

Effets biologiques des rayonnements électromagnétiques

7^e Conférence internationale

La Valette, Malte, 8-12 octobre 2012

EN
RÉSUMÉ

AUTEURS :

P. Demaret, département Ingénierie des équipements de travail, INRS

Cette conférence a permis de faire le point sur les effets biologiques des rayonnements électromagnétiques. Leurs éventuels effets pathologiques ont été abordés à travers différentes études épidémiologiques, suivis d'une présentation d'applications médicales des champs électromagnétiques (ablation des tumeurs, consolidation de fracture, cicatrisation, traitement de troubles neurologiques...) et d'applications industrielles des radiofréquences (lignes électriques, chauffage par induction, magnétoscopie, électrolyse, soudage, micro-ondes, téléphonie...).

MOTS CLÉS

Rayonnement
électro-
magnétique

Le Groupe de recherche sur l'électromagnétisme (EMRG), créé au sein du département de physique de l'Université de Malte pour mener des recherches dans le domaine des champs électromagnétiques a organisé à La Valette en octobre 2012, la 7^e conférence internationale sur les effets biologiques des champs électromagnétiques. Cette conférence a rassemblé une cinquantaine d'experts d'Amérique, d'Asie, d'Australie et d'Europe qui ont fait le point sur les avancées des recherches dans le domaine. Les communications ont concerné les effets pathologiques et biologiques des rayonnements électromagnétiques, les applications médicales, les expositions industrielles et grand public, l'évaluation des risques éventuels et la réglementation.

EFFETS DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

EFFETS PATHOLOGIQUES CHAMPS STATIQUES

Trois projets scientifiques, réalisés à la demande de l'Office fédéral allemand pour la protection contre les rayonnements, et terminés en 2011, avaient pour objectif de tester les effets possibles sur la santé de puissants champs magnétiques statiques (jusqu'à 7 Tesla (T)) générés par l'imagerie par résonance magnétique. Ils se sont concentrés sur les effets des champs électromagnétiques sur la fertilité, la grossesse et le développement chez la souris, ainsi que sur les performances cognitives chez l'homme. Plusieurs personnes exposées ont présenté des vertiges, un nystagmus (mouvement d'oscillation involontaire et saccadé du globe oculaire), des magnétophosphènes et des acouphènes, principalement

Effets biologiques des rayonnements électromagnétiques : 7^e Conférence internationale

à des niveaux de 7 T et pendant le déplacement dans des gradients de champ magnétique. En dépit de ces perceptions désagréables, les champs magnétiques n'ont pas eu d'influence négative sur les performances cognitives des sujets ni causé de stress particulier. La plupart des sujets s'est habituée à l'exposition et les symptômes ont rapidement disparu. Aucun effet sur la santé n'a été révélé.

ELF (EXTREMELY LOW FREQUENCIES)

Des études épidémiologiques ont permis de constater d'éventuels effets nocifs (leucémie infantile) des champs électromagnétiques domestiques de basses fréquences (0 à 300 Hz). La mise en commun d'analyses de données provenant de nombreuses études de ce type a conduit le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), en 2011, à classer les champs électromagnétiques ELF comme « *peut-être cancérigènes pour l'homme* » (2B). Ce niveau de classification est basé sur des preuves de cancérogénicité limitées chez l'homme et insuffisantes chez l'animal. C'est l'absence de mécanisme plausible qui explique le niveau retenu par le CIRC. De nombreux autres exemples existent pour lesquels les données épidémiologiques ont précédé la mise en évidence de mécanismes. Depuis le rapport du CIRC, d'autres études épidémiologiques ont corroboré les résultats antérieurs. Des études plus rigoureuses sont programmées, mais à ce jour aucun nouvel élément convaincant sur les mécanismes possibles de survenue de leucémie infantile après exposition aux ELF n'existe et n'est venu apporter des arguments en faveur d'un classement plus sévère.

RADIOFRÉQUENCES

Une équipe universitaire autrichienne s'est interrogée sur la dangerosité de l'utilisation des téléphones portables sur les enfants. La question était de savoir si les enfants peuvent présenter une vulnérabilité accrue aux rayonnements électromagnétiques et de ce fait un risque particulier de développer des effets potentiels à long terme lors de l'utilisation de téléphones portables. L'étude a conclu que si de tels effets existent, ils restent mal définis. Suite à différents débats, certains scientifiques recommandent d'interdire l'usage du téléphone portable chez l'enfant. Des chercheurs de l'Université des sciences médicales de Téhéran (Iran) ont réalisé une étude concernant les incidences possibles du champ magnétique de fréquence égale à 217 Hz (fréquence du signal de modulation dans le système GSM) sur la maladie d'Alzheimer induite expérimentalement chez le rat. Les résultats obtenus suggèrent des effets des signaux de basse fréquence utilisés dans la téléphonie mobile sur la maladie d'Alzheimer et ouvrent la porte à de nouvelles études.

