HAL
open science

Médecine du travail et champs électromagnétiques

René de Seze

To cite this version:

René de Seze. Médecine du travail et champs électromagnétiques. 3. Congrès national de Radioprotection (SFRP 2001), Jun 2001, Tours, France. ineris-00972357

HAL Id: ineris-00972357

https://ineris.hal.science/ineris-00972357

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEDECINE DU TRAVAIL ET CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Dr René de SEZE

INERIS

INTRODUCTION

De nombreux secteurs professionnels, industriels ou non, sont concernés par des expositions aux champs électromagnétiques (CEM). Les sources les plus intenses sont constituées par les presses à hautes fréquences (HF) ; les plus répandues sont depuis quelques années les antennes relais de stations de base de radiocommunications cellulaires de type GSM. Après un rappel sommaire des paramètres pertinents pour la bonne compréhension de cet exposé, les principales sources de CEM seront indiquées, ainsi que les niveaux de champ susceptibles d'être rencontrés aux postes de travail. Les mécanismes d'interaction des champs seront indiqués en fonction des gammes de fréquences considérées, puis les effets biologiques ou sanitaires qui peuvent en découler. Les résultats des études épidémiologiques seront synthétisés. Les organismes de normalisation seront présentés, ainsi que les recommandations utilisées en France et en Europe.

PARAMETRES PERTINENTS

Le premier critère de classification des champs électromagnétiques est leur fréquence. On distingue schématiquement :

les champs statiques ou constants, de fréquence nulle ;

les champs d'extrêmement basse fréquence (ELF : 0-300 Hz), typiquement ceux liés à l'électricité industrielle ou domestique, à 50 Hz en Europe, 60 Hz en Amérique du Nord ;

les champs radiofréquences (RF), de 10 MHz à 300 GHz, dont la partie supérieure constitue les microondes (300 MHz-300 GHz)

entre ces deux dernières catégories ont été définies les fréquences intermédiaires (300 Hz-10 MHz)

Deux autres types de paramètres peuvent être définis : les paramètres d'exposition, qui sont les paramètres mesurables au poste de travail, et les paramètres "de dose", qui sont les grandeurs impliquées dans un effet biologique et qui correspondent à la dose absorbée.

Les paramètres d'exposition sont le champ électrique, en volts par mètre (V/m ou $V.m^{-1}$), le champ magnétique, en ampères par mètre (A/m) ou en teslas (T), et le rayonnement

électromagnétique constitué par une combinaison des deux, exprimé en watts par mètre carré (W/m^2).

Les paramètres de dose seront décrits après avoir introduit les mécanismes d'interaction.

La puissance des machines est souvent mentionnée, en kilowatts (kW) ou en mégawatts (MW); ce paramètre peut être relié à l'intensité des champs émis seulement si ces machines sont conçues pour rayonner, ce qui n'est souvent pas le cas. Et même lorsque cela se produit, le rayonnement dépend de la configuration des appareils, du blindage, etc. Pour des systèmes de structure comparable, le champ peut être évalué de façon comparative en fonction de leur puissance; dans tous les autres cas, la puissance ne permet pas d'évaluer l'intensité des champs électromagnétiques.

SOURCES ET NIVEAUX DE CEM DANS LES ENTREPRISES

Champs électriques statiques

En milieu industriel, il est possible de rencontrer des champs électriques statiques de quelques kV/m dans les entreprises qui distribuent ou utilisent du courant électrique continu. Dans les bureaux, le champ électrique est de l'ordre du V/m à quelques dizaines de V/m au maximum près des appareillages alimentés en Haute Tension (HT), des appareils et objets qui se chargent et des consoles de visualisation. En comparaison, le champ naturel par beau temps est de 150 V/m ; par temps d'orage, il peut atteindre 100 V/m à 10 kV/m, soit des valeurs équivalentes aux valeurs maximum que l'on peut rencontrer en milieu industriel.

Champs magnétiques statiques

Les champs magnétiques statiques les plus intenses en milieu professionnel sont ceux liés aux aimants permanents ou à des courants constants très élevés. On en recontre dans l'industrie de la **Fabrication des aimants** ; dans le **Domaine scientifique**, à proximité des accélérateurs de particules, des systèmes de lévitation magnétique et des appareils d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (RMN) et surtout de spectroscopie RMN où les champs peuvent atteindre 12 à 15 T ; et enfin dans l'**Industrie de l'aluminium**, en raison des courants importants utilisés dans les cuves d'électrolyse. A proximité immédiate de ces applications, le champ peut typiquement atteindre quelques dizaines à une centaine de milliteslas (mT). La valeur limite recommandée à longueur de journée est de 200 mT. En comparaison, le champ terrestre statique est en moyenne de 50 µT.

