



**HAL**  
open science

## Analyse statistique de la puissance absorbée par le corps entier en radiofréquence

Aimad El Habachi, Emmanuelle Conil, Gilles Fleury, Emmanuel Vazquez,  
Abdelhamid Hadjem, Man Fai Wong, Joe Wiart

► **To cite this version:**

Aimad El Habachi, Emmanuelle Conil, Gilles Fleury, Emmanuel Vazquez, Abdelhamid Hadjem, et al.. Analyse statistique de la puissance absorbée par le corps entier en radiofréquence. 16è journées Nationales Microondes (JNM'09), May 2009, Grenoble, France. 4 p. hal-00422283

**HAL Id: hal-00422283**

**<https://centralesupelec.hal.science/hal-00422283>**

Submitted on 6 Oct 2009

**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.



## Analyse statistique de la puissance absorbée par le corps entier en radiofréquence

Aimad El Habachi<sup>1</sup>, Emmanuelle Conil<sup>1</sup>, Gilles Fleury<sup>2</sup>, Emmanuel Vazquez<sup>2</sup>, Abdelhamid Hadjem<sup>1</sup>, Man Fai Wong<sup>1</sup> et Joe Wiat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> France Telecom R&D, Issy les Moulineaux, France

<sup>2</sup> SUPELEC, Plateau de Moulon, Gif-sur-Yvette, France  
aimad.elhabachi@orange-ftgroup.com

### Résumé

Dans ce papier, nous proposons une identification des facteurs morphologiques qui peuvent impacter le Débit d'Absorption Spécifique (DAS) du corps entier dans le cas d'une onde plan. Cette étude compare différents modèles mathématiques et conclue l'analyse des données par des tests statistiques. Sous certaines hypothèses aussi une approche permettant de quantifier le quantile à 95% du DAS pour le corps entier est enfin proposée.

### 1. Introduction

Les systèmes fondés sur des technologies liées aux champs électromagnétiques (CEM) sont de plus en plus répandus. La question des effets possibles sur la santé dus à ces technologies sont devenues une préoccupation publique à laquelle on se doit de répondre.

Afin de protéger les personnes, des niveaux de protection, les restrictions de bases, ont été définis par l'ICNIRP [5]. Ces niveaux fixent des valeurs de Débit d'Absorption Spécifique (DAS) à ne pas dépasser. La mesure du DAS pouvant être complexe, des niveaux de références ont été dérivés des restrictions de base de façon conservative. Ces niveaux (volt par mètre) définissent le niveau maximal de champ électromagnétique. Ces niveaux sont évalués en l'absence de la personne. Les niveaux de références ont été établis pour que leur respect implique la conformité aux restrictions de base.

Plusieurs études menées avec des modèles numériques d'humains [1,2] (fantômes) montrent que, pour certaines configurations, le WBSAR (Whole Body Specific Absorption Rate) est très proche des restrictions de base. D'autres études ont souligné la variabilité du WBSAR due à la variabilité de la morphologie humaine [1].

L'objectif de notre étude est de caractériser la distribution statistique du WBSAR pour une population humaine donnée. Pour ce faire, nous disposons d'un ensemble de douze fantômes contenant deux femmes, huit hommes, un garçon de 6 ans et une fille de 11 ans. Ces fantômes peuvent être compris comme un tirage statistique de 12 événements indépendants dans la

population humaine. De plus la distribution statistique du WBSAR que l'on veut caractériser dépendra de la population étudiée. Comme les modèles numériques d'enfants sont très difficiles à obtenir, une technique appelée morphing [4] a été développée et consiste à construire des modèles en déformant par partie les modèles existants. La limite de ces approches est liée au fait que ces déformations sont basées sur des paramètres extérieures et ne permettent pas de prendre en compte les variations de la morphologie interne. Dans la présente étude les modèles développés à partir du morphing l'ont été de manière à correspondre à la moyenne de leurs classes d'âge.

Le nombre limité de fantômes ne permet pas d'utiliser des méthodes usuelles comme Monte-Carlo et plan d'expériences pour caractériser la distribution statistique du WBSAR d'une population. Ceci nous conduit vers la construction de modèle mathématique simplifié pour prédire le WBSAR.

