



## CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DE LA DOSIMÉTRIE À LA SANTÉ HUMAINE

### Évaluation expérimentale partielle des restrictions de base en gamme HF / VHF

#### Partial Assessment of basis restrictions in the HF / VHF band

*Denis Favet\*, José Ribeiro\*, Jean-Marc Sayous\*, Yannick Conejero\*, Stéphanie Mandle\*, Alexandre Laisné\**

*\*DGA Techniques aéronautiques, 47 rue Saint Jean, BP 93123, 31131 Balma Cedex,  
prenom.nom@dga.defense.gouv.fr*

Mots-clefs : courant induit, DAS, DREP, gamme HF / VHF, restrictions de base.

Key Words : induced current, SAR, HERP, HF / VHF band, basis restrictions.

#### Résumé

Cet article présente une évaluation expérimentale partielle des restrictions de base DREP (Dangers des Rayonnements Electromagnétiques non ionisants sur les Personnels) dans la bande HF / VHF. Cette évaluation est réalisée dans les conditions maîtrisées du laboratoire, et repose sur des mesures thermographiques et ampère-métriques sur un mannequin anthropomorphique.

#### 1. Introduction

La tenue des niveaux de référence DREP (Danger des Rayonnements Electromagnétiques sur le Personnel) en champ électrique et magnétique spécifiés par l'instruction du Ministère de la Défense [1] peut ne pas être atteinte dans certaines configurations opérationnelles d'utilisation d'émetteurs HF et VHF de forte puissance. Afin de garantir la sécurité des personnels utilisant ce type de radio, il est nécessaire de vérifier la conformité de ces systèmes vis-à-vis des restrictions de base. En bandes HF et VHF doivent être considérés : la densité de courant induit  $J$  sur la tête et le tronc, moyennée sur  $1 \text{ cm}^2$ , le Débit d'Absorption Spécifique (DAS) sur le corps entier, et le DAS localisé sur 10 g de tissus contigus évalué, respectivement pour l'œil, la tête et le tronc, et les membres. A partir des principes généraux d'évaluation numérique de ces restrictions donnés par des normes civiles [2], la DGA a proposé une méthodologie également adaptée à l'environnement militaire en bandes HF et VHF [3]. Cependant, il n'existe pas aujourd'hui de protocole normatif détaillé pour évaluer expérimentalement l'ensemble des restrictions en dessous de 30 MHz.

Cet article propose une première évaluation expérimentale partielle des restrictions de base à partir de mesures thermographiques et ampère-métriques réalisées sur un mannequin anthropomorphique. Après avoir présenté les caractéristiques électromagnétiques et thermiques du liquide contenu dans le mannequin [4], les mesures de DAS et de courant sont comparées, respectivement à la simulation numérique et à l'état de l'art [5, 6, 7, 8]. L'article conclut sur les limitations méthodologiques rencontrées.

#### 2. Méthodologie

Le mannequin anthropomorphique est placé sous une ligne TEM générant un champ électrique polarisé verticalement (voir Figure 1), ce qui constitue le pire cas de couplage dans la bande considérée. Le mannequin est rempli d'un liquide dont les propriétés électromagnétiques de 30 MHz à 6 GHz (conductivité  $\sigma$  et permittivité relative  $\epsilon_r$ ) sont équivalentes aux tissus humains au sens de la norme [4]. Afin de pouvoir comparer les expérimentations aux calculs sur toute la bande HF et VHF, les propriétés de ce liquide ont été caractérisées entre 1 MHz et 30 MHz (voir Figure 2) à l'aide d'un RLC-mètre équipé d'un kit spécifique pour liquide.