Des champs radiofréquences, spécialement accordés, pulsés et modulés en amplitude, peuvent avoir des effets perturbateurs importants sur la morphologie des cellules cancéreuses humaines *in vitro*. Des chercheurs des universités de Rennes, de Bordeaux (France) et du Collège Skidmore de New-York (USA) ont photographié et filmé ces transformations morphologiques. À partir des caractéristiques physiques du champ électromagnétique généré, un modèle de son action sur les cellules a été développé pour expliquer la destruction des cellules *in vitro*. Compte tenu de la propagation du champ électrique à l'intérieur des organes, on

peut s'attendre à un effet destructif similaire à l'intérieur des tissus tumoraux.

Des chercheurs de l'Université de Peterborough (Canada) ont tenté de reproduire une étude visant à tester les effets du rayonnement émis par un téléphone sans fil sur la variabilité de la fréquence cardiaque. Les résultats étaient similaires à ceux de l'étude précédente. Ils montrent que certaines personnes sont très sensibles aux fréquences électromagnétiques générées par une station de base de téléphone sans fil à 2,4 GHz. Cette étude, réalisée en double aveugle, contrôlée par *placebo*, confirme les effets observés dans l'étude précédente (augmentation du rythme cardiaque, changements dans le contrôle sympathique et parasympathique du système nerveux autonome). Les résultats démontrent que le rayonnement micro-ondes pulsées affecte le système nerveux autonome et peut entraîner une gêne chez certaines personnes souffrant de problèmes cardiaques préexistants lorsqu'elles sont exposées à des fréquences électromagnétiques auxquelles elles sont sensibles.

EFFETS BIOLOGIQUES

MÉTHODOLOGIE

Un grand nombre d'études a été mené depuis le début des années 80, afin de définir des critères d'évaluation des effets biologiques des champs électromagnétiques (cancer, système immunitaire, reproduction, système nerveux). L'existence d'un risque induit par l'exposition aux rayonnements électromagnétiques ne peut pas être complètement écartée. Sa reconnaissance est liée à la difficulté de reproductibilité des études effectuées dans différents laboratoires et à la qualité limitée de

l'évaluation dosimétrique des différentes expériences. Le développement d'études expérimentales est ainsi encore nécessaire pour mettre en évidence des effets qui soient reproductibles (sur la transmission neuronale, sur le système nerveux central). Et la mise au point d'une dosimétrie *in vivo* et *in vitro* est une exigence indispensable pour caractériser les expositions humaines. De plus, l'utilisation de modèles biologiques appropriés (culture de cellules primaires, souris génétiquement sélectionnées), la mise en œuvre de bonnes pratiques de laboratoires, assorties de procédures correctes, est requise pour obtenir des résultats valides. Par ailleurs, l'effet des ondes électromagnétiques en fonction de l'âge des animaux doit également être pris en compte avec prudence. Seules quelques études concernant la différence de l'effet des ondes électromagnétiques de hautes fréquences sur les animaux jeunes et adultes ont été menées. L'équipe de chercheurs du Centre de recherche Casaccia de l'ENEA (*Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente* - Italie) a présenté les justifications et les procédures nécessaires à des études *in vitro* et *in vivo* de haute qualité dans le domaine du bio-électromagnétisme, sur des modèles expérimentaux humains.

ELF

La compréhension des mécanismes biologiques qui expliquent l'interaction des champs magnétiques d'extrêmement basses fréquences (0 à 300 Hz) avec l'activité cérébrale humaine est un domaine de recherche actif. Cette connaissance est nécessaire pour les organismes internationaux qui établissent des lignes directrices pour l'établissement de recommandations pour le grand public

et l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques ELF comme l'ICNIRP (Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants). Ces mécanismes physiologiques peuvent de plus être exploités pour améliorer les traitements qui utilisent des courants de stimulation magnétique transcrânienne dans un nombre croissant de troubles neurologiques. De nombreux défis existent dans l'identification de ces mécanismes d'interaction, tels que la présence d'artefacts induits par l'exposition elle-même aux rayonnements électromagnétiques lors de la surveillance des signaux biologiques. L'utilisation de modèles biophysiques, basés sur des systèmes d'équations mathématiques décrivant l'activité électrique ou métabolique du tissu cérébral, est devenue de plus en plus importante pour remédier à ces problèmes. En effet, ces modèles permettent de simuler la façon dont les tissus du cerveau interagissent avec les ondes électromagnétiques.

