre en danger le fonctionnement normal d'un organisme, en dépassant les capacités de réponse « physiologique » à l'action de l'agent extérieur. Des effets biologiques qui sont, ou qui peuvent être considérés, en l'état actuel des connaissances, comme prédictifs de conséquences sanitaires sont qualifiés par les groupes d'experts « d'effets biologiques menaçants ».

Effets biologiques des champs de très basse fréquence (0-300Hz)

**H. Brugère, Unité de physiologie-thérapeutique,
École nationale vétérinaire de Maisons-Alfort**

Dans l'organisme, des phénomènes électriques assurent physiologiquement des fonctions de commande ou de régulation des cellules ou des organes. Toutes les cellules sont polarisées et des variations de leur potentiel membranaire déterminent leur activité. L'induction de courants par des champs extérieurs peut donc, a priori, exercer une action, en particulier sur les systèmes de transmission ou de transduction des informations, comme, par exemple, les canaux ioniques commandés par tension, dispositifs électro-sensibles présents dans toutes les cellules excitables (système nerveux, muscles...)

L'effet le plus facilement constaté est la perception du champ électrique à partir d'un niveau compris entre 5 et 10 kV/m, avec des variations individuelles, mais avec une bonne corrélation entre les effets chez l'Homme et chez l'animal. Le champ magnétique ne donne pas naissance à une perception sensorielle, et c'est seulement à de très fortes valeurs de champs statiques (plusieurs teslas) que peuvent être notés des symptômes chez les personnes exposées : les effets observés (nausées, maux de tête...) résultent d'une interaction avec l'appareil vestibulaire (canaux semi-circulaires). Un effet de stimulation des neurones par le champ magnétique ne se produit pas à ces niveaux, car, pour stimuler par voie transcrânienne des neurones très superficiels tels que ceux des aires motrices, il est nécessaire de pouvoir appliquer des champs de très fortes valeurs qui ne peuvent être obtenus qu'en mode impulsionnel (champ magnétique de plusieurs dizaines de Tesla par seconde). La situation est similaire pour les nerfs périphériques ou les muscles, pour lesquels c'est encore seulement un champ magnétique qui apportera une stimulation assez puissante.

Un autre effet sensoriel typique est la production de sensations visuelles dites « phosphènes ». Il s'agit d'impressions lumineuses semblables à celles qui peuvent être obtenues par une légère compression des globes oculaires. Les phosphènes surviennent quand la rétine est placée dans un champ électrique ou magnétique. Ils sont l'effet biologique obtenu chez l'Homme pour les valeurs de champ les plus faibles (5 mT à 20 Hz, fréquence optimale pour les provoquer).

Chez certains poissons existe une électro-sensibilité qui apporte un véritable sixième sens mis à profit dans la communication entre individus, dans la recherche des proies, ou (indirectement) pour s'orienter dans le champ magnétique terrestre. Les dispositifs sensoriels

impliqués présentent la plus grande sensibilité de détection de champ électrique connue dans le règne animal (200 nV), mais il faut souligner que celle-ci résulte de l'existence d'un système complexe (récepteurs, neurones, etc.) spécialisé pour cette fonction et dont les performances ne sont pas extrapolables aux autres tissus.

D'autres possibilités d'interaction impliquant soit des actions membranaires soit des actions sur des particules chargées ont suscité de nombreuses études expérimentales. L'exposition d'algues unicellulaires, les diatomées, a semblé donner un exemple d'un réactif biologique calcium-dépendant. Ce modèle n'a cependant jamais été validé, pas plus que d'autres modèles de libération du calcium. Il en est de même pour des effets passant par une action sur les radicaux libres, particules à courte durée de vie. Une recherche active a aussi concerné une éventuelle action s'exerçant sur un oxyde de fer, la magnétite, dont les particules de grande taille pourraient effectivement être mobilisées par le champ magnétique. Néanmoins, il n'a jamais été décrit de structure du système nerveux associé à ces particules, condition indispensable pour étayer l'hypothèse d'une réelle magnéto-sensibilité.

Effets biologiques des radiofréquences

B. Veyret, Laboratoire PIOM, ENSCPB, CNRS/EPHE, Bordeaux

Après un bref rappel sur les effets thermiques liés à l'interaction des radiofréquences (RF) et de la matière vivante, B. Veyret a abordé les effets non-thermiques ou spécifiques tels que les interférences avec les phénomènes bio-électriques ou avec les fonctions de la membrane cellulaire.