Champ électrique ELF

Les champs électriques ELF en entreprise sont compris entre 0,03 et 1,5 kV m^{-1} pour un grand nombre d'installations électriques, en particulier près des transformateurs et des lignes de transport d'énergie électrique.

A l'extérieur, les champs les plus intenses sont rencontrés sous les lignes à haute tension, où l'intensité est fonction de la tension : 4 à 6 kV m^{-1} au niveau du sol sous une ligne de 250 kV, 7 à 10 kV m^{-1} sous une ligne de 400 kV. Les normes indiquent une valeur limite d'exposition professionnelle à 50 Hz de 10 kV/m.

Champ magnétique ELF

Comme pour les champs statiques, les champs magnétiques ELF sont engendrés par les courants; les principales applications sont le chauffage par induction (fréquence inférieure à 10 kHz), les presses électriques, et les soudeuses. Les normes indiquent une valeur limite d'exposition professionnelle à 50 Hz de 500 microteslas (µT).

Champs Radiofréquences

Deux mécanismes principaux différencient les applications des champs radiofréquences : l'électrothermie par induction et l'électrothermie par effet diélectrique. L'objectif de ces applications est l'absorption du champ dans un matériau traité.
Un troisième domaine est celui des radiocommunications, où l'objectif est la propagation du champ à distance, si possible sans absorption avant d'atteindre le récepteur (antennes).

Principe de l'Electrothermie par induction

Tout corps conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une tension électrique induite à l'origine d'un courant électrique producteur de chaleur par effet joule. Les fréquences concernées sont comprises entre 50 Hz et plusieurs MHz, les puissances électriques des applications sont de l'ordre du kW, voire du MW. Cet effet s'applique principalement sur les matériaux bons conducteurs : métallurgie.

Secteurs d'activités utilisant l'Electrothermie par induction

De très nombreux secteurs d'activités utilisent des champs électromagnétiques. Pour l'électrothermie par induction, citons les suivants :

Industrie sidérurgique et travail des métaux

- Fusion ou affinage métallique dans des fours à canal ou à creuset

- Recuit et formage de certains aciers
- Traitement de surface des métaux pour une trempe superficielle
- Soudage ou brasage de précision en orfèvrerie

Industrie électronique

- Fusion pour l'affinage des microcristaux de germanium ou de silicium (semi-conducteurs)
- Dégazage de certaines pièces (électrodes des tubes électroniques)
- Création de plasma pour le travail de certaines pièces ou le perçage de céramiques

Secteurs scientifique et médical

- Accélérateurs de particules
- Création d'un confinement magnétique pour obtenir une fusion thermonucléaire contrôlée
- Spectroscopie RMN à haut champ et résonance paramagnétique électronique RPE
- Magnétohydrodynamie

Principe de l'Electrothermie par effet diélectrique

Tout matériau diélectrique placé dans un champ électrique se charge électriquement. Si le champ est alternatif, les inversions répétées de charges soumises aux frottements dus à la viscosité du milieu sont source d'échauffement. Les fréquences utilisées dans ces applications sont en moyenne plus élevées, entre 3 MHz et 3 GHz. Cet effet s'applique sur les matériaux faiblement conducteurs, dits en physique diélectriques ou "à pertes".

Secteurs d'activités en Electrothermie par effet diélectrique

Les principales applications de l'Electrothermie par effet diélectrique sont :

Travail du bois

- Séchage ou fermage des pièces de bois
- Collage des bois (contre-plaqués, agglomérés et autres panneaux laminés)

Industries textile, papetière, des caoutchoucs et des plastiques

- Séchage, découpage et formage des produits textiles et papetiers, des céramiques ou des produits vitreux
- Durcissage, formage, moulage et vulcanisation des caoutchoucs.
- Formage, découpage, moulage et soudage des matières thermoplastiques

Bâtiment et travaux publics

- Accélération de la prise du béton ou traitement des schistes bitumeux
- Séchage des carreaux de plâtre