RADIOFRÉQUENCES

Un des effets supposés des rayonnements électromagnétiques radiofréquences (3 kHz à 300 GHz) est leur influence sur la qualité du sommeil. Une étude sur le sujet a été effectuée. Le nombre de paramètres analysés a été restreint aux 13 variables recommandées en 2007 par l'AASM (*American Academy of Sleep Medicine*) pour les observations cliniques, dont notamment : le temps de sommeil total (TST), la latence d'endormissement, l'indice de l'efficacité du sommeil, les réveils après l'endormissement et le temps passé dans les différents stades du sommeil. L'analyse des données montre qu'il existe des différences individuelles non expliquées dans les paramètres du sommeil. Une amélioration signi-

ficative du sommeil lors d'exposition aux radiofréquences pendant l'étape N1 du sommeil (endormissement) a été démontrée.

Une équipe française de chercheurs de l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), de l'Université Picardie-Jules Verne et de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale) a étudié la circulation cérébrale interne chez des jeunes sujets en bonne santé suite à une exposition aiguë au téléphone mobile. La vitesse du flux sanguin cérébral a été mesurée au moyen d'un Doppler transcrânien, instrument de diagnostic non invasif. Il s'agissait de comparer le débit sanguin cérébral dans chaque hémisphère (exposé et non-exposé) avant, pendant et après l'exposition au téléphone mobile (20 mn). Les données n'ont montré aucun changement significatif des paramètres caractérisant la circulation cérébrale interne pendant l'exposition. Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec prudence car des effets biologiques et neurophysiologiques mineurs peuvent en effet ne pas être détectables par les outils utilisés actuellement.

APPLICATIONS MÉDICALES DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

ABLATION DES TUMEURS

Les propriétés diélectriques des tissus jouent un rôle important dans l'évolution des technologies utilisées pour le diagnostic et le traitement des tumeurs. La mise en place d'un traitement pour l'ablation d'un tissu tumoral par microondes nécessite une connaissance précise de l'interaction des champs électromagnétiques avec le tissu cible. S'il existe diverses études

Effets biologiques des rayonnements électromagnétiques : 7^e Conférence internationale

sur les propriétés diélectriques des tissus sains, peu de données sont encore disponibles concernant les tissus tumoraux. Des chercheurs de l'Université de Malte ont présenté des résultats préliminaires sur les propriétés diélectriques des tissus tumoraux chez le rat et le chien dans la plage de fréquences 500 MHz à 20 GHz.

Par ailleurs, une grande variabilité existe entre les données caractérisant les propriétés diélectriques des tissus sains. Elle pourrait être attribuée en partie au manque de répétitivité dans les moyens de mesure utilisés. Pour pallier cette difficulté, une méthode de mesure sur des matériaux de référence bien caractérisés comme le méthanol et l'éthylène-glycol a été présentée par une équipe de l'Université de Malte.

Une équipe du département de physique de l'Université Aristote de Thessalonique a simulé une ablation par radiofréquence. Le modèle recouvre de véritables scénarios cliniques dans trois tissus humains, à savoir, le foie, le poumon et le rein. Ils ont été appliqués à des tailles différentes des tumeurs (1 à 3 cm) avec des tensions variables de source (10 à 30 V).

Enfin, l'utilisation de l'effet analgésique des champs électromagnétiques a souvent été montrée mais le mécanisme biologique réel en cause reste inconnu, même si plusieurs théories ont été proposées et testées avec des résultats plus ou moins contradictoires. Le *Bioelectromagnetic group* (Malte) et le *Lawson Health Research Institute* (Canada) ont réalisé une relecture « critique » des résultats des études sur ce thème. Ils en déduisent que :

- les recherches sur l'homme doivent être réalisées pendant la période de sommeil nocturne et les résultats doivent être comparés avec ceux expérimentaux obtenus

lors de périodes d'inactivité des rats ;

- toutes les recherches doivent être réalisées en double aveugle et faire l'objet d'une « observation critique » périodique.

