

Effets biologiques et sanitaires des rayonnements non ionisants

Paris, 24-25 janvier 2011

La section Rayonnements non ionisants (RNI) de la Société française de radioprotection (SFRP) a organisé à Paris, les 24 et 25 janvier 2011, deux journées consacrées aux effets biologiques et sanitaires des RNI. Ces journées, qui ont réuni environ 150 personnes, ont consacré une large place aux applications de recherche, étape indispensable à une meilleure compréhension des effets biologiques des RNI. Sont ici résumés les principales communications relatives aux travaux de recherche ou à la réglementation. Un développement particulier est accordé aux ondes térahertz.

Aspects réglementaires et recommandations

Les implications de 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), ont été présentées par **S. Lebéricy** (Groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, Paris). L'application de cette directive est prévue dès le 30 avril 2012. Son objectif est de limiter l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques de 0 à 300 GHz, en raison des effets secondaires connus à court terme dans le corps humain. Des valeurs limites d'exposition et des valeurs déclenchant l'action sont définies suivant les différentes gammes de fréquences.

De ce fait, cette directive limite le nombre d'exams d'imagerie par résonance magnétique (IRM) nécessitant un contact rapproché du personnel soignant avec les patients et l'appareil à résonance magnétique nucléaire. C'est le cas lors de procédures interventionnelles et d'exams de patients « vulnérables » (patients sous anesthésie générale, enfants), mais aussi dans le cadre de travaux de recherche.

L'exposition à des champs électromagnétiques lors de l'IRM n'entraîne pas d'effet secondaire grave pour la

santé des travailleurs ; les effets notés sont : stimulation nerveuse périphérique, vertiges, sensation de goût métallique, action cardiovasculaire par effet magnétohydrodynamique (augmentation de la pression artérielle de l'ordre de 3 % non perçue par le sujet) ou magnétophosphènes (scintillements lumineux apparaissant dans le champ visuel). C'est en fait le risque « projectile » qui est le plus important en IRM.

Dans ce cadre, la Commission européenne semble envisager la possibilité de dispenser le secteur de la résonance magnétique médicale de l'obligation de respecter ces valeurs limites d'exposition. La santé et la sécurité des travailleurs demeurent protégées par l'ajout de mesures de prévention et celui de protections qualitatives.

Les nouvelles recommandations de l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) relatives aux champs électromagnétiques statiques et de basse fréquence ont été exposées par **B. Veyret** (Laboratoire de l'intégration du matériau au système - IMS -, Bordeaux). Leur objectif est de limiter les stimulations nerveuses et musculaires par ces champs. Aussi, des restrictions de base ont été définies pour la population générale et celle des travailleurs en utilisant la grandeur « champ électrique interne » ($V.m^{-1}$), au lieu de la grandeur « densité de courant interne » ($A.m^{-2}$), en fonction de la fréquence (Hz). Ces restrictions prennent en compte la survenue de magnétophosphènes vers 20 Hz. Elles diffèrent également en

G. GAGNA*,
Y. GANEM**

* Service de protection radiologique des armées
** Département Études et assistance médicales, INRS



Documents pour le Médecin du Travail
N° 127
3^e trimestre 2011

fonction de l'exposition sur le système nerveux central et sur le reste du corps.

Enfin, l'ICNIRP considère que les données scientifiques actuellement disponibles pour affirmer que l'exposition prolongée à des champs magnétiques basses fréquences (50/60 Hz) présente un lien de causalité avec un risque accru de leucémies chez l'enfant, ne sont pas assez solides pour servir de base à une limitation de l'exposition. En particulier, si la causalité n'est pas établie, une réduction de l'exposition ne produira aucun bénéfice pour la santé.

Études au niveau cellulaire et chez l'animal

Les effets sur le rat juvénile des ondes radiofréquences (RF) émises par les antennes de relais de téléphonie mobile ont été rapportés par **A. Pelletier** (UMI Peritox-Ineris, UPJV, Amiens). Cette exposition semble perturber la thermorégulation (dissociation des températures cutanée et caudale), le cycle veille/sommeil et le comportement alimentaire (hyperphagie). Ceci est plus particulièrement constaté lorsque l'exposition aux ondes RF est associée à une élévation significative de la température ambiante. Ces observations suggèrent une perturbation des échangeurs périphériques cutanés qui auraient tendance à conserver la chaleur au lieu de l'éliminer normalement.