Des incertitudes subsistent sur les effets non-thermiques qui pourraient résulter d'une exposition prolongée de faible intensité, notamment au niveau des systèmes nerveux, endocrinien ou immunitaire. Aussi, ces derniers sont-ils l'objet de nombreuses études.

Dans le cadre de l'expérimentation cellulaire, les études publiées mettent en évidence de nombreux résultats négatifs et quelques résultats positifs obtenus à des niveaux non-thermiques (sans échauffement). Ainsi, il est quasi certain que les RF ne produisent des effets génotoxiques sur les cellules qu'au niveau thermique. Dans le cas des propriétés fonctionnelles des cellules (transport d'ions, expression des gènes, synthèse des protéines et prolifération) les études ont été nombreuses, y compris à des niveaux non thermiques. Quelques résultats positifs avaient été publiés sur la

modification d'événements membranaires sous l'effet des ondes mais ils n'ont pas été répliqués.

Dans le cadre de l'expérimentation, les animaux notamment les rongeurs ont été largement utilisés au début des recherches sur les effets biologiques des micro-ondes pour quantifier les effets thermiques sur le comportement et la thermorégulation.

Le consensus actuel est en faveur d'une absence d'effets génotoxiques des RF de bas niveau, qui ne paraissent pas favoriser l'initiation du cancer. De même, il semble que l'exposition ne favorise pas la promotion du cancer (animaux transgéniques, tumeurs chimio-induites ou greffées). Une augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, qui isole le cerveau des substances toxiques, sous l'effet de radiofréquences modulées ou continues a été rapportée par deux groupes, tandis que d'autres n'ont constaté aucune différence entre animaux exposés et témoins.

Les études initiales sur volontaires ont mis en évidence que si les effets observés à basse fréquence (à partir de 10 kHz) concernent les nerfs et muscles, ces effets se traduisent à plus haute fréquence par un échauffement. La perception des micro-ondes se fait par l'intermédiaire de l'hypothalamus et de récepteurs dans la peau. Les changements de l'activité endocrinienne et du comportement permettent le maintien de l'équilibre thermique. De fait, un échauffement prolongé de plus de 1 ou 2 °C peut avoir un effet dommageable dans certains tissus biologiques et, parfois, être une source de stress affectant les performances. Il faut mentionner les observations faites à la suite de quelques expositions accidentelles à des puissances élevées dans lesquelles d'importantes lésions internes ont été constatées, alors que l'intéressé ne s'était pas rendu compte qu'il était exposé.

La plupart des études humaines à bas niveau de DAS ont été faites dans le cadre des programmes de recherche sur les téléphones mobiles. Les radiotéléphones font partie des nouveaux outils de communication mobile qui se répandent rapidement dans les pays industrialisés (le nombre de 2 milliards sera atteint en l'an 2006). Ces téléphones sont abondamment utilisés dans le cadre professionnel. Ces appareils, de type GSM en Europe, fonctionnent actuellement autour de 900 MHz et de 1 800 MHz. En raison de la proximité de l'antenne du téléphone portable, environ la moitié de la puissance émise est absorbée dans la tête. De ce fait, des craintes ont été émises quant aux effets sanitaires éventuels liés à l'utilisation des radiotéléphones. De nombreuses recherches ont été effectuées pour mieux connaître les effets biologiques des signaux de la téléphonie mobile et en particulier en Europe (15 millions d'euros par an dans le monde). Des calculs récents ont montré que l'échauffement dû aux ondes électromagnétiques ne dépassait pas 0,1 °C dans la périphérie du cerveau. Dans le cas des stations de base, l'exposition des individus n'est pas

localisée mais affecte le corps entier : les niveaux de puissance absorbée sont très faibles car les stations de base sont peu puissantes et l'énergie diminue rapidement avec la distance.

Pour permettre de déceler d'éventuels effets biologiques, des études sont menées depuis plusieurs années sur des cellules en culture, des animaux et des personnes volontaires. Les recherches portent sur des effets éventuels de co-promotion du cancer, ainsi que sur des altérations du sommeil, de l'ouïe, et d'autres paramètres neurologiques. De plus l'approche épidémiologique est mise en œuvre dans 13 pays à travers l'étude Interphone qui porte sur les tumeurs de la tête et du cou. Jusqu'à présent, la plupart des résultats ont été négatifs, mais quelques résultats positifs, qui doivent cependant être confirmés, ont été obtenus.