TROUBLES NEUROLOGIQUES

La stimulation transcrânienne à courant continu (STCC) est une technique non invasive qui utilise directement un courant de faible amplitude pour moduler l'excitabilité cérébrale. Son application possible aux neurosciences cliniques, dans l'éventuelle détection pharmacologique et indolore de troubles neurologiques, a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Une étude a été réalisée par l'Institut ISIB CNR (*Institute of Biomedical Engineering*) de Milan afin d'évaluer le champ électrique et la distribution de la densité de courant dans des tissus spécifiques lors d'une STCC et lors d'une stimulation transcutanée à courants continus (tsDCS) au moyen de méthodes informatiques appliquées à des modèles humains d'âge et de sexe différents. Cette étude confirme que l'utilisation de la STCC et de la tsDCS pour le traitement de différents troubles neurologiques ne peut se faire sans la connaissance des champs électriques et des densités de courant à l'intérieur des tissus humains. Les modèles de calcul serviront de cadre clé dans l'élaboration de stratégies de stimulation électrique et de poursuite des études, et deviendront ainsi un outil utile dans l'optimisation de l'électrothérapie clinique. Ils pourront également servir de base pour expliquer les mécanismes possibles d'interactions sur lesquels sont fondées ces techniques.

Des équipes du *Lawson Health Research Institute* et de l'Université de Western (Canada) ont présenté des résultats de modélisation biophysique concernant les effets d'une

ligne à haute tension (60 Hz en Amérique du Nord) sur l'activité du cerveau humain. Les chercheurs ont apporté la preuve qu'une exposition au champ magnétique 60 Hz pourrait se traduire par une modulation de la plasticité cérébrale synaptique ayant des résultats comportementaux détectables. L'utilisation de ces résultats vers une thérapie ciblant des troubles neurologiques caractérisés par des changements anormaux dans la plasticité synaptique du cerveau est en cours, constituant une avancée thérapeutique prometteuse. La modélisation biophysique est un outil idéal pour atteindre cet objectif.

Une étude réalisée en Estonie visait à évaluer l'effet de l'exposition à des rayonnements de type « micro-ondes » sur des patients souffrant de troubles dépressifs. Un groupe de patients dépressifs a été exposé pendant 30 min à un rayonnement 450 MHz modulé à une fréquence de 1 000 Hz. Les chercheurs se sont intéressés à la dimension fractale Higuchi (FD) en tant que mesure d'évaluation de l'effet des facteurs de stress externes périodiques sur les oscillations électriques dans le cerveau. Des changements statistiquement significatifs (baisse de la valeur de la FD Higuchi) ont été observés mais l'effet a disparu après 5 minutes.

CONSOLIDATION, CICATRISATION, RÉCUPÉRATION

Les champs électromagnétiques sont utilisés fréquemment lors de soins chirurgicaux et notamment dans le traitement de retard de consolidation de fractures et de cicatrisation de plaies chroniques. Du fait d'une meilleure compréhension de leur mécanisme d'action, des avancées technologiques dans l'utilisation thérapeutique

des champs électromagnétiques de moyenne fréquence ont été développées récemment pour le traitement des douleurs postopératoires et des œdèmes. De nouvelles applications concernant le traitement clinique de l'arthrose, la chirurgie au niveau du cerveau, l'ischémie cardiaque, des lésions cérébrales traumatiques sont ainsi à l'étude. Une équipe du département de génie biomédical de l'Université de Columbia et de l'École de chirurgie orthopédique de New-York a suggéré, en examinant les données récentes, une explication du mécanisme de réponse des cellules aux signaux champs électromagnétiques non-thermiques de faible intensité. Les résultats d'essais cliniques pilotes, couplés avec ceux d'essais sur des cellules animales tendent à prouver que les champs électromagnétiques pourraient être un messager dans de nombreux systèmes biologiques. D'après une étude des départements de biologie et de physiothérapie du Collège de Staten Island (New-York), l'exposition à des champs magnétiques associés à une activité neuronale accrue renforce la récupération fonctionnelle après une lésion de la moelle épinière. Le temps d'exposition et les paramètres de la stimulation magnétique auraient une importance fondamentale sur cette récupération.

ÉVALUATION DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

DIRECTIVES

Les directives internationales concernant l'évaluation des effets biophysiques de l'exposition aux champs électromagnétiques générés par des sources comme les pinces industrielles de soudage par résistance, les équipements de soudage à l'arc ou les combinés mobiles de commu-