Les résultats partiels de la première étude portant sur l'exposition de rates gestantes à un signal Wi-Fi (débit d'absorption spécifique maximum de 5 W.kg^{-1}) et l'apparition de marqueurs de stress ont été présentés par **I. Lagroye** (Laboratoire IMS, Bordeaux). Cette exposition n'a entraîné aucune différence statistique entre le groupe exposé et le groupe contrôle pour le poids des rates au cours de la gestation ou pour la taille des portées. Il n'a pas été observé de différence significative entre les groupes quant aux marqueurs cérébraux de stress chez les ratons. De même, dans le sang des ratons de 2 jours, le nombre d'érythrocytes immatures présentant des micronoyaux (autre marqueur de toxicité) n'était pas différent entre les groupes. D'autres résultats sont en attente.

Les micro-ondes de forte puissance peuvent servir à inhiber les systèmes électroniques ou à neutraliser des manifestations de foules (perception de chaleur par échauffement d'origine indéterminée pouvant les déstabiliser psychologiquement). **R. de Sèze** (UMI Peritox-Ineris, Verneuil-en-Halatte) a présenté les effets d'une

exposition chronique de rats à des micro-ondes de forte puissance, en dessous du seuil thermique de 4 W.kg^{-1} , associée à une exposition de rayons X résiduels liés aux caractéristiques de l'émetteur. Cette étude a montré une augmentation de l'incidence des tumeurs chez les rats et une diminution de leur durée de vie.

Effets chez l'homme

M. Souques (EDF, Paris) a rapporté l'expérience de **A. Legros** (*Lawson health research institute*, Ontario) de mesure de **l'activité cérébrale après exposition à un champ magnétique de 3 000 micro Teslas (μT) à 60 Hz**. Dans cette expérimentation en double aveugle, des images fonctionnelles du cerveau ont été collectées pendant que les sujets effectuaient une tâche de tapping (ouverture/fermeture rythmique de la pince pouce/index) avant et après exposition à ce champ magnétique. Les sujets exposés présentaient un niveau d'activation plus élevé au niveau du cortex somatosensoriel primaire et du cervelet pour effectuer le tapping, suggérant ainsi une action du champ magnétique au niveau des circuits sensitifs plutôt qu'au niveau des circuits moteurs.

De récentes expertises collectives (Organisation mondiale de la santé - OMS -, 2007, *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* - SCE-NIHR -, 2009) ont conclu à l'existence d'une association statistique observée entre l'augmentation du risque de leucémie infantile et une exposition aux champs magnétiques de très basse fréquence supérieurs à $0,4 \mu\text{T}$ en moyenne sur 24 heures. Toutefois, ces mêmes expertises signalent que le mécanisme de survenue n'est pas connu. C'est dans ce cadre que **I. Magne** (EDF, Moret-sur-Loing) a relaté **l'étude EXPERS portant sur la mesure de l'exposition aux champs magnétiques de 50 Hz** d'un échantillon représentatif de la population française (1 000 enfants de 0 à 14 ans et 1 000 adultes de 15 ans et plus). Il s'agit de la première étude d'exposition personnelle d'une population à l'échelle d'un pays. Chaque sujet a porté pendant 24 h un appareil EMDEX II qui a mesuré et enregistré toutes les 3 secondes, pendant 24 heures, les champs magnétiques de 40 à 800 Hz. Les résultats ont été exprimés en moyenne arithmétique (MA) et en moyenne géométrique (MG).

Concernant les enfants, la MA sur 24 heures est égale à $0,09 \mu\text{T}$ et la MG égale à $0,02 \mu\text{T}$. En MA, 30 enfants (3,1 %) ont une moyenne supérieure à $0,4 \mu\text{T}$ (en MG : 2 enfants).

Concernant les adultes, la MA sur 24 heures est égale à $0,14 \mu\text{T}$ et la MG égale à $0,03 \mu\text{T}$. En MA, 11 adultes (1 %) ont une moyenne supérieure à $1,54 \mu\text{T}$.

Les sources liées aux valeurs élevées sont à 80 % des radioréveils, aussi bien pour les enfants que les adultes. L'étude du champ magnétique hors période de sommeil montre que 1,1 % des enfants ont une MA supérieure à 0,4 μ T, ce qui est plus conforme aux données de la littérature.

Des facteurs favorisant une exposition moyenne plus élevée ont été identifiés : résider à proximité des lignes aériennes à haute tension, des réseaux ferrés électrifiés, dans une ville de plus de 2000 habitants et dans un appartement. Les expositions moyennes augmentent aussi avec le temps passé dans les transports ferroviaires, dans les centres commerciaux (pour les adultes), sur ordinateur et la densité de population du département. Néanmoins, ces facteurs ne permettent pas d'expliquer, à eux seuls, les expositions moyennes.

