



**HAL**  
open science

# Caractérisation numérique de l'exposition électromagnétique des personnes en bandes HF et VHF

Jeanne Frère

► **To cite this version:**

Jeanne Frère. Caractérisation numérique de l'exposition électromagnétique des personnes en bandes HF et VHF. Electronique. Université de Rennes, 2017. Français. NNT: 2017REN1S027 . tel-01557943v2

**HAL Id: tel-01557943**

**<https://hal.science/tel-01557943v2>**

Submitted on 20 Nov 2017

**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.

**THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1**  
*sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

pour le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1**

*Mention : Traitement du signal et Télécommunications*

**Ecole doctorale Matisse**

présentée par

**Jeanne FRERE**

préparée à l'unité de recherche IETR - UMR 6164  
Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes  
ISTIC

---

**Caractérisation  
numérique de  
l'exposition  
électromagnétique  
des personnes en  
bandes HF et VHF**

**Thèse soutenue à Rennes  
le 28 juin 2017**

devant le jury composé de :

**Françoise PALADIAN**

Professeur d'Université, Institut Pascal /  
rapporteur

**Vikass MONEBHURRUN**

Professeur adjoint, Centrale Supélec /  
rapporteur

**Renaud LOISON**

Professeur, INSA de Rennes / examinateur

**Maxim ZHADOBOV**

Chargé de recherche CNRS, IETR / directeur de  
thèse



# Remerciements

Je remercie tout d'abord Mme Françoise Paladian et M. Vikass Monebhurrin pour avoir accepté de rapporter mon travail de thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à son égard.

Je tiens ensuite à remercier M. Renaud Loison pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je souhaite également remercier mon directeur de thèse M. Maxim Zhadobov pour ses conseils et pour m'avoir accordé sa confiance pour la gestion de ce projet. Je remercie également mes encadrants académiques et industriels M. Ronan Sauleau, M. Christophe Lemoine, M. Alain Alcaras et M. Gwenaël Le Cadre qui m'ont conseillée et permis d'avancer dans mon travail grâce à nos traditionnelles réunions rennaises et choletaises.

Je tiens également à remercier M. Francis Doche et Mme Eva Cucchi qui m'ont permis d'effectuer cette thèse CIFRE au sein de Thales.

Je souhaite remercier les personnes qui m'ont côtoyée au quotidien. Merci Paul pour ta disponibilité systématique pour nos pauses thé. Merci Jean-Michel pour nos nombreuses discussions littéraires. Merci Olivier pour nos discussions culturelles et immobilières. Merci Christophe pour ta bonne humeur et pour m'avoir appris à faire du café, bien que ma boisson de prédilection reste le thé. Merci Matthieu de m'avoir accueilli dans ton bureau à mon arrivée. Merci Lulu, Thierry, Philippe, Claire, Jean-Claude, Sébastien, Gaël, Yaakoub, Bernard et Jean-Marie pour nos repas quotidiens toujours animés. Je tiens également à remercier Patrice pour sa bonne humeur, ses anecdotes quotidiennes et son écoute.

Je remercie mes parents et mon frère pour leur soutien et leurs encouragements. Je remercie également Pierre-Antoine de m'avoir soutenue et encouragée quotidiennement et merci à toute ta famille pour leurs encouragements.