nication sans fil demandent d'évaluer le champ électrique induit (E_m) ou l'énergie absorbée (DAS : débit d'absorption spécifique de l'énergie) dans le corps du travailleur. Les procédures les plus utilisées pour ces évaluations impliquent des simulations numériques. L'exposition aux champs électromagnétiques émis par les appareils de communication sans fil se réfère généralement au cas où le corps humain est dans le voisinage de sources de champ localisé relativement faible alors que, dans le cas de dispositifs industriels, les travailleurs sont souvent présents dans le voisinage de sources de grandes dimensions, émettant des champs relativement importants. Dans certains cas, il y a même contact physique du torse ou des membres du travailleur avec ces sources. Les protocoles de simulation numérique appliqués à ces deux cas d'exposition sont par conséquent différents. L'élément indispensable est l'utilisation d'un fantôme numérique du corps humain. Les procédures d'évaluation du E_m et du DAS en vue de l'analyse du respect des limites d'exposition sont normalisées, mais il manque une norme spécifiant les caractéristiques des fantômes simulant la réponse électromagnétique du corps humain. Une équipe polonaise a effectué une analyse sur les propriétés de plus de 30 fantômes numériques du corps humain utilisés dans des études récemment publiées relatives à l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques pour diverses sources. La conclusion de cette étude est que la normalisation du cahier des charges et des paramètres des fantômes numériques du corps humain est nécessaire.

Les directives concernant l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences limitent la valeur des taux d'absorption spé-

cifiques (DAS) pour éviter une augmentation excessive de la température centrale. Une modélisation thermique basée sur l'équation de Pennes, améliorée en tenant compte de la dépendance complexe du temps des réponses thermorégulatrices, a été utilisée par une équipe autrichienne pour étudier la relation entre le DAS et l'augmentation de la température centrale. Il a pu être démontré que la relation entre le DAS et l'augmentation de température varie considérablement à travers le corps. La modélisation thermique en fonction du temps des processus de thermorégulation démontre que le dépassement des restrictions de base concernant le DAS ne conduit pas à une élévation de température délétère. Toutefois, pour les points chauds locaux, l'évaluation à partir du DAS n'est pas représentative des variations de température locales.

LIGNES ÉLECTRIQUES

Des mesures de densité de puissance de champs électromagnétiques dans la gamme de fréquences 700 à 2 500 MHz ont été effectuées par une équipe de l'université de Ciudad Juárez (Mexique) sur leur ville dont le territoire a été divisé en 112 zones. Les valeurs de champs ont été comparées aux nombres de cas de cancers relevés dans ces zones. Tous les résultats des mesures de densité de puissance étaient nettement inférieurs à la plupart des réglementations internationales basées sur les effets thermiques. Selon l'auteur, cette étude a révélé une corrélation positive entre les valeurs de la densité de puissance maximale cumulée mesurées par zone et les nombres totaux de cas de cancers enregistrés dans les mêmes zones. L'auteur rappelle néanmoins qu'une corrélation significative n'entraîne pas forcément un lien de cause à effet.

Il suggère d'appliquer des règles de précaution et de ne pas se limiter aux effets thermiques.

RADIOFRÉQUENCES

Les mécanismes des effets non-thermiques indésirables des rayonnements non ionisants sur les tissus vivants et le corps humain ne sont toujours pas élucidés et font l'objet de nombreuses discussions. En particulier, le paramètre caractérisant la forme d'onde pourrait être le plus influent. Une hypothèse examine la capacité potentielle des tissus vivants à démoduler un signal et conclut sur l'importance d'étudier quelques composantes de faible fréquence, voire de très faible modulation. Un autre point de vue plus « global » se réfère uniquement à une influence cumulée de tous les composants car le corps humain pourrait ne pas être capable de discriminer les différentes fréquences dans le spectre du signal.

Les effets des champs électromagnétiques sur la santé humaine sont une préoccupation pour une partie de l'opinion publique. En particulier, le caractère « pulsé » des rayonnements émis par les systèmes de télécommunication sans fil, à un niveau inférieur aux valeurs limites définies par les normes de sécurité, est parfois présenté comme un facteur de risque supplémentaire. Il n'y a actuellement aucun consensus scientifique quant aux critères permettant de distinguer sans ambiguïté les formes d'ondes pulsées et non-pulsées. En effet, les signaux rayonnés par les systèmes de télécommunications sans fil présentent des formes d'ondes diverses qui dépendent fortement de caractéristiques techniques, telles que la modulation, la synchronisation, la multiplicité des accès et la puissance. L'exposition à des porteuses multiples

crée une enveloppe « champ électromagnétique » différente de celle de l'exposition à porteuse unique. Par exemple, si plusieurs signaux de même amplitude et de fréquences différentes sont présents, leur sommation montre des variations de grande amplitude (jusqu'à plusieurs dB). L'analyse de plusieurs systèmes de télécommunication sans fil a été réalisée en considérant une exposition unique et multiporteuse afin de tenir compte des cas similaires de sources rayonnantes sur le même site.