L'objectif de ce papier est d'identifier les facteurs morphologiques (internes et externes) qui ont un impact sur le WBSAR pour des fantômes exposés à une onde plane à une fréquence fixée à 2100MHz et une puissance incidente de 1W/m<sup>2</sup> et de déterminer sous certaines hypothèses le quantile du WBSAR à 95 % pour une population donnée.

### 2. Caractérisation des facteurs influençant le WBSAR.

Plusieurs études ont été menées afin d'établir une expression pour prédire le WBSAR [7]. Ces études se basent sur la proportionnalité de la puissance absorbée avec la surface du corps exposée à l'onde. Des facteurs plus commodes ont été utilisés pour estimer cette surface comme le BSA (m<sup>2</sup>) (1) (Body Surface Area) qui est un facteur empirique qui estime la surface de peau en fonction de la taille et du poids ou encore le BMI (kg/m<sup>2</sup>) (2) (Body Mass Index) qui est un indicateur permettant d'estimer la corpulence d'une personne.

$$BSA = 0.007184 \cdot \text{taille}(cm)^{0.725} \cdot \text{poids}(Kg)^{0.425} \quad (1)$$

$$BMI = \frac{\text{poids}(kg)}{\text{taille}(m)^2} \quad (2)$$

Comme la puissance absorbée est proportionnelle à la surface du corps exposée à l'onde, on en déduit les facteurs BSA/poids (m<sup>2</sup>/kg) et BMI<sup>-1</sup> (m<sup>2</sup>/kg) pour le WBSAR (car le WBSAR est égal à la puissance absorbée divisée par le poids total).

Dans une autre publication [7], une estimation du BSA en fonction du poids à la puissance -2/3. Ceci induit un troisième modèle qui fait intervenir le poids à la puissance -1/3

Nous avons donc retenu et identifié les trois modèles du WBSAR suivants :

$$WBSAR = \alpha \frac{BSA}{\text{poids}} \quad (3)$$

$$WBSAR = \beta BMI^{-1} \quad (4)$$

$$WBSAR = \gamma \text{poids}^{-\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Les relations (3), (4) et (5) ont été établies seulement pour des familles de fantômes obtenues par la technique du morphing où les fantômes morphés restent très dépendants du fantôme auquel cette technique est appliquée ou encore des modèles simplifiés du type ellipsoïdes [2,6].

Un ensemble de 12 fantômes (dont la description est dans le tableau 1) est utilisé dans cette étude. Ils supposés résulter d'un tirage aléatoire indépendants. Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  des trois modèles précédents sont estimés en utilisant la méthode des moindres carrés. L'erreur maximale relative de l'estimation du WBSAR par ces relations est de l'ordre de 30%. Ces relations donnent des résultats satisfaisants pour les familles de fantômes constituées d'un fantôme initial et des fantômes dérivés de celui-ci par la technique du morphing (cf. figure 1). En effet les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  de ces relations sont presque constants au sein d'une même famille. Ceci nous amène à penser que les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  dépendent essentiellement de la morphologie interne qui est sensiblement identique pour un adulte et les enfants issus du morphing de ce dernier.

	Age	Taille cm	Poids Kg	WBSAR W/Kg
Norman	Adulte	174	65.6	$6.80 \cdot 10^{-3}$
Korean	Adulte	175	81.43	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Zubal	Adulte	175.8	76	$4.7 \cdot 10^{-3}$
VH	Adulte	182	106	$4.40 \cdot 10^{-3}$
Japonais	Adulte	173	67.08	$7.40 \cdot 10^{-3}$
Japonaise	Adulte	161	52.24	$7.90 \cdot 10^{-3}$
Ella	Adulte	167	57.5	$7.6710^{-3}$
Duke	Adulte	175	71	$6,31 \cdot 10^{-3}$
Thelonious	6 ans	117	19	$12,7 \cdot 10^{-3}$
Naomi	Adulte	158	51.80	$5.1 \cdot 10^{-3}$
HDRK	Adulte	170	55.28	$5.5 \cdot 10^{-3}$
Billie	11 ans	147	35	$9.58 \cdot 10^{-3}$

Tableau 1. Description des fantômes disponibles.