---

# Sommaire

|   |          |
|---|----------|
| Liste des symboles et acronymes   | ix       |
| Introduction  | xii      |
| <b>1 Etat de l'art</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Introduction  | 2        |
| 1.2 Normes et recommandations   | 2        |
| 1.2.1 Fondements des normes   | 2        |
| 1.2.1.1 Seuil de 4 W/kg et élévation de température de 1 ° C                              | 2        |
| 1.2.1.2 Facteurs de précaution et différents environnements                               | 3        |
| 1.2.1.3 Moyenne temporelle de 6 min   | 4        |
| 1.2.2 Niveaux de référence et restrictions de base  | 5        |
| 1.2.2.1 Définition des niveaux de référence   | 5        |
| 1.2.2.2 Définition des restrictions de base   | 6        |
| 1.2.2.3 Cas de multiples expositions  | 9        |
| 1.2.2.4 Lien entre niveaux de référence et restrictions de base                           | 9        |
| 1.2.3 Evolution des normes  | 11       |
| 1.2.3.1 Normes publiées par l'ANSI et l'IEEE  | 11       |
| 1.2.3.2 Normes publiées par l'IRPA et l'ICNIRP  | 12       |
| 1.2.4 Autres normes spécifiques aux environnements militaires                             | 12       |
| 1.2.4.1 Norme de l'OTAN : STANAG 2003   | 12       |
| 1.2.4.2 Norme IEEE pour les milieux militaires  | 14       |
| 1.2.4.3 Norme militaire spécifique à la France : Directive du Ministère de la Défense     | 17       |
| 1.3 Effets avérés d'une exposition  | 17       |
| 1.3.1 Introduction  | 17       |
| 1.3.2 Mécanismes d'interaction lors d'une exposition électromagnétique                    | 18       |
| 1.3.3 Principales études sur les effets des rayonnements RF                               | 19       |
| 1.3.3.1 Effets thermiques reconnus lors d'exposition RF : sensations et thermo-régulation | 19       |
| 1.3.3.2 Effets sur la reproduction et le développement                                    | 21       |
| 1.3.3.3 Maladies de l'œil   | 22       |
| 1.3.3.4 Effets biochimiques   | 22       |
| 1.3.3.5 Perception auditive des RF et électro-hypersensibilité                            | 23       |
| 1.3.3.6 Etudes sur le cancer  | 23       |
| 1.3.4 Conclusion : effets établis formant la base normative                               | 23       |
| 1.4 Moyens de mesure dosimétrique   | 24       |
| 1.4.1 Mesures expérimentales de DAS   | 24       |
| 1.4.2 Moyens numériques   | 27       |
| 1.4.2.1 Modèles numériques de l'humain  | 27       |
| 1.4.2.2 Outils de simulation  | 31       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 1.5      | Positionnement et objectifs de la thèse . . . . .   | 31        |
| <b>2</b> | <b>Caractérisation électromagnétique d'une exposition en bandes HF et VHF</b>   | <b>33</b> |
| 2.1      | Introduction . . . . .  | 34        |
| 2.2      | Comparaison de trois fantômes sur les valeurs de DAS . . . . .  | 34        |
| 2.2.1    | En onde plane, polarisation verticale : Configuration 1 . . . . .   | 36        |
| 2.2.2    | En onde plane, autres polarisations et angles d'incidence . . . . .   | 36        |
| 2.2.3    | En champ proche avec un portatif . . . . .  | 41        |
| 2.3      | Influence des tissus en surface des fantômes . . . . .  | 43        |
| 2.3.1    | Influence de la graisse et de la peau . . . . .   | 43        |
| 2.3.2    | Influence d'une couche d'eau . . . . .  | 45        |
| 2.3.3    | Influence d'une couche de tissu/vêtement . . . . .  | 48        |
| 2.4      | Conclusion . . . . .  | 49        |
| <b>3</b> | <b>Caractérisation thermique d'une exposition en bandes HF et VHF</b>   | <b>51</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .  | 52        |
| 3.2      | Modélisation de la température dans le corps et de la thermorégulation lors d'une exposition RF . . . . .                   | 52        |
| 3.3      | Etude de l'influence de paramètres extérieurs : température ambiante et durée d'exposition                                  | 55        |
| 3.3.1    | Influence de la température ambiante . . . . .  | 55        |
| 3.3.2    | Influence de la durée d'exposition . . . . .  | 56        |
| 3.4      | Evolution de la température locale lors d'une exposition . . . . .  | 57        |
| 3.5      | Caractérisation de la température du corps entier par rapport au DAS corps entier . . . . .                                 | 61        |
| 3.6      | Fantôme homogène et simulation thermique . . . . .  | 61        |
| 3.7      | Conclusion . . . . .  | 65        |
| <b>4</b> | <b>Lien entre différentes grandeurs dosimétriques</b>   | <b>67</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 69        |
| 4.2      | Etat de l'art sur la modélisation du corps humain par des antennes et des circuits électriques . . . . .                    | 69        |
| 4.2.1    | Antenne équivalente à l'être humain . . . . .   | 69        |
| 4.2.2    | Circuit équivalent à l'être humain . . . . .  | 73        |