L'étude sera poursuivie en incluant la présence, ou non, de lignes et postes électriques de distribution.

L'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS), ou intolérance environnementale idiopathique, a fait l'objet d'une présentation par **J.P. Marc-Vergnes** (Institut national de la santé et de la recherche médicale- INSERM, Toulouse). Cette intolérance regroupe un ensemble de plus de 40 symptômes subjectifs (maux de tête, troubles du sommeil ou de concentration) pour lesquels aucune relation de causalité n'a été, jusqu'à présent, démontrée. Seule la survenue d'un effet *nocebo*, inverse de l'effet *placebo*, a été constatée chez des personnes exposées et dites sensibles. Des facteurs neuropsychiques individuels à type de personnalité vulnérable semblent intervenir, au moins en partie, dans la genèse de cette EHS.

Le médecin du travail est incité à dépister ces troubles auprès des travailleurs exposés et les orienter, si besoin, vers une consultation spécialisée dans un service de pathologie professionnelle.

Suite à la directive européenne 2005/32/CE, établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie, **les diodes électroluminescentes (LEDs) et les lampes compactes fluorescentes (CFLs) vont progressivement remplacer les sources tungstène.**

Ces sources d'éclairage de basse énergie privilégient, afin d'obtenir un rendement optimum, la portion bleue du spectre visible (400-500 nm). **J.P. Césarini** (expert pour l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail - ANSES, Maisons-Alfort) a abordé les effets de ce rayonnement bleu aux niveaux oculaire et cutané.

Sur le plan oculaire, des atteintes rétinienne peuvent survenir avec un vieillissement prématuré de la rétine. La participation de ce rayonnement à l'apparition de la dégénérescence maculaire liée à l'âge est soup-

connée, de même pour l'aggravation de rétinopathies préexistantes et de myopies. Il est à noter que le cristallin des enfants de moins de 8 ans ne filtre pas la lumière bleue.

Par ailleurs, l'exposition à une forte intensité de LED se traduit par un risque de réduction de la contraction pupillaire et de perturbation de l'horloge biologique avec des conséquences métaboliques et thymiques (dépression, troubles de l'humeur...).

Sur le plan cutané, une part significative du rayonnement visible pourrait majorer les agressions du rayonnement ultraviolet solaire impliqué dans la carcinogenèse cutanée et l'héliodermie (vieillesse extrinsèque).

Ainsi, chez des sujets dits « photosensibles », ces émissions d'éclairage moderne pourraient aggraver ou déclencher certains états pathologiques. Ces sujets sont, notamment, les enfants, les aphakes ou pseudo-aphakes, les patients ayant des pathologies oculaires et cutanées, les patients consommant des médicaments photosensibilisants et, sur le plan professionnel, les installateurs éclairagistes, les métiers du spectacle...

Dès lors, il convient d'attirer l'attention sur les risques de ces éclairages de substitution (lampes dites « lumière du jour », LEDs et CFLs). Des recommandations peuvent être émises :

- éviter de regarder fixement les sources lumineuses,
- mettre en place les dispositifs d'éclairage indirect ou filtrer les sources halogènes,
- maintenir à distance raisonnable les sources CFLs ou LEDs,
- être vigilant vis-à-vis des sources de multiples LEDs disposées en panneaux,
- déconseiller, pour les enfants de moins de 8 ans l'usage des LEDs dans l'éclairage des pièces à vivre, dans les jouets, consoles...

Dans le cadre du travail ou de l'éclairage public, les risques potentiels liés à ces nouvelles technologies peuvent être maîtrisés par la formation des installateurs. Par contre, la maîtrise de ces risques, dans le domaine privé (habitation...) est moins aisée, la diffusion de l'information à la population générale n'étant pas facile.

Les effets des rayonnements UVA et UVB naturels ou artificiels ont fait l'objet d'exposés par **T. Douki** (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - CEA, Grenoble) et **I. Tordjman** (Institut national du cancer - INCa, Paris).

Le rayonnement ultraviolet (UV) de la lumière solaire est le principal agent impliqué dans l'induction de tumeurs cutanées. Les UVA et les UVB sont des génotoxiques sans effet de seuil. Ils produisent des altérations de l'ADN pour des doses inférieures à celles déclenchant le signal d'alerte qu'est l'érythème ou « coup de soleil ».