Figure 1 : Montage d'essai

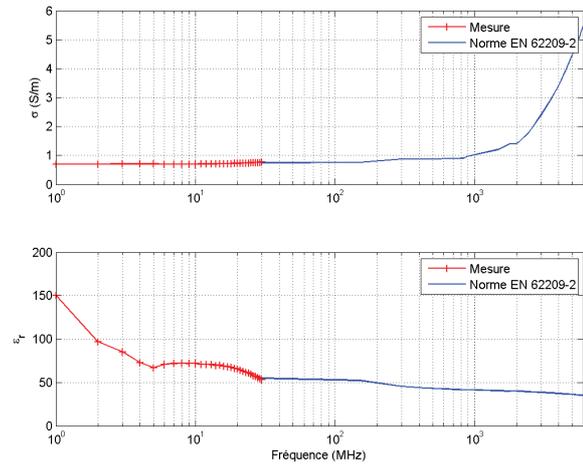


Figure 2 : Propriétés électromagnétiques du liquide

Lorsque le mannequin est soumis à une agression électromagnétique CW calibrée (de l'ordre de 100 V/m efficace), la mesure thermographique par caméra infrarouge en fonction du temps permet d'évaluer le DAS à partir de la relation suivante :

$$DAS = c_p \cdot \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{t \rightarrow 0} \quad (1)$$

avec  $\Delta T$  l'élévation de température en K et  $\Delta t$  la durée d'exposition en secondes. La capacité thermique massique du liquide  $c_p$  a été mesurée à  $3640 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  par le laboratoire de mesure physico-chimique de DGA Techniques aéronautiques.

La caméra mesure l'élévation thermique à partir de laquelle il est possible d'extraire des échauffements localisés. La Figure 3 donne un profil de température en fonction du temps au niveau de la cheville du mannequin, pour une illumination à  $f=50 \text{ MHz}$ . L'évaluation de la pente dans l'équation (1) doit être réalisée au moment du déclenchement de l'illumination électromagnétique. En pratique, de façon à extraire les mesures du bruit, la pente moyenne a été prise en compte comme l'indique la Figure 3.

La Figure 4 présente le mannequin sous test, la mesure thermique associée à un instant  $t$ , ainsi qu'un exemple de DAS calculé à partir de la dérivée des mesures de température.

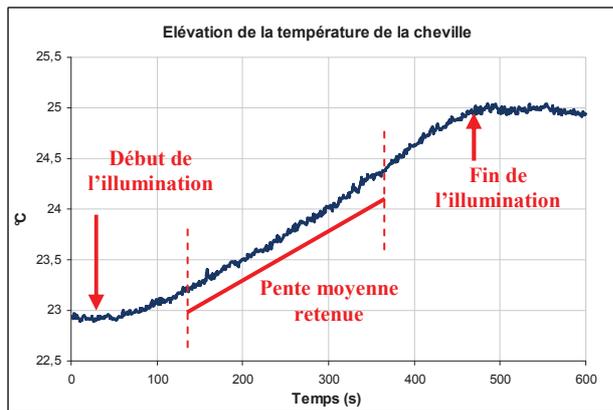


Figure 3 : Elévation de la température de la cheville à 50 MHz

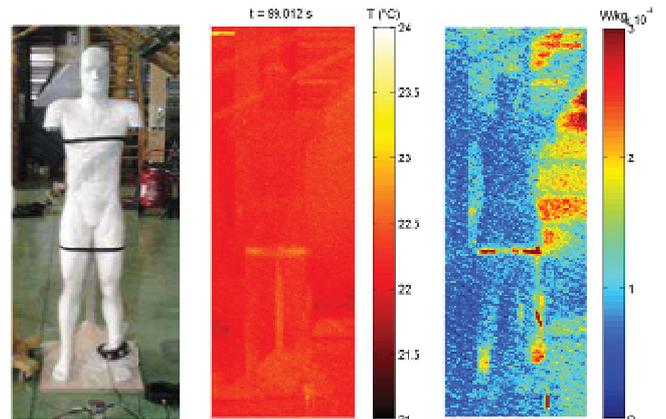


Figure 4 : Mannequin sous test, mesure thermique associée et DAS résultant

En parallèle des mesures thermiques, le courant induit est relevé à l'aide d'une pince ampère-métrique entourant la cheville gauche (voir Figure 4). Le courant total circulant dans le corps peut être déduit sous l'hypothèse que le courant circulant dans une cheville est égal à la moitié du courant total du corps. Ces mesures de courant permettent également d'évaluer au 1<sup>er</sup> ordre le DAS localisé au niveau de la cheville [2] à partir de la relation suivante :