| 4.3      | Influence de l'impédance d'onde sur les courants induits et le DAS . . . . .  | 74        |
| 4.3.1    | Présentation de l'étude . . . . .   | 74        |
| 4.3.2    | Modélisation du corps par des circuits électriques pour l'évaluation du courant induit selon la posture du corps . . . . .  | 75        |
| 4.3.2.1  | Fantôme isolé équivalent à une antenne électrique . . . . .   | 75        |
| 4.3.2.2  | Fantôme en boucle équivalent à une antenne magnétique . . . . .   | 76        |
| 4.3.3    | Résultats . . . . .   | 77        |
| 4.3.3.1  | Exposition théorique en champ haute impédance . . . . .   | 77        |
| 4.3.3.2  | Exposition théorique en champ basse impédance . . . . .   | 79        |
| 4.3.3.3  | Exposition réaliste : champ rayonné par une antenne placée sur le toit d'un véhicule . . . . .                              | 80        |
| 4.3.4    | Conclusion . . . . .  | 80        |
| 4.4      | Influence du champ électrique externe sur les courants induits : Modélisation du corps par un circuit de Thévenin . . . . . | 81        |
| 4.4.1    | Modélisation de l'impédance du corps par un circuit de Thévenin . . . . .   | 82        |
| 4.4.1.1  | Modèle électrique de la tension $V_{th}$ . . . . .  | 82        |
| 4.4.1.2  | Modèle électrique de l'impédance $Z_{th}$ . . . . .   | 83        |
| 4.4.1.3  | Validation du circuit de Thévenin . . . . .   | 85        |
| 4.4.2    | Etude des limites actuelles : lien entre les courants induits et les champs électriques externes . . . . .                  | 86        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.4.3    | Conclusion . . . . .  | 86         |
| 4.5      | Evaluation du DAS corps entier et 10 g dans un fantôme homogène à partir des courants induits . . . . .                       | 87         |
| 4.5.1    | Présentation . . . . .  | 87         |
| 4.5.2    | Relation entre les courants induits et le DAS . . . . .   | 87         |
| 4.5.3    | Résultats et validation des formules . . . . .  | 90         |
| 4.5.3.1  | Fantôme simplifié équivalent au fantôme homogène Duke . . . . .   | 90         |
| 4.5.3.2  | Exposition à une onde plane . . . . .   | 91         |
| 4.5.3.3  | Exposition à un champ haute impédance . . . . .   | 92         |
| 4.5.3.4  | En champ basse impédance . . . . .  | 92         |
| 4.5.3.5  | Champ rayonné par une antenne sur véhicule . . . . .  | 92         |
| 4.6      | Conclusion . . . . .  | 93         |
| <b>5</b> | <b>Proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation dosimétrique</b>   | <b>95</b>  |
| 5.1      | Introduction . . . . .  | 96         |
| 5.2      | Evaluation des DAS à partir du champ électrique . . . . .   | 96         |
| 5.2.1    | Application sur un fantôme simplifié homogène . . . . .   | 96         |
| 5.2.2    | Application sur le fantôme Duke homogène . . . . .  | 97         |
| 5.2.3    | Conclusion . . . . .  | 97         |
| 5.3      | Développement de tissus homogènes ou hétérogènes simples . . . . .  | 99         |
| 5.3.1    | Tissu homogène . . . . .  | 99         |
| 5.3.2    | Combinaison à 2 tissus . . . . .  | 101        |
| 5.3.3    | Combinaison à 3 tissus . . . . .  | 104        |
| 5.3.3.1  | Exposition à une onde plane . . . . .   | 104        |
| 5.3.3.2  | Exposition à un champ haute impédance . . . . .   | 110        |
| 5.3.3.3  | Exposition à un champ rayonné par une antenne placée sur un véhicule . . . . .  | 111        |
| 5.3.3.4  | Evolution de l'hétérogène simple à 3 tissus . . . . .   | 116        |
| 5.4      | Conclusion . . . . .  | 119        |
|          | <b>Conclusions et Perspectives</b>  | <b>122</b> |
|          | <b>Bibliographie</b>  | <b>128</b> |
| <b>A</b> | <b>Principales limites des normes civiles IEEE et ICNIRP entre 1974 et 2005</b>   | <b>129</b> |
| <b>B</b> | <b>Tissus constituant les fantômes Duke, Ella et Hugo</b>   | <b>141</b> |
| B.1      | Tissus hétérogènes . . . . .  | 141        |
| B.2      | Tissu homogène . . . . .  | 144        |
| <b>C</b> | <b>Fantôme simplifié équivalent à la morphologie du fantôme Ella</b>  | <b>145</b> |
| C.1      | Fantôme simplifié . . . . .   | 145        |
| C.2      | Résultats en onde plane . . . . .   | 146        |
| <b>D</b> | <b>Compléments au chapitre 4 : validation des formules de calcul du DAS pour un fantôme placé à l'intérieur d'un véhicule</b> | <b>147</b> |
| D.1      | Introduction . . . . .  | 147        |
| D.2      | Résultats . . . . .   | 147        |
| D.2.1    | Exposition en VHF . . . . .   | 147        |
| D.2.2    | Exposition en HF . . . . .  | 148        |
| D.2.3    | Conclusion . . . . .  | 150        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>E Compléments au chapitre 3 : Exposition électromagnétique au-delà des limites normales et élévations de température associées</b> | <b>151</b> |
| E.1 Présentation de l'étude . . . . .   | 151        |
| E.2 Résultats . . . . .   | 151        |
| E.3 Conclusion . . . . .  | 153        |
| <b>F Liste des publications</b>   | <b>155</b> |