Industrie agro-alimentaire

- Four à micro-ondes domestique ou industriel
- Appareils de déparasitage des céréales et autres produits agricoles

Secteurs médical et paramédical

- Instruments chirurgicaux : le bistouri électrique
- Appareils de diathermie ou d'hyperthermie
- Matériels de physiothérapie (émission souvent pulsée)

Radiocommunications

Les radiocommunications constituent l'utilisation principale des CEM : radiodiffusion, télévision, radiotéléphone, câbles hertziens, télémesure, radiobalisage ou radars civils et militaires. Les fréquences utilisées sont comprises entre 10 kHz et 300 GHz. Pour ces applications, les puissances d'émission permettent d'évaluer l'intensité des champs en prenant en compte la distance à la source et la focalisation plus ou moins importante du faisceau. Elles vont de quelques mW à plusieurs GW. En raison de la distance aux émetteurs, seules des circonstances accidentelles à proximité de la source dans le faisceau du rayonnement peuvent donner lieu à une surexposition conséquente.

Résultats obtenus lors des campagnes de mesures INRS

Il y a plusieurs années, l'INRS avait réalisé une campagne de mesures aux postes de travail à proximité des électrolyseurs et des fours à induction, ainsi qu'autour des installations électrothermiques industrielles radiofréquences et hyperfréquences. En l'absence de normes d'émission et d'exposition antérieure, les installations de cette période dépassaient fréquemment de 30% les valeurs limites définies depuis par l'ICNIRP.

Installations radiofréquences

Sur 230 machines à 27 MHz, seulement 30 % présentaient des champs électriques maximaux inférieurs aux limites recommandées par l'ICNIRP (IRPA à l'époque). Les autres, pour la plupart des machines anciennes contrôlées avant 1985, produisaient des champs électriques supérieurs à 61 V/m. Trente-sept machines utilisaient des fréquences différentes, sachant que la valeur limite est variable en dessous de 10 MHz[1] : à 4 MHz, toutes les valeurs étaient

---

[1] puis stable de 10 à 400 MHz, à nouveau variable de 400 MHz à 2 GHz, et stable ensuite au-delà de 2 à 300 GHz

inférieures aux valeurs limites; à 8 MHz, seule une machine présentait une valeur légèrement supérieure; à 13,5 MHz, 7 machines sur 18 dépassent cette valeur; et à 40 MHz, les 3 machines présentent des niveaux supérieurs à 61 V/m.

Les machines les plus récentes étaient toutes conformes aux recommandations, indiquant ainsi une nette amélioration des conditions d'exposition.

Installations hyperfréquences

Les valeurs d'exposition à 1 m étaient systématiquement inférieures à 5 mW/cm². Le risque d'exposition principal concerne la tête et les yeux, et est exclu lorsque les normes d'émissivité de la CEI sont respectées, à savoir moins de 5 mW/cm² à 5 cm des parois. Les valeurs de fuite ne dépassaient pas cette valeur autour de 62 % des installations, tandis que deux cas présentaient des valeurs entre 55 et 70 mW/cm².

Depuis 20 ans, les nouvelles machines respectent les spécifications CEI et les niveaux d'exposition ont nettement diminué, satisfaisant ainsi aux valeurs limites définies par l'ICNIRP, comme l'attestent les mesures publiées dans la littérature récente.

MECANISMES D'INTERACTION

Il faut distinguer les mécanismes d'interaction validés par l'expérience et la théorie ("mécanismes classiques"), de ceux hypothétiques, dont la théorie n'est pas consistante ni confirmée par l'expérience.

Mécanismes d'interaction classiques

Les mécanismes connus mis en jeu par les champs électriques statiques sont les effets de force sur les particules chargées : les ions dans l'organisme; les effets sur la membrane : amplification transmembranaire par polarisation interfaciale.

Les mécanismes mis en jeu par les champs magnétiques statiques sont les effets sur les ions : c'est la classique force de Lorentz; les effets magnéto-mécaniques; les interactions électroniques (effet Zeeman).

Les mécanismes mis en jeu par les champs ELF, électriques ou magnétiques, sont les courants induits, exprimés par la densité de courant qu'ils produisent. Cette densité de courant, appelée "j", est proportionnelle au champ électrique, qu'il soit induit directement par un champ électrique externe ou indirectement par un champ magnétique externe. Elle s'exprime en

ampères par mètre carré (A/m^2), et constitue un des paramètres à l'origine d'effets biologiques compris. C'est pourquoi la densité de courant constitue un des paramètres de dose présentés au début de cet exposé. C'est également dans les métaux le paramètre déterminant de l'électrothermie par induction.