C'est la dose cumulée d'UV naturels et artificiels qui détermine le risque cancérigène global notamment pour les carcinomes épidermoïdes. La période, l'inten-

sité de l'exposition aux UV et les facteurs liés à l'hôte semblent interagir fortement.

L'évolution des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires liés aux UV a conduit le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) à classer, en juillet 2009, les UVA, UVB et les UV émis par les appareils de bronzage artificiel dans le groupe 1 des agents cancérogènes pour l'homme (cancérogènes certains) au même titre que le soleil. Les UVA sont reconnus génotoxiques, à un moindre degré que les UVB, et leur rôle est principalement à craindre dans le cadre d'exposition à des sources artificielles (salons de bronzage) ou en cas d'une photoprotection trop centrée sur les UVB.

Les données épidémiologiques récentes affirment l'existence d'une relation entre risque de mélanome et exposition aux UV artificiels. Dans une méta-analyse publiée en 2006, le CIRC met en évidence un excès de risque relatif (RR = 1,15 ; IC 95 % [1,00-1,31]) pour des personnes ayant déjà été exposées aux UV artificiels par rapport à celles n'ayant jamais été exposées. Ce risque relatif est même plus élevé (RR = 1,75 ; IC 95 % [1,35-2,26]) pour une première exposition avant l'âge de 35 ans.

Les ondes térahertz (THz)

DÉFINITION

J.L. Coutaz (Centre national de la recherche scientifique - CNRS, université de Savoie) a situé les ondes THz dans le spectre électromagnétique.

Les ondes THz occupent le domaine du spectre électromagnétique situé entre l'infrarouge et les hyperfréquences, à la frontière entre les disciplines de l'optique et de l'électronique. Les longueurs d'onde de ces rayonnements sont comprises entre 50 μm et 3 mm, soit, en termes de fréquences, entre 100 GHz et 20 000 GHz (20 THz).

Ce domaine spectral est aujourd'hui sujet de multiples études car d'une part il existe, au moins en laboratoire, des sources et détecteurs performants développés grâce à de nouvelles technologies, d'autre part les applications entrevues sont nombreuses et prometteuses.

INTERACTION ENTRE LA MATIÈRE ET LE RAYONNEMENT THZ

L'énergie des photons THz est comprise entre 0,4 et 40 meV, soit des niveaux beaucoup plus faibles que

ceux impliqués dans les transitions entre états électroniques des atomes ou molécules (~ 1 eV) ou que les énergies de vibration moléculaire (40 ~ 100 meV). Les ondes THz ne sont donc capables que d'exciter des résonances de faible énergie au sein de la matière. Pour les molécules à l'état gazeux, il s'agira de rotations de la molécule ou d'une partie de la molécule, ou bien, suivant la taille de la molécule, de vibrations mettant en jeu l'ensemble de la molécule. L'interaction onde THz - molécule sera intense lorsque la molécule portera un fort moment dipolaire ; c'est le cas des molécules d'eau. Pour la matière solide, plusieurs types d'excitation se produisent aux fréquences THz : vibrations collectives du cristal (phonons) ou excitations électroniques.

De manière pratique, chaque fois qu'une résonance est susceptible d'être excitée dans le domaine THz, l'onde THz est absorbée et le matériau est opaque. De plus, si ces résonances sont assez étroites du point de vue spectral, la réponse spectrale THz porte la signature spécifique du matériau.

SOURCES ET DÉTECTEURS

Les sources THz peuvent être réparties suivant différentes familles, selon qu'elles sont continues ou impulsives, cohérentes ou incohérentes, basées sur des techniques électroniques ou optiques.

Les détecteurs de rayonnement THz sont de 2 types :

- les détecteurs d'énergie qui sont des bolomètres,
- les détecteurs de champs ou détecteurs optoélectroniques qui se divisent en 2 familles : celle pour qui l'exposition d'un semi-conducteur ultrarapide à une impulsion laser et à un champ THz crée un courant, et celle des cristaux électro-optiques dont l'indice de réfraction varie avec le champ électrique appliqué.

Pour en savoir plus : « Optoélectronique térahertz » sous la direction de J.L. Coutaz, EDP Sciences, 2008, 350 p.

APPLICATIONS

J.L. Coutaz, M. Zhadobov et al. (Institut d'électronique et de télécommunications, Rennes) et **G. Gallot** (École polytechnique, Palaiseau) ont abordé les applications du rayonnement THz développées grâce aux caractéristiques suivantes :

- le caractère non ionisant du rayonnement,
- la transparence à ces fréquences de matériaux opaques en lumière visible et/ou en infrarouge,
- le traitement ultrarapide de signaux,
- la signature spectrale originale et unique de certaines molécules dans le domaine THz.