# Liste des symboles et acronymes

|                   |   |
|-------------------|---|
| $\epsilon_0$      | Permittivité du vide, $\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ F/m                               |
| $\epsilon_r$      | Permittivité relative   |
| $\mu_0$           | Perméabilité magnétique du vide, $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m                               |
| $\rho$            | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )  |
| $\sigma$          | Conductivité (S/m)  |
| $c$               | Vitesse de la lumière dans le vide, $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s $\sim 3 \cdot 10^8$ m/s |
| $E$               | Champ électrique (V/m)  |
| $H$               | Champ magnétique (A/m)  |
| $J$               | Densité de courant (A/m <sup>2</sup> )  |
| $S$               | Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )  |
| ANSI              | American national standards institute   |
| AS                | Absorption spécifique (J/kg)  |
| BF                | Basses fréquences, de 30 kHz à 300 kHz (LF en anglais)                                  |
| DAS               | Débit d'absorption spécifique (W/kg)  |
| DAS 10 g          | DAS moyenné sur un volume de 10 g (W/kg)  |
| DAS <sub>CE</sub> | DAS moyenné sur le corps entier (W/kg)  |
| DREP              | Dangers des rayonnements électromagnétiques sur les personnes                           |
| HF                | High frequencies, de 3 à 30 MHz   |
| ICNIRP            | International commission on non-ionizing radiation protection                           |
| IEEE              | Institute of electrical and electronics engineers                                       |
| INIRC             | International non-ionizing radiation committee  |
| IRPA              | International radiation protection association  |
| OTAN              | Organisation du Traité de l'Atlantique Nord   |
| RF                | Radio fréquence   |
| UHF               | Ultra high frequencies, de 300 à 3000 MHz   |
| VHF               | Very high frequencies, de 30 à 300 MHz  |