Des courants induits peuvent également être produits indirectement dans les individus par l'intermédiaire d'une masse métallique exposée à un champ électrique.

Le principal mécanisme mis en jeu par les champs électromagnétiques RF dans les systèmes biolgiques est l'absorption diélectrique, qui se manifeste sous forme d'un échauffement du milieu exposé (associé en physique aux pertes d'énergie du rayonnement qui en résultent). Cette absorption est exprimée par la puissance absorbée par unité de masse de tissu, appelée DAS (débit d'absorption spécifique), en watts par kilogramme (W/kg), et constitue un deuxième paramètre de dose.

Mécanismes théoriques

Des effets biologiques ont été décrits, qui ne peuvent pas être expliqués par les mécanismes précédents. Ils ont donné lieu à la conception de mécanismes théoriques d'interaction des champs statiques et ELF, en particulier sur le mouvement des ions dans les systèmes biologiques et sur la cinétique des réactions chimiques de type radicalaire. De même, des mécanismes théoriques d'interaction des champs RF ont été suggérés, mais sans fondements solides ni confirmation expérimentale.

EFFETS BIOLOGIQUES

De nombreux effets biologiques sont expliqués par les mécanismes connus. Quelques-uns ne le sont pas.

Champs statiques

Par exemple, dans la gamme des champs statiques, le redressement des poils chez l'homme sous l'effet d'un champ électrique statique est bien connu et peut facilement être expliqué par les charges électrostatiques qu'il produit. Moins évidents à comprendre sont une modification de l'électrocardiogramme sous l'effet de champs magnétiques statiques intenses tels ceux de l'IRM, ou la dépendance vitale de bactéries magnétotactiles par rapport à la direction du champ magnétique terrestre. Il a également été montré que l'orientation des pigeons et des abeilles pouvait dépendre du champ magnétique terrestre, et que le fonctionnement électrophysiologique ou le métabolisme de l'épiphyse était sensible à des champs d'aussi

faible intensité que le champ terrestre. Des champs plus intenses peuvent modifier une réaction enzymatique (système enzymatique B12-Ethanolamine Ammonia Lyase).

Champs ELF

Plusieurs effets biologiques des champs magnétiques ELF peuvent être expliqués par les courants induits : c'est le cas par exemple de la magnétoneurostimulation utilisée en médecine. La perception de sensations colorées sous exposition à un champ magnétique alternatif (magnétophosphènes) peut également être expliquée par ce phénomène.

D'autres effets des champs ELF ne sont pas expliqués par ces mécanismes. C'est le cas en particulier d'effets également observés avec des ELF sur la sécrétion de mélatonine. Mais plusieurs études récentes réfutent ces résultats. Des effets sur les flux transmembranaires d'ions calcium ne sont pas non plus clairement expliqués. Leur réplication semble nécessaire, avant d'envisager d'évaluer leurs conséquences sanitaires éventuelles. De tels effets pourraient expliquer l'efficacité contestée de la magnothérapie. Il s'agit d'une application thérapeutique de champs magnétiques pulsés. Une indication est maintenant acceptée par les académies médicales française et américaine : le traitement de la pseudarthrose (fracture pathologique).

Plusieurs études épidémiologiques ont indiqué une association des champs magnétiques ELF avec la leucémie de l'enfant. Il n'existe pas de mécanisme validé qui permette d'envisager une relation de cause à effet sur cette association de faible niveau (O.R. moyen = 1,5).

Champs RF

Dans la gamme des champs RF, les courants induits par l'intermédiaire d'une masse métallique exposée à un champ électrique sont bien compris, mais parfois difficiles à maîtriser. De même, les accidents de surexposition par échauffement excessif sont bien compréhensibles, mais leur rareté les rend difficiles à connaître, à traiter et à prévenir. Le risque de cataracte, fréquemment évoqué, n'a jamais été observé dans des conditions environnementales ou professionnelles, même au décours d'accidents de surexposition. Les effets sur la barrière hémato-encéphalique sont facilement compréhensibles à des niveaux thermiques, mais certains auteurs ont décrit des effets à des niveaux non thermiques qui nécessitent d'être étudiés plus en détail. La stimulation auditive des micro-ondes fait intervenir une expansion thermo-élastique du liquide céphalo-rachidien liée à un échauffement minime qui se produit dans un temps extrêmement court.