EXPOSITION AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

EXPOSITION PROFESSIONNELLE

APPLICATIONS MÉDICALES

Les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilisent des champs magnétiques statiques et des champs électromagnétiques variant dans le temps pour obtenir des informations diagnostiques chez le patient. De nombreux examens nécessitent l'administration de produits pharmaceutiques appelés « produits de contraste », qui doivent être administrés au patient lors de l'examen. Les infirmières qui réalisent les injections de ces produits aux patients sont par conséquent exposées à ces champs magnétiques. Les mesures de distribution spatiale des champs magnétiques statiques à proximité d'aimants d'IRM et de l'exposition du personnel infirmier ont été réalisées. Au cours d'un examen, le temps d'exposition de l'infirmière à un champ statique supérieur à 0,5 mT varie entre 0,5 et 1,5 min. Lorsque les patients ont besoin de plus d'attention, l'exposition peut dépasser parfois 10 minutes. L'ex-

position au champ magnétique statique au voisinage d'un aimant IRM dépend à la fois de la densité de flux magnétique du champ principal (applicable au patient) et de sa construction.

Une étude a été réalisée sur 267 individus exposés à des champs électromagnétiques médicaux variant de façon aléatoire pendant le temps de travail. Cette étude aurait permis d'expliquer des problèmes de vertige et de sensation de malaise existants dans ce groupe professionnel. D'après les auteurs, ce résultat pourrait être utilisable pour l'établissement de critères de sécurité concernant l'installation et l'utilisation des diverses sources de champs électromagnétiques dans les salles de physiothérapie.

Le développement de la technologie RFID (*radiofrequency identification*) et l'élévation des niveaux de référence des champs électromagnétiques de fréquence extrêmement basse (ELF) et de fréquence intermédiaire (FI) ont entraîné une augmentation croissante des demandes d'évaluation de dosimétrie de l'exposition et d'évaluation des risques sanitaires de la surveillance électronique d'objets (EAS ou *Electronic article surveillance*). Une étude a été effectuée sur les champs électromagnétiques émis par les RFID actuellement disponibles à différentes fréquences. Des études numériques ont été réalisées à partir de modèles anatomiques de patients porteurs de stimulateurs cardiaques et/ou de défibrillateurs cardiaques implantés. Les interférences électromagnétiques ont été analysées quantitativement. Les effets indésirables de la modulation de phase d'un système EAS sur un cardiodéfibrillateur implantable ne peuvent pas être exclus. Cependant, leur probabilité d'occurrence dépend de la fréquence des champs

électromagnétiques utilisés et de la conception des systèmes EAS.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les ondes électromagnétiques émises par les équipements industriels sont susceptibles d'exposer les opérateurs à des champs électromagnétiques supérieurs aux limites définies par la Directive 2004/40/CE. Une étude initiée et conduite par les membres d'un groupe de travail associant des CARSAT/CRAM et l'INRS a permis d'identifier les équipements industriels les plus rayonnants et de les classer en 7 familles : le chauffage par induction, les magnétiseurs, la magnétoscopie, l'électrolyse, le soudage par résistance, le soudage par pertes diélectriques, les micro-ondes. L'effectif d'équipements par famille a été estimé par une enquête de marché qui a dénombré notamment plusieurs dizaines de milliers de machines du type « soudage par résistance » ou « magnétiseurs ». Cette enquête a permis de déduire qu'au moins 100 000 opérateurs seraient susceptibles d'être exposés, dans les entreprises françaises, aux champs électromagnétiques. Le second objectif de l'étude était de dresser un bilan par famille d'équipements des valeurs d'exposition des opérateurs à leur poste de travail. Les champs électromagnétiques auprès de 635 postes de travail ont été mesurés ; pour chaque mesure, un indice de sévérité a été calculé, égal au rapport entre la valeur mesurée et la valeur déclenchant l'action (VDA) associée recommandée par la Directive. Les résultats montrent que pour 7 familles d'équipements, 25 à 50 % des mesures donnent des valeurs de champs supérieures à la VDA correspondante. Enfin, le troisième objectif de l'étude consistait à recenser les moyens de préven-