# Introduction

Dans les environnements militaires, et plus particulièrement dans le domaine terrestre, de nombreux systèmes radioélectriques HF (de 3 à 30 MHz), VHF (de 30 à 300 MHz) et UHF (de 300 à 3000 MHz) sont utilisés. Ces systèmes remplissent de nombreuses fonctions et peuvent parfois cohabiter sur un même porteur :

- Communication longue et courte distance (de quelques dizaines de kilomètres à des milliers de kilomètres) ;
- Goniométrie ;
- Brouillage de communication ;
- Radar ;
- Communications en hyperfréquence (WiFi<sup>1</sup>, WiMax<sup>2</sup>, LOS<sup>3</sup> ...).

Les différentes fonctions utilisent plusieurs antennes et augmentent les risques de surexposition électromagnétique des opérateurs. Des normes civiles et militaires proposent des limites sur les champs électromagnétiques appliqués et sur des grandeurs dosimétriques (débit d'absorption spécifique DAS, densité de courant  $J$ , champ électrique interne  $E_{int}$ ) pour limiter ce risque de surexposition entre 0 et 300 GHz.

Les produits Thales étant d'usage militaire, leur exploitation concerne le personnel travailleur et doit respecter, en plus des normes civiles pour les travailleurs, l'instruction DREP (Dangers des rayonnements électromagnétiques sur les personnes) du Ministère de la Défense français [1] et la norme de l'OTAN [2].

Pour étudier et valider la conformité des produits Thales avec ces normes, Thales a développé une méthode de validation en collaboration avec la Direction Générale de l'Armement (DGA). Des mesures de champs électrique et magnétique en l'absence de personne sont effectuées à proximité des produits radio, puis selon les niveaux de champs, des mesures de DAS et/ou de  $J$  sont nécessaires pour la validation des produits.

Cependant, aucun moyen standard expérimental de mesure de DAS (et de  $J$ ) n'existe pour des fréquences entre 1 et 100 MHz. Les moyens expérimentaux disponibles actuellement sont dédiés aux fréquences GSM<sup>4</sup> et les phénomènes physiques de ces fréquences diffèrent de ceux en HF et VHF. C'est pourquoi Thales effectue des simulations numériques avec des fantômes de l'humain pour évaluer les valeurs de DAS et de  $J$ .

Les principaux problèmes de ces simulations sont les suivants :

- Aucune méthodologie précise de validation numérique n'est indiquée dans les normes et ce quelles que soient les configurations et les fréquences d'exposition ;
- Le coût de ces simulations ne permet pas d'évaluer la conformité des produits dans des délais compatibles avec des projets industriels, notamment à cause des nombreuses configurations possibles.

---

1. Wireless Fidelity, essentiellement à 2,4 GHz et 5 GHz

2. Worldwide Interoperability for Microwave Access, mode de transmission d'accès Internet haut débit portant sur une zone géographique étendue, fréquences exploitables entre 2 et 66 GHz

3. Line-of-sight ou ligne de visée, de 10 à 66 GHz

4. Global System for Mobile communications, fréquences exploitées à partir de 900 MHz

L'objectif de cette thèse CIFRE entre Thales et l'IETR est de concevoir, de proposer et de valider une nouvelle méthodologie de validation des produits radio Thales.

Pour cela, nous présentons dans un premier chapitre un état de l'art sur :

- les normes applicables entre 1 et 100 MHz et l'historique de ces normes ;
- les effets avérés des expositions électromagnétiques en radio fréquences ;
- les moyens de mesure dosimétrique.