Des modifications neurologiques et comportementales se produisent lorsque la température corporelle augmente de plus de 0,5°C, ce qui correspond à un DAS de 4 W/kg moyenné sur

l'ensemble du corps. Ce sont les manifestations nocives les plus sensibles qui aient pu être mises en évidence à ce jour. C'est à partir de ces effets qu'ont été définis les valeurs limites d'exposition, visant à limiter le DAS en dessous de 0,4 W/kg pour l'exposition professionnelle et 0,08 W/kg pour l'exposition de membres du public.

Une meilleure compréhension des phénomènes expérimentaux observés passe inévitablement par une caractérisation précise de d'exposition. De même, l'évaluation d'un risque pour des individus exposés nécessite une bonne connaissance de l'exposition.

NORMES ET RECOMMANDATIONS

Les organismes chargés de l'étude de la santé évaluent le risque des champs électromagnétiques en fonction de leur intensité dans les différentes gammes. C'est le cas de l'OMS au niveau international, de la Direction Santé-Consommateurs de l'Union Européenne, et de la Direction Générale de la Santé en France. Un organisme de radioprotection international spécialisé dans les rayonnements non-ionisants, l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionising RadioProtection) a défini les niveaux limites de dose précédemment indiqués, avec l'appui consultatif de son homologue national : la section RNI de la Société Française de RadioProtection (SFRP). Ces valeurs ont été validées en ce qui concerne l'exposition du public par la Commission Européenne dans sa recommandation du 12 juillet 1999. Les valeurs limites d'exposition se rapportant aux champs mesurables en ont été déduites de façon conservative, c'est-à-dire en tenant compte des conditions les plus défavorables que l'on puisse rencontrer[2]. Ces valeurs obéissent dans certaines gammes de fréquences à des équations complexes ; c'est pourquoi un logiciel d'utilisation interactif est en cours de réalisation pour faciliter leur détermination.

Les valeurs les plus utiles sont celles aux fréquences couramment rencontrées, soit dans la gamme des ELF à 50 Hz et dans la gamme des radiofréquences à 27 MHz et 2,45 GHz pour les applications industrielles et à 900 et 1800 MHz pour les radiocommunications (Tableaux 1 et 2).

---

[2] et pas seulement imaginer!

Fréquence	j (mA/m²)	DAS (W/kg)	E (V/m)	B (µT)
50 Hz	10	-	10 000 = 10 kV/m	500
27 MHz	-	0,4	61	0,20
900 MHz	-	0,4	90	0,30
1800 MHz	-	0,4	127	0,42
2,45 GHz	-	0,4	137	0,45

Tableau 1. Valeurs limites recommandées pour l'exposition professionnelle à des valeurs fréquemment rencontrées

Fréquence	j (mA/m²)	DAS (W/kg)	E (V/m)	B (µT)
50 Hz	2	-	5 000 = 5 kV/m	100
27 MHz	-	0,08	28	0,092
900 MHz	-	0,08	41	0,138
1800 MHz	-	0,08	58	0,195
2,45 GHz	-	0,08	61	0,20

Tableau 2. Valeurs limites recommandées pour l'exposition du public à des valeurs fréquemment rencontrées

Les paramètres de dose ne sont pertinents que dans la gamme de fréquences dans laquelle les mécanismes qui les sous-tendent sont influents : courants induits à 50 Hz, absorption diélectrique aux RF. L'effet biologique qui sous-tend le DAS est l'échauffement : il est constant quelle que soit la fréquence ; l'échauffement produit par une intensité de champ donnée dépend de la fréquence : c'est pourquoi la valeur limite d'exposition du champ diffère selon la fréquence. Dans la gamme de 27 MHz à 2,45 GHz **et dans cette gamme seulement**[3], l'absorption diminue lorsque la fréquence augmente, ce qui schématiquement autorise des valeurs limites de plus en plus élevées.

Ces recommandations servent ensuite de base à l'établissement de normes génériques, spécifiques, ou de classes d'appareillages qui sont élaborés par les organismes de

[3] plus précisément de 400 MHz à 2 GHz ; c'est le contraire entre les ELF et 10 MHz!