B. Veyret a décrit une autre application lors de son exposé, celle de l'imagerie par résonance magnétique ou IRM. Dans l'appareillage IRM, l'exposition aux RF (60 à 100 MHz) entraîne une élévation, en général superficielle, de la température. Selon l'ICNIRP (2004), pour des expositions corps-entier, aucun effet sanitaire n'est attendu si l'augmentation de la température corporelle ne dépasse pas 1 °C. Dans le cas d'enfants, de femmes enceintes et autres personnes potentiellement sensibles, l'augmentation ne devrait pas dépasser 0,5 °C. Pour des expositions locales, les températures ne devraient pas dépasser 38 °C dans la tête, 39 °C dans le tronc et 40 °C dans les membres.

En principe, ce sont les études épidémiologiques qui permettent de déceler des risques de santé publique. Dans le cas des RF, les études épidémiologiques, justifiées au départ par l'utilisation croissante des radars, ont été peu nombreuses aux fréquences plus basses. De plus, les résultats de ces études sont difficilement comparables en raison des conditions très variées d'exposition.

Les deux principaux types d'affections étudiés concernent la reproduction (avortements spontanés et malformations) et l'apparition de cancers, le facteur pris en compte étant les RF produites par les radars et les appareillages industriels, en particulier dans l'industrie de la soudure des plastiques. Dans les deux cas, les résultats obtenus ont été globalement négatifs. Dans ce type d'étude, la méthodologie devra être améliorée, en particulier au niveau de la mesure de l'exposition, pour fournir des réponses fiables.

Dans le cadre de son programme EMF, l'OMS maintient une base de données sur les projets récemment terminés ou en cours et présente ses recommandations de recherche (<http://www.who.int/peh-emf/>).

En conclusion, l'essentiel de la recherche sur les effets sanitaires des radiofréquences a porté récemment sur les signaux de la téléphonie mobile. Ceci a généré une grande quantité de résultats précieux pour l'analyse du risque mais pas toujours pertinents pour les

autres expositions et en particulier en milieu professionnel (exposition corps-entier, autres gammes de fréquences, expositions continues, etc.).

Des recommandations de l'ICNIRP à la directive européenne

P. Vecchia, Institut supérieur de la santé, président de l'ICNIRP, Rome

La récente directive européenne pour la protection des travailleurs contre l'exposition aux rayonnements non ionisants atteint en même temps deux objectifs. D'une part, elle réalise ce qui était prévu par la directive cadre à l'égard des agents physiques, d'autre part elle s'insère dans une action pour l'harmonisation de normes qui a été promue depuis plusieurs années par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Dans ce contexte, la directive complète d'une façon cohérente l'action de l'Union Européenne qui avait déjà émis une recommandation pour la protection du public exposé. L'adoption de normes communes par l'Union Européenne (UE) permettent d'assurer un niveau de protection uniforme entre les citoyens. L'UE souligne aussi que les normes communes doivent se baser sur les connaissances scientifiques, faisant référence aux recommandations développées par l'ICNIRP.

Au début, les normes de protection avaient été créées, pour protéger des travailleurs : les niveaux d'exposition du public sont en fait bien au-dessous de ceux qui pourraient provoquer des effets biologiques et sanitaires importants et pourtant ne demanderaient pas des mesures de protection particulières. En revanche, la protection des travailleurs exige des normes qui soient assez protectrices, scientifiquement bien fondées et applicables en pratique.

Les recommandations de l'ICNIRP (ainsi que les autres normes internationales) ont ces caractéristiques : elles se fondent sur une analyse complète de la littérature scientifique pertinente et protègent contre tous les effets sanitaires connus. L'introduction de facteurs de réduction appropriés assure que les expositions effectives soient sensiblement au-dessous des niveaux de seuil d'effets biologiques potentiellement nuisibles. Enfin, la structure à deux niveaux, avec des restrictions de base et des valeurs de référence, rend le système de protection flexible et adaptable à toute condition d'exposition. Ce système permet de maîtriser les situations complexes rencontrées dans les environnements professionnels, prenant en compte des facteurs tels que l'intermittence (liée au cycle de fonctionnement des appareils ou à l'organisation des procédés industriels) ou la distribution

inégale des champs électromagnétiques. L'ICNIRP met continuellement à jour l'évaluation des connaissances scientifiques, et modifie les recommandations quand cela se justifie. Cela permettra d'effectuer d'une manière presque automatique la révision périodique de la directive qui est demandée par l'Union Européenne.