Dans le deuxième chapitre, trois fantômes de l'humain sont comparés vis-à-vis de leur comportement électromagnétique. Nous étudions également l'influence des tissus biologiques composant ces fantômes vis-à-vis du DAS. Ce chapitre permet de justifier l'utilisation du fantôme Duke de la Virtual Family [3] dans les chapitres suivants.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons au comportement thermique du corps lors d'une exposition électromagnétique en onde plane entre 1 et 100 MHz. Grâce à un logiciel de simulation permettant de lier calculs électromagnétiques et calculs thermiques, nous comparons, lors d'une exposition en onde plane en HF et VHF, les augmentations de température locale et globale du corps par rapport aux limites en DAS données par les normes .

Puis dans le quatrième chapitre, nous étudions le couplage de type antenne entre le corps et les champs électromagnétiques appliqués lors d'une exposition. Cela nous permet de proposer des formules analytiques simples d'évaluation des courants induits et des DAS dans un corps homogène.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous proposons une méthode d'évaluation du DAS à partir du champ électrique externe pour une exposition électromagnétique en onde plane entre 1 et 100 MHz dans un corps homogène. Afin d'adapter cette nouvelle méthode d'évaluation à un corps hétérogène, une simplification de la composition des fantômes de l'humain hétérogènes est également développée pour des fréquences entre 1 et 100 MHz.

# Chapitre 1

## Etat de l'art

### Sommaire

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1.1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Normes et recommandations</b>  | <b>2</b>  |
| 1.2.1      | Fondements des normes   | 2         |
| 1.2.1.1    | Seuil de 4 W/kg et élévation de température de 1 °C                                   | 2         |
| 1.2.1.2    | Facteurs de précaution et différents environnements                                   | 3         |
| 1.2.1.3    | Moyenne temporelle de 6 min   | 4         |
| 1.2.2      | Niveaux de référence et restrictions de base  | 5         |
| 1.2.2.1    | Définition des niveaux de référence   | 5         |
| 1.2.2.2    | Définition des restrictions de base   | 6         |
| 1.2.2.3    | Cas de multiples expositions  | 9         |
| 1.2.2.4    | Lien entre niveaux de référence et restrictions de base                               | 9         |
| 1.2.3      | Evolution des normes  | 11        |
| 1.2.3.1    | Normes publiées par l'ANSI et l'IEEE  | 11        |
| 1.2.3.2    | Normes publiées par l'IRPA et l'ICNIRP  | 12        |
| 1.2.4      | Autres normes spécifiques aux environnements militaires                               | 12        |
| 1.2.4.1    | Norme de l'OTAN : STANAG 2003   | 12        |
| 1.2.4.2    | Norme IEEE pour les milieux militaires  | 14        |
| 1.2.4.3    | Norme militaire spécifique à la France : Directive du Ministère de la<br>Défense      | 17        |
| <b>1.3</b> | <b>Effets avérés d'une exposition</b>   | <b>17</b> |
| 1.3.1      | Introduction  | 17        |
| 1.3.2      | Mécanismes d'interaction lors d'une exposition électromagnétique                      | 18        |
| 1.3.3      | Principales études sur les effets des rayonnements RF                                 | 19        |
| 1.3.3.1    | Effets thermiques reconnus lors d'exposition RF : sensations et ther-<br>morégulation | 19        |
| 1.3.3.2    | Effets sur la reproduction et le développement  | 21        |
| 1.3.3.3    | Maladies de l'œil   | 22        |
| 1.3.3.4    | Effets biochimiques   | 22        |
| 1.3.3.5    | Perception auditive des RF et électro-hypersensibilité                                | 23        |
| 1.3.3.6    | Etudes sur le cancer  | 23        |
| 1.3.4      | Conclusion : effets établis formant la base normative                                 | 23        |
| <b>1.4</b> | <b>Moyens de mesure dosimétrique</b>  | <b>24</b> |
| 1.4.1      | Mesures expérimentales de DAS   | 24        |
| 1.4.2      | Moyens numériques   | 27        |
| 1.4.2.1    | Modèles numériques de l'humain  | 27        |
| 1.4.2.2    | Outils de simulation  | 31        |
| <b>1.5</b> | <b>Positionnement et objectifs de la thèse</b>  | <b>31</b> |