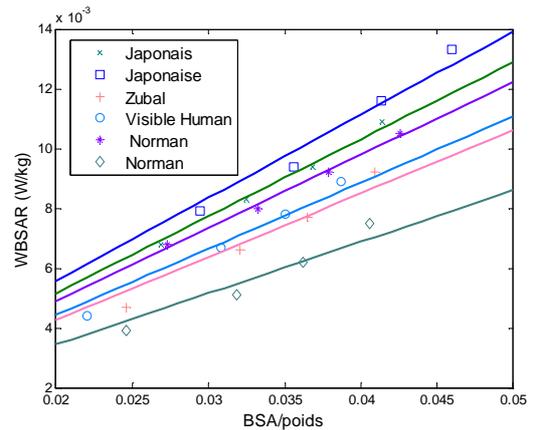


Figure 1. Régressions obtenues par familles de fantômes (modèle (3)).

Afin de vérifier l'hypothèse que les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  dépendent essentiellement de la morphologie interne, nous avons établi une relation entre ces paramètres et les proportions de tissus internes (masse de peau ramenée au poids total par exemple).

$$\hat{\alpha}(x_p, x_M, x_G, x_O) = \beta_0 + \beta(2x_p + x_M + x_G + \frac{3}{5}x_O) + \varepsilon \quad (6)$$

$$\hat{\beta}(x_p, x_M, x_G, x_O) = \beta_0 + \beta(2x_p + x_M + x_G + \frac{3}{5}x_O) + \varepsilon \quad (7)$$

$$\hat{\gamma}(x_p, x_M, x_G, x_O) = \beta_0 + \beta(2x_p + x_M + x_G + \frac{3}{5}x_O) + \varepsilon \quad (8)$$

où  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$  et  $\hat{\gamma}$  sont respectivement les estimations de  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ;  $x_p$  est la proportion de peau,  $x_M$  la proportion de muscle,  $x_G$  la proportion de graisse,  $x_O$  la proportion d'os et  $\varepsilon$  l'erreur.

Les expressions (6), (7) et (8) ont été retenues, car en effectuant des régressions linéaires de type (9), on aboutit à la proportionnalité des paramètres décrite par les équations (6), (7) et (8).

$$\hat{\alpha}(x_p, x_M, x_G, x_O) = \xi_0 + \xi_1 x_p + \xi_2 x_M + \xi_3 x_G + \xi_4 x_O + \varepsilon \quad (9)$$

Les paramètres  $\beta_0$  et  $\beta$  ont été estimés par moindres carrés en utilisant l'ensemble des 12 fantômes. Le test statistique de Student [3] montre que ces paramètres sont très significatifs, de plus le coefficient de corrélation multiple [3] et de l'ordre de 0.90 ce qui indique une bonne qualité de la régression. L'erreur relative maximale est de l'ordre de 11.5%, 9% et 13.02% pour les modèles (6), (7) et (8) respectivement.

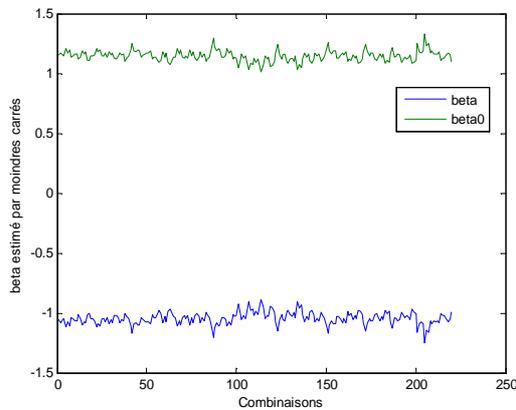
Afin d'étudier la stabilité des coefficients, comme nous ne disposons que de 12 fantômes, l'idée consiste à écarter 3 fantômes (ce qui représente le quart de la base de données) et estimer les paramètres avec les 9 fantômes qui restent. Ceci permettra de voir si à l'ajout d'un nouveau fantôme les paramètres resteront stables.

Toutes les combinaisons ont été testées (cf. figure 2). Cette étude montre que l'on a une faible variabilité des

coefficients de 5% pour les modèles (6) et (8) ce qui montre que ces coefficients sont assez stables. En ce qui concerne le modèle (7), on constate une variabilité plus importante des coefficients d'environ 11%.