Dosimétrie et précision de la mesure

I. Magne, EDF - R&D

En matière d'exposition aux champs électriques et magnétiques de basse fréquence, le paramètre physiologique à prendre en compte est la densité de courant induit dans l'organisme. Pour des raisons évidentes, celle-ci ne peut se mesurer directement. Pour des raisons pratiques, il a donc fallu baser l'évaluation de l'exposition sur d'autres paramètres pouvant être mesurés : le champ électrique et le champ magnétique.

Il existe différents types de capteurs pour la mesure des champs électriques ou magnétiques dont les caractéristiques techniques sont fonction de la fréquence du champ. S'il existe des précautions communes évidentes, telles que l'étalonnage et la vérification régulière de l'appareil, certaines précautions spécifiques doivent être observées lors des mesures de champ pour tenir compte des facteurs susceptibles de biaiser la mesure. Peuvent être citées en particulier :

- pour les mesures de champ électrique : l'influence de l'opérateur et plus généralement d'objets conducteurs au voisinage du capteur, et l'influence de la température et de l'humidité ;

- pour les mesures de champ magnétique : l'influence du champ électrique sur les capteurs bobinés.

Une mesure de qualité n'est pas suffisante en soi. L'interprétation des résultats est tout aussi importante. Des différences importantes, suivant la nature de ce que l'on mesure, sont constatées :

- pour le champ électrique, les sources sont peu nombreuses et peu variables au cours du temps. L'interprétation des mesures est donc simple ;

- pour le champ magnétique, les sources sont innombrables, variables en fonction du temps, et de fréquences multiples. Il est donc parfois difficile de savoir ce que l'on mesure exactement et la contribution particulière de telle ou telle source.

Cette dichotomie est également retrouvée en matière d'atténuation et de blindage des champs électriques et magnétiques : le champ électrique étant facilement perturbé, il est très facile à atténuer (aluminium et cuivre) et réciproquement, le champ magnétique étant peu perturbé, les blindages sont techni-

quement difficiles à réaliser et font appel à des matériaux particuliers (acier et ses dérivés).

En conclusion, les mesures des champs électriques et magnétiques à basse fréquence sont très différentes. On retiendra que la mesure de l'intensité du champ électrique (V/m) est complexe à réaliser, mais simple à interpréter et qu'au contraire, la mesure de l'indice du champ magnétique (A/m) est simple à réaliser, mais souvent délicate à interpréter.

Métrologie et incertitudes en radiofréquences

J. Wiart, France TELECOM RD, président de la commission K de l'URSI - Union radio-scientifique internationale

Dans le domaine des radiofréquences, les grandeurs fondamentales pour la quantification des interactions des ondes électromagnétiques avec les personnes sont les puissances absorbées par les tissus, le débit d'absorption spécifique ou DAS, exprimé en watts par kilogramme. Le DAS est utilisé par les organismes tels que l'ICNIRP pour définir des limites d'exposition : les restrictions de base. Étant donné la complexité de l'évaluation du DAS dans les tissus, l'ICNIRP a défini des niveaux de référence basés sur le champ électrique et magnétique incident (en théorie sans interférence de la personne). Ces niveaux de référence peuvent être utilisés quand le couplage entre la source et la personne peut être considéré comme négligeable, dans ce cas la conformité aux niveaux de référence garantit la conformité aux restrictions de base. L'évaluation du DAS et du champ incident est donc fondamentale pour évaluer le niveau d'exposition d'une personne.

ÉVALUATION DU DAS

La mesure du DAS dans les tissus vivants n'est pas possible, car invasive, c'est donc en associant simulations numériques et mesures que la détermination du DAS dans les tissus est envisageable.

Dans le domaine de la certification des systèmes, de gros efforts ont été réalisés. Pour évaluer la conformité des systèmes des moyens de mesure de DAS dans des liquides homogènes, des fantômes (SAM ⁽¹⁾) et des protocoles avec l'analyse de l'incertitude ont été développés pour les systèmes de téléphonie mobile. Des efforts sont en cours pour couvrir les autres domaines.