---

## 1.1 Introduction

Afin de limiter le risque de surexposition électromagnétique des champs radio fréquence (RF, 3 kHz à 300 GHz) chez l'homme, des limites et des recommandations existent. Ces limites concernent les valeurs de champs électriques interne et externe, de champs magnétique externes, de densité de courant, de densité de puissance, de DAS ou encore les valeurs de courants de contact et induit dans le corps.

Les premières recommandations et normes datent de 1966 et ont été publiées par l'American Standard Association (ASA). Grâce aux différentes études menées depuis 1966, la connaissance des risques sur la santé dues aux expositions RF s'est affinée et les recommandations ont pu évoluer.

Pour vérifier la conformité des différents systèmes émettant des champs RF aux fréquences HF, VHF et UHF, des méthodes de mesure et de validation des systèmes existent. Certaines reposent sur des mesures de champs ou de DAS et d'autres sur des simulations numériques utilisant des modèles numériques d'êtres vivants appelés fantômes.

En environnement militaire tactique, les conditions opérationnelles entraînent parfois des valeurs d'exposition du même ordre de grandeur que les limites. L'utilisation de ces équipements peut donc être soumise à des limitations. Il est donc nécessaire de maîtriser les connaissances sur ces normes (risques encourus selon les valeurs d'exposition, choix des limites basés sur des études animales ou non, en laboratoire ...) pour définir au mieux l'utilisation de ces équipements ainsi que leur éventuelle restriction.

Les principales recommandations sont publiées par l'IEEE et l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) et ce chapitre a pour premier objectif de donner l'origine de ces normes et des limites d'exposition. Ce chapitre s'intéresse ensuite aux effets avérés des expositions aux champs RF ainsi qu'aux moyens de mesure dosimétriques actuels en nous focalisant sur les fréquences HF, VHF et UHF.

## 1.2 Normes et recommandations en cas d'expositions électromagnétique de personnes entre 3 kHz et 300 GHz

### 1.2.1 Fondements des normes

#### 1.2.1.1 Seuil de 4 W/kg et élévation de température de 1 ° C

Entre 100 kHz et 3 GHz, certaines limites sont exprimées en Débit d'Absorption Spécifique (DAS). Les limites sur le DAS ont été définies à partir de la valeur seuil 4 W/kg sur le corps entier. Cette valeur seuil vient d'études menées sur des animaux qui ont montré que les premiers effets dus à l'échauffement des tissus apparaissaient pour des DAS corps entier ( $DAS_{CE}$ ) supérieurs à 4 W/kg [4]. Les premiers effets rapportés étaient des changements de comportement observés chez des rongeurs et des primates [5].

De plus selon les recommandations de l'IEEE [6] et de l'ICNIRP [7], l'homme présenterait un meilleur système de thermorégulation que les animaux donc les comités ont décidé de garder le seuil de 4 W/kg comme base pour établir les normes et recommandations.

D'ailleurs grâce au système de thermorégulation de l'homme, l'IEEE [6] indique que l'élévation de température due à une exposition de 4 W/kg sur un homme correspondrait à un niveau d'activité modéré (comme faire le ménage). Ce seuil correspondrait également à une élévation de température dans le corps de 1 ° C lors d'une exposition de 30 min dans un environnement normal (pas de températures et/ou de conditions extrêmes) pour des fréquences comprises entre 10 MHz et quelques GHz [7].

Les limites se basent aussi sur les élévations de température du corps en local ou en corps entier. Elles ont en effet été établies de façon à ce que le corps ne subisse jamais une élévation de température supérieure à 1 ° C entre 100 kHz et 300 GHz. Pour cela des facteurs de précaution sont mis en place pour donner les recommandations actuelles.