tion. La plupart du temps, la réduction de l'exposition s'obtient par un éloignement du poste de travail de la source rayonnante. Des solutions techniques existent sur certains équipements : blindage pour les fours « micro-ondes » et les presses « hautes fréquences », patin de masse pour le soudage de bâches... Une étude a été réalisée par le *National centre of public health and analysis* (Bulgarie) sur des applications émettant des rayonnements électromagnétiques dont la fréquence était inférieure à 100 kHz et susceptibles de provoquer des effets non-thermiques (poste de transformation de puissance, centrale hydro-électrique, chauffage par induction, poste de transformation dans les bâtiments). Les intensités de champs magnétiques mesurées sont dans tous les cas inférieures aux valeurs fixées par l'ICNIRP mais peuvent parfois dépasser certaines valeurs limites nationales (des différences significatives existant d'un pays à l'autre). En ce qui concerne les valeurs de l'intensité du champ électrique, elles dépassent les valeurs de référence ICNIRP dans les postes de transformation 400 kV. De même, ces dernières sont dans tous les cas dépassées pour les porteurs de dispositifs médicaux implantés lors d'un examen IRM mais les mécanismes qui pourraient les expliquer ne sont pas clairs. L'effet thermique des rayonnements de fréquences supérieures à 100 kHz est avéré et prédominant. On considère que des effets non-thermiques peuvent apparaître suite à l'exposition à ces fréquences. Si de solides preuves de leur existence sont apportées, elles devront être examinées plus avant et prises en compte dans le développement des limites d'exposition, conduisant également à une plus grande harmonisation

des limites d'exposition à travers le monde, et notamment au niveau de la directive européenne. En effet, les différentes valeurs limites recommandées sont le résultat d'interprétations différentes de la prise en compte des effets non thermiques.

DISPOSITIFS PARTICULIERS

TÉLÉPHONIE

Les intensités de champ électrique à proximité des stations de base de téléphonie (RBS) peuvent être mesurées en utilisant un matériel coûteux et sophistiqué, ou être calculées à l'aide de logiciels de simulation. Une étude réalisée par des équipes australiennes a conclu que la modélisation et la simulation devraient être considérées comme des méthodes valables pour estimer les niveaux maximaux potentiels de champs électromagnétiques dans l'environnement. En effet, les niveaux mesurés et simulés sont quelquefois différents mais les niveaux simulés ne sous-estiment pas significativement les niveaux mesurés ; dans la plupart des cas, les niveaux simulés surestiment les niveaux mesurés, fournissant ainsi une estimation prudente des émissions de champ des installations. Une équipe de chercheurs hollandais a élaboré un modèle d'exposition aux stations de base de téléphonie. Cette méthode permet, à partir de l'emplacement et des caractéristiques techniques des stations de base dans un quartier et de la propagation du signal d'antenne à l'habitation d'un riverain (distance, densité de logements, végétation), de calculer le taux de pénétration des signaux des téléphones mobiles dans une pièce. En ce qui concerne le téléphone portable, des mesures ont été réalisées dans une grande voiture, équipée de 4 sièges passager, au

Effets biologiques des rayonnements électromagnétiques : 7^e Conférence internationale

niveau des assises et de la tête sur un parking, loin de toute source de rayonnement, pendant une phase de sonnerie du téléphone (valeur pic). Les résultats principaux de ces mesures sont que le champ électrique le plus élevé est mesuré à côté du combiné et qu'il est de 30 % plus élevé quand le véhicule roule. Les risques associés aux radiofréquences émises par les antennes de téléphonie mobile pour lesquelles les travailleurs effectuent des tâches de maintenance peuvent résulter du rayonnement provenant de services de radiodiffusion publics, de l'exploitation du mât porteur ou d'autres mâts dans les environs immédiats. Deux études de cas ont révélé que les seuils ont été dépassés du fait des ondes électromagnétiques réémises depuis le corps en acier du mât ou de l'acier utilisé pour réaliser les différentes antennes montées sur la tour. Ce rayonnement peut être considérablement réduit :

- en diminuant la longueur de l'élément passif rayonnant. Elle doit être très inférieure au quart de la longueur d'onde FM concernée,
- en changeant l'orientation de l'élément de structure par rapport à la polarisation de l'antenne concernée.

Les dosimètres électromagnétiques sont largement utilisés pour protéger les travailleurs contre l'exposition aux champs électromagnétiques, mais aussi pour les études dosimétriques. Ces dosimètres sont portés sur le corps et émettent un signal sonore lorsque de fortes expositions sont rencontrées ; certains ont des fonctions d'enregistrement de données. Une méthode d'essai utilisant un fantôme torse-tête en silicium massif caoutchouté pour tester les performances des dosimètres isotropes portés sur le corps, a été présentée. Les résultats de

l'étude ont porté sur un dosimètre disponible dans le commerce et sur les techniques d'évaluation des propriétés diélectriques du matériau fantôme. Les tests effectués sur le dosimètre indiquent que la performance isotrope est meilleure quand le dispositif est porté à l'avant du torse (par rapport au côté du torse). À des fréquences micro-ondes, l'écran doit être du côté de la personne qui fait face à l'émetteur pour permettre une lecture de données correcte.