L'évaluation précise du niveau de DAS dans un organe (humain ou animal) est beaucoup plus complexe. Les travaux actuels sur la comparaison de l'exposition

(1) Fantôme normalisé utilisé dans le projet COMOBIO (programme de recherche sur les effets potentiels des téléphones mobiles).

des enfants et celle des adultes sont de ce point de vue intéressants. La variabilité de morphologie, le positionnement du téléphone par exemple sont autant d'éléments qui ne permettent pas une évaluation exacte mais seulement une valeur et une incertitude.

ÉVALUATION DU CHAMPS INCIDENT

En première approche, les choses pourraient paraître plus simples. Il n'en est rien, en champ lointain à cause des évanouissements rapides liés aux réflexions et diffractions, en champ proche à cause de la complexité du champ et dans tous les cas à cause de la complexité des signaux tels que ceux du système de communications sans fil de troisième génération de l'Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), l'évaluation n'est pas simple. Des systèmes de mesure et des protocoles ont été développés mais l'évaluation de l'exposition individuelle est un enjeu important pour lequel, à l'aide de dosimètre individuel, des études sont en cours.

De nombreux travaux ont été menés pour l'évaluation des niveaux d'exposition des personnes, mais le fait que les travailleurs peuvent opérer souvent près des sources de rayonnement renforce le besoin de mener des études spécifiques.

DIRECTIVE EUROPÉENNE 2004/40/CE

La directive 2004/40/CE, comme toute directive liée à la sécurité du travail, donne une responsabilité au chef d'établissement sur la sécurité et la santé de ses salariés. Celui-ci doit donc faire procéder à une analyse des risques sur ce sujet assez méconnu et mettre en place des dispositions visant à éviter ou à réduire les risques. Il doit aussi informer et former son personnel sur le sujet.

Industries des basses fréquences face aux exigences réglementaires

F. Deschamps, RTE - Centre national d'expertises

La présentation de F. Deschamps propose une grille de lecture et d'analyse du texte de la directive 2004/40/CE, du point de vue d'un industriel des basses fréquences (figure 2).

Les différents points du texte sont abordés successivement :

- les attendus et considérants précisent quels sont les

objectifs poursuivis au travers du texte. (en pratique, les risques liés à l'exposition aux CEM basse fréquence) ;

- le champ d'application et les limites applicables ;
- les dispositions réglementaires pour les employeurs : l'analyse de risque au sens de la directive (c'est-à-dire l'évaluation de l'exposition), les dispositions techniques ou organisationnelles visant à réduire les risques, l'information/formation du personnel et la concertation.

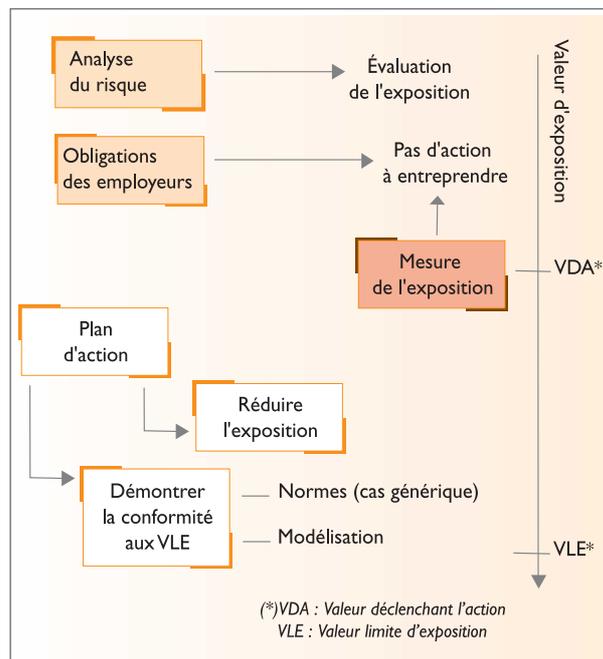
Implications pour les industries utilisant les radiofréquences

F. Jacquin, TDF - Direction des sites

Dans le contexte d'une industrie utilisant les radiofréquences, ou dans le monde des télécommunications, F. Jacquin a exposé la mise en œuvre de ces actions nécessitant pour l'ingénieur sécurité de répondre à un certain nombre de questions sous-jacentes liées à la directive.