$$DAS_{cheville} = \frac{I^2}{\rho \sigma S^2} \quad (2)$$

avec  $I$  le courant mesuré au niveau de la cheville,  $S$  sa section en  $\text{m}^2$ ,  $\rho$  la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$  et  $\sigma$  la conductivité électrique du liquide en  $\text{S/m}$ .

### 3. Cartographie de DAS

Le DAS du mannequin a été simulé à l'aide de CST Microwave Studio. L'illumination est une onde plane de 1 V/m efficace. Le mannequin est simulé en un seul volume. Les caractéristiques du liquide, présentées en Figure 2, sont prises en compte à l'aide d'un modèle de Debye du 2<sup>ème</sup> ordre. Le DAS est obtenu par :

$$DAS = \sigma \cdot \frac{E_{\text{efficace}}^2}{\rho} \quad (3)$$

Le DAS simulé est comparé au DAS issu de la mesure thermographique, normalisé pour 1 V/m efficace. Les cartographies obtenues à  $f = 1$  MHz,  $f = 25$  MHz,  $f = 50$  MHz et  $f = 90$  MHz sont présentées en Figure 5. La même échelle est utilisée en mesure et en simulation. Un bon accord est globalement obtenu. En basses fréquences, le niveau faible de DAS ne permet pas d'obtenir une dynamique de température suffisante pour sortir du bruit, malgré une illumination supérieure à 100 V/m. En effet, le DAS varie entre 1  $\mu$ W/kg et 2 mW/kg pour 1 V/m incident dans la bande de 1 à 100 MHz. Le champ électrique réalisable sous la ligne TEM est de l'ordre de 100 V/m avec un amplificateur de puissance 10 kW. Il en résulte un DAS à mesurer compris entre 0,01 W/kg et 20 W/kg. D'après l'équation (1), la pente à l'origine à mesurer est comprise entre 3  $\mu$ K/s et 5 mK/s.

Avec le calibrage générique utilisé, la précision de la caméra thermique mise en œuvre est égale à 4,4 mK. En d'autres termes, il est possible de sortir une mesure du bruit en intégrant le signal sur plusieurs dizaines de secondes, sous hypothèse de linéarité au début de l'échauffement. Seul un calibrage spécifique à la plage de température du mannequin permettrait d'adapter la dynamique de mesure aux niveaux de DAS les plus faibles.

Un échauffement non représentatif est systématiquement observé au niveau du raccord entre le bassin et les jambes. A noter également que la pince ampère-métrique cache le bas de la cheville gauche du mannequin. Lors d'une prochaine campagne d'essai, la mesure thermographique et la mesure de courant devront être dissociées.