De plus l'erreur relative maximale relevée sur les fantômes écartés de l'estimation des paramètres pour les modèles (6) et (8), est de 14% et 17% respectivement, soit une augmentation de 3% par rapport à l'estimation faite en utilisant tous les fantômes. En revanche, en ce qui concerne le modèle (7), on constate une erreur relative maximale de 20% ce qui représente environ 11% de plus par rapport à l'erreur relative constatée en estimant les paramètres en utilisant tous les fantômes. Ceci pourrait provenir du fait que certaines expériences (fantômes) puissent s'avérer très influentes. Nous avons calculé la distance de Cook [3] qui est un indicateur permettant de repérer les expériences influentes. Les résultats trouvés indiquent qu'un fantôme (Coréen) est très influent pour le modèle (7). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que ce fantôme représente une masse de peau relativement élevée.

Nous avons refait l'étude de la stabilité pour le modèle (7) en gardant le Coréen dans toutes les combinaisons. On constate alors que l'erreur relative maximale que l'on estime sur les fantômes qui ont été écartés. Elle est de l'ordre de 9%. La variabilité des coefficients est de 5%.



**Figure 2. Estimations des paramètres par moindres carrés pour toutes les combinaisons de 9 fantômes (modèle (6)).**

### 3. Estimation du quantile du WBSAR à 95%.

Nous avons vu dans les sections précédentes que le paramètre  $\beta$  dépendait principalement de la morphologie interne. De plus ces paramètres sont peut être dépendant du facteur morphologique externe qui est le BMI. Nous allons considérer que ces deux variables aléatoires sont indépendantes. Les informations physiques dont on dispose en ce qui concerne ce paramètre sont les suivantes:

- $\beta$  est positif. Ceci vient du fait que le WBSAR et le BMI sont des grandeurs positives.

- $\beta$  est borné, la borne minimale physique est zéro. En ce qui concerne la borne maximale, Nous savons qu'elle existe et actuellement les experts du domaine mettent de leurs efforts pour la déterminer. Nous allons supposer que cette borne maximale est égale 0.3. Ce choix est de la borne maximale est fait en considérant que l'intervalle dont  $\beta$  appartient est symétrique par rapport à la moyenne.
- Nous savons aussi que les fantômes ont été construits de manière à correspondre à la moyenne de la population. De plus, on constate que les enfants ont le même ordre de grandeur en termes de proportions de tissus internes que les adultes. Donc vraisemblablement la moyenne de  $\beta$  est celle des  $\beta$  des fantômes dont on dispose.

Nous allons considérer la loi Gamma de paramètres  $k$  et  $\theta$  et la loi Bêta de paramètres  $a$  et  $b$ , car ce sont des lois positives.

Les fonctions de répartition de ces deux lois s'écrivent comme suit :

$$F_{Gamma}(x) = \frac{\gamma(x/\theta, k)}{\Gamma(k)} \quad (10)$$

$$\text{où } \gamma(x, k) = \int_0^x t^{k-1} e^{-t} dt \quad \text{et} \quad \Gamma(k) = \int_0^{+\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$$

$$F_{Beta}(x) = I_x(a, b) \quad (11)$$

$$\text{où } I_x(a, b) = \frac{\int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt}{B(a, b)} \quad \text{et}$$

$$B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$$

Nous allons estimer les paramètres  $k$ ,  $\theta$  et  $a$ ,  $b$  en intégrant les contraintes énoncées plus haut. Les moyennes d'une loi Gamma (12) et d'une loi Beta (13) s'expriment en fonction de leurs paramètres.

$$E(\beta) = k \cdot \theta = 0.1448 \quad (12)$$

$$E(\beta) = \frac{a}{a+b} = 0.1448 \quad (13)$$

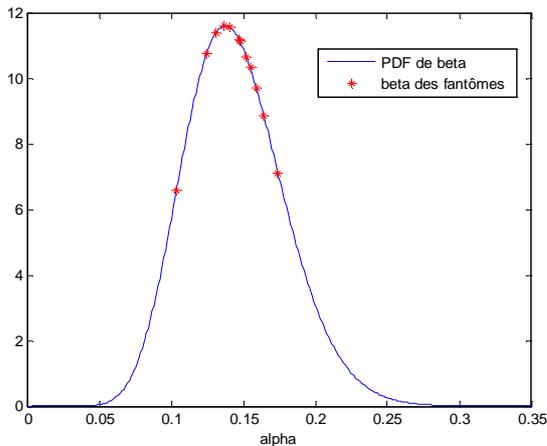
Les contraintes (12) et (13) induisent ainsi l'estimation d'un seul paramètre. La deuxième contrainte suppose donc que la densité de probabilité est comprise dans l'intervalle  $[0, 0.3]$ . Ce qui revient à optimiser les paramètres de manière à ce que le quantile à 99.99% des lois corresponde à la borne maximale qui est 0.3. Il faut donc minimiser les fonctions coûts suivantes:

$$J(k) = \left( \frac{\gamma(k \cdot \frac{0.1448}{0.3}, k)}{\Gamma(k)} - 0.9999 \right)^2 \quad (14)$$

$$J(a) = (I_x(a, 5.9061 \cdot a) - 0.9999)^2 \quad (15)$$

Un algorithme de descente de gradient est utilisé pour minimiser ces critères. On obtient les résultats suivants :

$k = 19.3697$  et  $\theta = 0.0075$  pour la loi Gamma. Et  $a = 14.6983$  et  $b = 86.8099$ . La figure ci-dessous montre le paramètre  $\beta$  modélisé par la loi Gamma.



**Figure 3. La variable aléatoire de  $\beta$  modélisée par une loi Beta.**

Afin d'évaluer le quantile du WBSAR à 95%. Nous disposons d'une population de français âgés de 20 ans [8] qui est caractérisée par le BMI (moyenne de 22.29 kg/m<sup>2</sup> et écart-type de 2.9 kg/m<sup>2</sup>). Nous supposons que le BMI suit la loi gaussienne.

Nous générons un échantillon de 10000 BMI suivant cette loi gaussienne. Nous faisons la même chose pour la variable aléatoire  $\beta$ . Sous l'hypothèse d'indépendance du BMI<sup>1</sup> et  $\beta$ . La densité de probabilité du WBSAR et le produit de ces deux variables. Ensuite nous calculons le quantile à 95 % du WBSAR de manière empirique. Le résultat issu de la modélisation de  $\beta$  par la loi Gamma est de 0.0098W/Kg, et celui issu de la modélisation de  $\beta$  par la loi Beta est de 0.01 W/kg.

#### 4. Conclusion

Cette étude a pour objectif d'établir une relation simplifiée et robuste du WBSAR en fonction de la morphologie. Elle montre par ailleurs que les facteurs morphologiques internes sont importants dans la prédiction du WBSAR. Il est difficile d'obtenir des données statistiques des facteurs internes. Les différents modèles du WBSAR établis s'écrivent comme le produit d'un facteur externe par une combinaison de facteurs externes.

Sous l'hypothèse que la combinaison de facteurs internes est bornée. L'objectif poursuivi est de caractériser les bornes par la physique.

#### 5. Bibliographie

[1] Conil. E, Hadjem. A, Lacroux. F, Wong. MF and Wiart J 2008 Variability analysis of SAR from 20MHz to 2.4GHz for different adult and child models using FDTD Phys. Med. Biol. **53** 1511-1525.

[2] Hirata A, Nagaya Y, Fujiwara O, 2007 " Correlation between Absorption Cross Section and Body Surface

Area of Human for Far-Field Exposure at GHz Bands".

[3] Saporta G Probabilités, analyse de données et statistiques, EDITIONS TECHNIP, January 1990.

[4] Hadjem A., Lautru D., Dale C., Wong M.F., Hanna V.F., Wiart J. 2004 Comparison of Specific Absorption Rate (SAR) Induced in Child-Sized and Adult Heads Using a Dual Band Mobile Phone in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* 1453-1456.

[5] ICNIRP 1998 Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric Magnetic and Electromagnetic Field (up to 300 GHz). Radiation Protection Health Physics, Volume 74, Number 4:494-522.

[6] Conil E, Hadjem A, Gati A, Wong M, Wiart joe, Influence of the plane wave's incidence on the whole body exposure at 2000MHz. soumis à IEEE trans on EMC

[7] Livingston EH., Lee S., "Body Surface Area prediction in normal-weight and obese patients", 2001, Am J Physiol Endocrinol Metab, Vol 281, Issue 3, E586-E591.

[8] Pinneau JC, B Kapitanik, " Les français ages de 20 ans : relation entre le deficit ou l'excédent pondéral et le body mass index (BMI)", 2004.