Les travailleurs les plus concernés par l'application de cette directive, dans ce type d'industries sont nombreux, et les personnels travaillant à l'entretien des antennes hertziennes, sont donnés en exemple.

Fig. 2 : Analyse du risque en fonction des valeurs d'exposition.



F. Jacquin a évoqué la question de l'application de la directive aux sous-traitants et intervenants présents sur le site industriel.

Les fournisseurs d'équipements créant ces radiofréquences doivent s'engager sur le respect des termes de la directive.

De nombreuses questions subsistent et les termes de la directive doivent être précisés sur différents points :

- quelle gamme de fréquence doit-on analyser sur un site qui n'utilise que quelques fréquences alors que la directive établit des limites de 0 Hz à 300 GHz ?

- quelle approche pour les expositions partielles du corps (tête, tronc, membres) ?

- faut-il modéliser ou mesurer ? Et avec quels moyens de mesure ?

- comment prendre en compte différentes sources sur un site si elles émettent à des fréquences diverses ?

- dans quels cas privilégier les protections collectives, et dans quels autres les protections individuelles ?

- quelle information du personnel ? Quelles formations ?

- quelles vérifications doit-on faire dans le temps ? Avec quelle périodicité ?

L'expérience montre que les entreprises doivent commencer à préparer la mise en place de cette réglementation dès maintenant car la durée de vie des équipements industriels qu'elles acquièrent aujourd'hui est largement supérieure au délai de quatre ans de la transposition en droit français.

Transposition en droit français

P. Louit

La directive européenne 2004/40/CE précise, pour ce qui concerne les risques dus à l'exposition à des champs électromagnétiques, les exigences de la directive cadre de 1989. Les obligations des employeurs peuvent être résumées de la manière suivante :

1°) En procédant à l'évaluation des risques, l'employeur évalue et, si nécessaire, mesure ou calcule les niveaux de champs électromagnétiques auxquels les travailleurs sont exposés. Pour ce faire, il utilise les normes européennes harmonisées établies par le Comité européen pour la normalisation électronique (CENELEC).

2°) Lorsque les valeurs déclenchant l'action sont dépassées, l'employeur évalue et, au besoin, calcule si les valeurs limites d'exposition sont dépassées.

3°) Lorsque les valeurs limites sont dépassées, l'employeur établit et met en œuvre un programme com-

portant des mesures techniques ou organisationnelles visant au respect des valeurs limites.

4°) L'employeur veille à ce que les travailleurs exposés à des risques reçoivent les informations et la formation nécessaires en rapport avec le résultat de l'évaluation des risques.

5°) En plus de la surveillance médicale régulière, lorsqu'une exposition dépassant les valeurs limites est dépistée, le travailleur concerné doit faire l'objet d'un nouvel examen par le médecin du travail.

La directive doit être transposée dans le Code du travail pour devenir applicable. Un projet de décret en Conseil d'État sera élaboré prochainement, puis présenté aux partenaires sociaux représentés au sein du Conseil supérieur de la prévention des risques professionnels. Un arrêté apportera les précisions techniques nécessaires, notamment les normes européenne auxquelles il y a lieu de se référer en procédant à l'évaluation, à la mesure ou au calcul des expositions. La directive doit entrer en application, au plus tard le 30 avril 2008.

Conclusion

D. Choudat, Université René Descartes, Paris

Les circonstances de travail exposant aux champs électromagnétiques sont très variées et correspondent à des expositions très différentes en termes de nature des champs, d'intensité, de durée d'exposition. Ces caractéristiques d'exposition doivent être parfaitement analysées même si la quantification peut s'avérer délicate dans certaines situations. Cette analyse des expositions avec estimation des doses, si ce n'est leur mesure, est un préalable indispensable pour évaluer les risques potentiels.

Or les effets biologiques ne sont avérés que pour des expositions intenses, tant chez l'animal que chez l'homme. Ces effets sont en général modestes et transitoires. Aussi, la connaissance des effets biologiques et l'analyse des expositions permettent d'écarter tout risque significatif dans la majorité des circonstances de travail.

La directive européenne sur les champs électromagnétiques précise les étapes d'évaluation des risques dans ce domaine avec l'identification des sources et l'estimation des expositions pour prévenir les éventuels effets biologiques.

Cette approche scientifique doit servir de base pour éviter toute perception irrationnelle des expositions aux champs électromagnétiques.