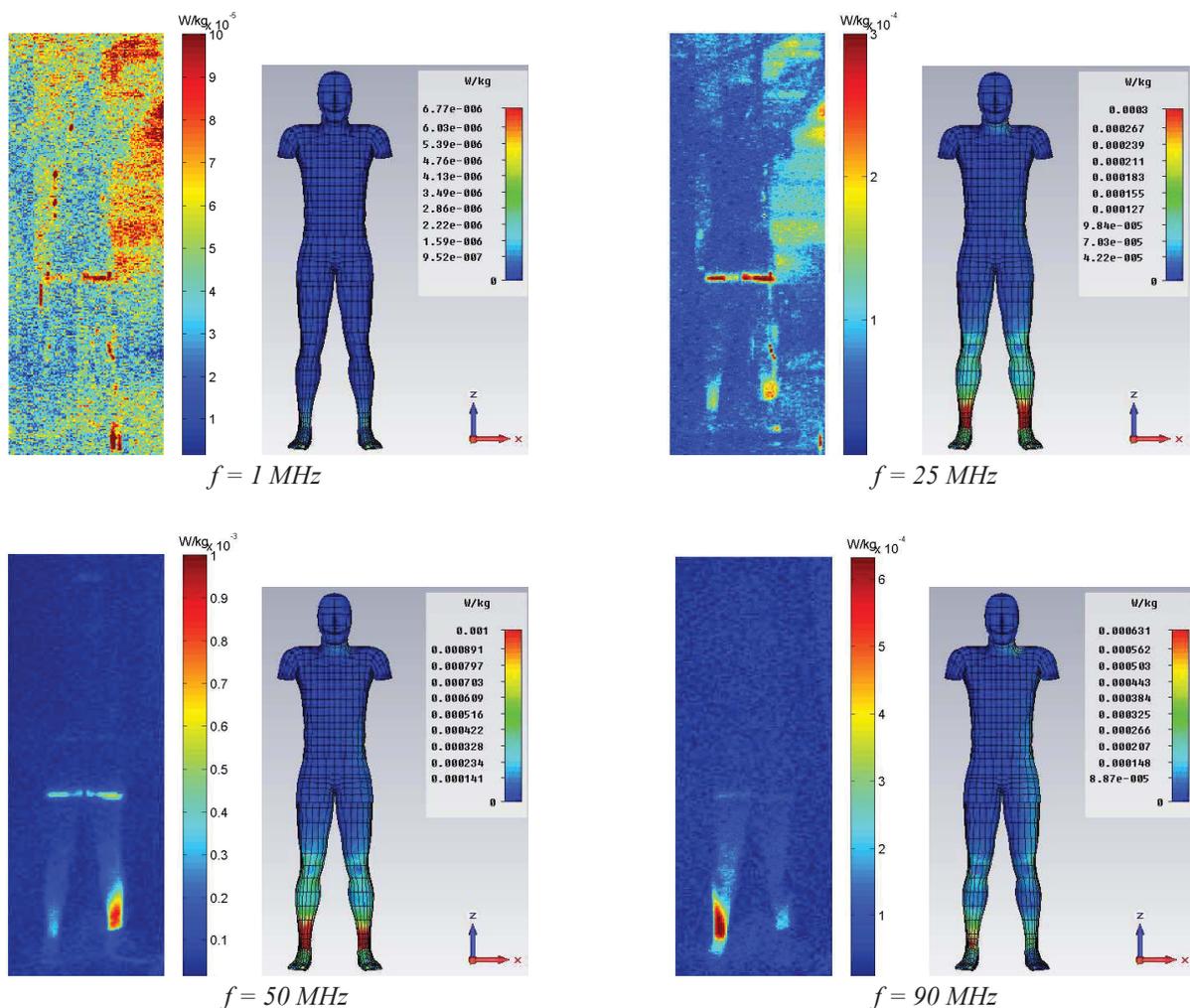


Figure 5 : Cartographies de DAS (mesure & simulation)

#### 4. Courant induit dans le corps

Les mesures du courant induit, en mA pour 1 V/m, sont présentées en Figure 6 et comparées aux résultats issus de la littérature (calculs analytiques [5-6], calculs 3D [7] et mesures sur des volontaires [8]). Un très bon accord est obtenu, confirmant ainsi la représentativité du mannequin en basses fréquences. Des oscillations, dues aux réverbérations parasites du laboratoire, se superposent à la mesure du courant. La valeur moyenne du courant mesuré doit être considérée.