Les applications industrielles se déclinent principa-

lement autour de l'observation à l'intérieur ou à travers des objets opaques.

L'inspection à l'intérieur de matériaux permet la détection de défauts dans les objets fabriqués : verre, métaux, blocs de plastique, mauvais collage de deux matériaux, ou dans les aliments comme le chocolat.

Les faisceaux THz facilitent également l'observation de reliefs à la surface d'objets ou de matériaux dont les profondeurs sont inférieures ou de l'ordre de 100 µm.

Le secteur agroalimentaire utilise ce type de rayonnement à des fins d'analyse physicochimique (exemple : teneur en pesticides ou en autre produit dangereux dans des substances alimentaires).

Dans le domaine de la biologie, les ondes THz ont l'avantage, par rapport aux rayons X, de ne pas altérer les échantillons. Aussi, ils permettent l'étude par spectroscopie des protéines ou de l'ADN et, à l'échelle cellulaire, l'étude de l'eau, des ions et de la membrane.

Les applications biomédicales sont variées. Cette technologie peut assurer la détection de maladies de la peau dont le mélanome. La détection de caries dentaires, quant à elle, est une voie de recherche de même que l'utilisation des ondes THz à visée thérapeutique (effets hypoalgésiques, anti-inflammatoires, stimulation du système immunitaire). Enfin, l'analyse de l'homogénéité de la couche protectrice des cachets médicamenteux, paramètre important pour la durée de vie des médicaments et la diffusion du principe actif dans l'organisme des patients, est une application d'avenir.

Pour les services de sécurité, l'intérêt réside dans la production d'imagerie permettant de détecter des armes (scanners corporels), explosifs, drogues et gaz létaux.

Dans le domaine de l'électronique, les applications concernent le contrôle des semi-conducteurs de type wafer* et des circuits microélectroniques, les communications sans fil de longue portée (avec des antennes très près ou sur la peau) mais aussi la radioastronomie et les radars (radars automobiles, radars militaires).

EFFETS BIOLOGIQUES

Le développement des applications liées aux ondes THz va s'accompagner d'une majoration importante et chronique de l'exposition des utilisateurs.

De plus, certains de ces rayonnements sont absents de l'environnement naturel et les organismes vivants n'y ont encore jamais été exposés, soulevant la question des risques sanitaires potentiels liés à leur utilisation. L'exposition aux ondes millimétriques induit une absorption très localisée de l'énergie électromagnétique (essentiellement par la peau), ce qui peut conduire à une élévation de température et à un débit d'absorp-

tion spécifique assez élevé, même pour des valeurs de densité de puissance incidente relativement faibles. Les vêtements peuvent perturber de façon significative l'absorption.

Les travaux pionniers sur les effets biologiques suggèrent que des interactions THz-vivant peuvent générer des effets, les molécules cibles potentielles étant les lipides, les protéines et l'ADN. Des études complémentaires sont toutefois nécessaires pour mieux connaître l'impact sur la santé des sujets exposés.

RECOMMANDATIONS

Les deux commissions qui émettent des recommandations sanitaires sur les rayonnements non ionisants sont l'ICNIRP et l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

Ainsi, l'ICNIRP recommande qu'entre 10 et 300 GHz la densité de puissance liée à une exposition professionnelle soit inférieure à 50 W.m⁻², le public étant limité à 10 W.m⁻². Au-delà de 300 GHz, la limite pour des expositions de la peau de moins de 10 secondes dans l'infrarouge lointain est, en termes de radiance, $H = 20\,000\ t^{1/4}\text{ J.m}^{-2}$ (t en seconde). Cette limite n'est pas spécifique au milieu professionnel.

Pour l'IEEE, la densité de puissance entre 30 et 100 GHz est limitée à 10 W.m⁻². Entre 100 et 300 GHz, cette densité de puissance est limitée suivant la formule suivante : $(90 f_G - 7\,000) / 200\text{ W.m}^{-2}$ (f_G étant la fréquence en GHz). De même, cette limite n'est pas spécifique au milieu professionnel.

Lorsque de nouvelles connaissances scientifiques seront disponibles concernant les expositions au-delà de 300 GHz, ces recommandations seront revues.

* Wafer : disque de silicium sur lequel sont gravés les circuits intégrés.