DIVERS

Le débat concernant les risques pour la santé associés à l'utilisation de dispositifs paralysants électriques pour l'autodéfense et de pistolets paralysants pour la police pour neutraliser des sujets (tels que les pistolets à impulsion électrique) est actuellement controversé. La réponse des cellules à des décharges transitoires et l'exposition ventriculaire électrique ont été étudiées à partir de calculs réalisés sur des modèles numériques appliqués à des cellules et des tissus musculaires cardiaques. Les seuils d'excitation et de fibrillation ont été déterminés, les risques évalués en fonction de l'emplacement du choc électrique, du volume cardiaque exposé et de la probabilité de fibrillation estimée. Les résultats des modèles testés, en mode « contact » et en mode « fléchettes » permettent de conclure à l'existence d'un risque potentiel de fibrillation.

Une étude a été réalisée pour démontrer l'effet de l'âge sur l'absorption d'énergie électromagnétique par les tissus cérébraux. Pour ce faire, une évaluation comparative de l'absorption de l'énergie électromagnétique par des modèles de tête « adultes » et « enfants » exposés à une petite antenne hélicoïdale à 1 800 MHz a été effectuée. Les résultats révèlent que l'absorption

d'énergie électromagnétique par les tissus cérébraux est beaucoup plus élevée lorsque le téléphone est tenu en position verticale. Les résultats en positionnement « toucher » (appareil tenu en position lecture de l'écran) donnent des valeurs d'absorption plus faibles quel que soit l'âge.

RÈGLEMENTATION

Les recherches sur les effets éventuels sur la santé dus à une exposition à des champs électromagnétiques ont débuté il y a plus de 50 ans dans de nombreux pays. Toutes les populations sont aujourd'hui exposées aux champs électromagnétiques à des degrés divers. Les niveaux de champs vont continuer d'augmenter avec les progrès technologiques. Dans de telles conditions, même un effet qui paraîtrait mineur, lié à l'exposition aux champs électromagnétiques, pourrait constituer un enjeu majeur de santé publique. Face au développement croissant des téléphones mobiles, des inquiétudes dans certaines populations ont été exprimées quant au risque accru de cancers et aux autres effets néfastes dus à l'exposition aux champs électromagnétiques. En réponse à cette question, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a lancé un projet international en 1996 pour les preuves scientifiques des effets possibles des champs électromagnétiques sur la santé. Sur la base de connaissances scientifiques, le ministère des Affaires intérieures et des Communications du Japon a formulé des « *Lignes directrices pour la protection de l'exposition contre les rayonnements radioélectriques* ». Les valeurs normalisées énoncées dans ces lignes directrices correspondent aux valeurs publiées par l'ICNIRP en 1998. Les valeurs limites des directives qui existent en matière d'expo-

sition aux radiofréquences sont essentiellement fondées sur les effets thermiques. Les normes de protection fixent généralement des limites locales pour la tête, le tronc et les membres, beaucoup plus élevées que celles fixées pour l'ensemble du corps. De nombreux groupes scientifiques recommandent une révision des normes existantes. Dans les différentes normes, la limite de référence est choisie en fonction de l'énergie, si la période d'exposition est inférieure au temps de moyennage et en fonction de la puissance. En fait, il existe un large éventail de valeurs limites fonction du temps de moyennage, selon le pays qui édite la norme.

Le plus grand pourcentage de pays possédant des normes de protection se trouve en Europe. La plupart de ces pays exige la conformité à ces normes, pour les autres, en petit nombre, elle est facultative. Les normes existantes sont, dans la majorité des cas, similaires ou plus strictes que les références ICNIRP, malgré quelques exceptions. Certains pays ne possèdent que les normes générales pour le public, tandis que d'autres ont à la fois des normes « grand public » et des normes « travailleurs », c'est le cas de la France. Les normes de sécurité utilisées au Canada et aux États-Unis sont proches des recommandations ICNIRP.

POUR EN SAVOIR +

○ De SÈZE R, COURTIN C, GRUET P, BECKER A ET AL. - Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques.

Guide d'évaluation. Édition INRS ED 6136. Paris : INRS ; 2013 : 33 p.

○ Champs électromagnétiques. Limiter les niveaux d'exposition professionnelle.

INRS, 2012 (www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/champ-electromagnetique.html)