Le courant circulant en réalité dans les tissus les plus conducteurs [3], l'évaluation des densités de courants  $J$  à partir de la mesure du courant total  $I$  doit prendre en compte une « surface équivalente » pour la conduction, différente de la section totale du corps.

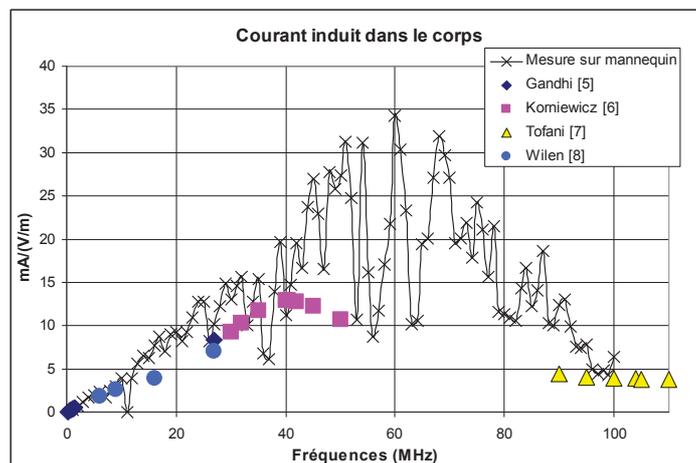


Figure 6 : Courant induit dans le corps

#### 5. Conclusion

L'évaluation expérimentale partielle des restrictions de base DREP proposée dans cet article a permis de poser les bases méthodologiques inspirées des normes en vigueur et de qualifier le comportement du mannequin lors d'une illumination électromagnétique calibrée en gamme HF / VHF. Les résultats sont conformes à l'état de l'art.

De plus la mesure du DAS localisé doit être normativement réalisée sur 10 g de tissu, ce qu'il n'a pas été possible de réaliser lors de ces essais. Des mesures ponctuelles d'élévation de température à l'intérieur du mannequin pourraient éventuellement permettre d'apporter des ordres de grandeur.

Ces premières évaluations expérimentales seront améliorées lors d'une prochaine campagne d'essai (calibrage de la caméra thermique adapté à la dynamique de température, suppression des réverbérations parasites du laboratoire).

#### 6. Références bibliographiques

- [1] Instruction n°302143/DEF/SGA/DFP/PER5 du 18 août 2003, Ministère de la Défense.
- [2] "Norme de base pour le calcul et la mesure de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques des émetteurs de service de radiodiffusion dans les bandes HF (3 MHz à 30 MHz)", NF EN50475, Août 2008.
- [3] A. Laisné, D. Favet, "La dosimétrie numérique en gamme HF / VHF", *accepté pour publication aux JS URSI 2012*.
- [4] "Procédure pour la détermination du débit d'absorption spécifique produit par les dispositifs de communications sans fils utilisés très près du corps humain (gamme de fréquence de 30 MHz à 6 GHz)", NF EN 62209-2, Août 2010.
- [5] O.P. Gandhi, I. Chatterjee, D. Wu and Y. Gu, "Likelihood of High Rates of Energy Deposition in the Human Legs at the ANSI Recommended 3-30MHz RF Safety Levels", *Proceedings IEEE*, vol. 73, n°6, June 1973.
- [6] H. Korniewicz, "The First Resonance of a Grounded Human Being Exposed to Electric Fields", *IEEE Trans. On EMC*, Vol 37 n°2 May 1995.
- [7] Tofani. G. d'Amore, G. Fiandino, A. Benedetto, O. P. Gandhi, J. Y. Chen, "Induced Foot-Currents in Humans Exposed to VHF Radio-Frequency EM Fields", *IEEE Trans. On EMC*, vol. 31, n°1, Feb 1995.
- [8] J. Wilen, K. H. Mild, L-E Paulson, G. Anger, "Induced Current Measurement in Whole Body Exposure Condition to Radio Frequency Electric Fields", *Bioelectromagnetics*, 22:560-567 – 2001.