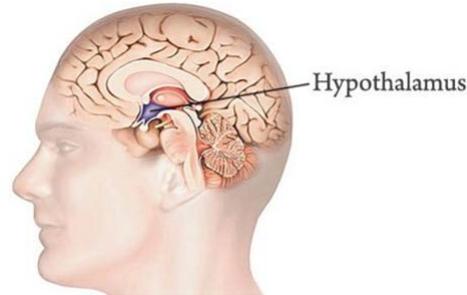


FIGURE 1.1 – Localisation de l'hypothalamus dans le corps

L'hypothalamus (figure 1.1) est un organe contrôlant la régulation thermique du corps. Selon l'IC-NIRP [7], si l'hypothalamus subit une augmentation locale de température de 0,2 à 0,3 °C, son activité de thermorégulation peut être modifiée.

D'après l'ICNIRP [7], toute élévation (sur tout le corps) de température supérieure à 1 - 2 °C que le corps ne parvient pas à compenser, peut avoir des effets nocifs tels que le coup de chaleur ou l'insolation. Des études menées sur des animaux et des systèmes cellulaires ont relevé les effets suivants pour une élévation de la température corporelle de 1 à 2 °C et des durées d'exposition variables :

- des modifications des fonctions nerveuses et neuromusculaires ;
- une augmentation de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique<sup>5</sup> ;
- des troubles oculaires (opacités du cristallin et anomalies de la cornée) ;
- des modifications du système immunitaire ;
- des altérations hématologiques ;
- des effets tératogènes<sup>6</sup> ;
- des modifications de la morphologie ;
- des modifications de la teneur en eau et en électrolytes ;
- des modifications des fonctions membranaires de la cellule.

### 1.2.1.2 Facteurs de précaution et différents environnements

Les comités normatifs ont établi des facteurs de précaution pour protéger les personnes durant l'exposition aux champs RF. Un premier facteur de précaution est défini entre le seuil de 4 W/kg (corps entier) et les premières valeurs limites données dans les normes et recommandations. Puis d'autres facteurs supplémentaires sont définis pour distinguer l'exposition d'un travailleur et d'une personne quelconque.

Il y a donc plusieurs environnements ou catégories de personnes dans lesquels des limites différentes sont définies. Ces premières distinctions d'environnement ou de catégories entre environnement contrôlé (correspondant à l'exposition des travailleurs) et environnement non-contrôlé (correspondant à l'exposition de la population générale) sont apparues dans la norme IEEE C95.1 de 1991 [4].

Selon la norme IEEE de 2005 [6], la création de plusieurs environnements d'exposition avec différentes limites (entraînées par des facteurs de précaution supplémentaires) se justifie notamment par les raisons suivantes :

- Comme la catégorie *population générale* ou *environnement non-contrôlé* inclut des enfants, des femmes enceintes, des personnes âgées, des infirmes ou des malades (sous traitement médicamenteux et/ou avec des implants ou équipements électroniques médicaux), il est justifié d'appliquer

5. La barrière hémato-encéphalique est une barrière présente dans le cerveau entre la circulation sanguine et le système nerveux central pour tous les vertébrés terrestres. Elle protège le cerveau des agents pathogènes, des toxines et des hormones circulant dans le sang ; elle représente un filtre sélectif à travers lequel les aliments nécessaires au cerveau sont transmis et les déchets sont éliminés.

6. Les tératogènes sont des agents pharmacologiques qui lors de leur utilisation provoquent le développement de masses cellulaires anormales au cours de la croissance foetale provoquant des défauts physiques sur le fœtus.

une marge de sécurité par rapport à un environnement contrôlé car ces personnes pourraient par exemple présenter un système de thermorégulation moins performant et donc subir une élévation de température supérieure à 1 ° C durant une exposition ;

- Cette approche est en accord avec les normes précédentes sur la santé et la protection vis-à-vis des expositions RF car la population générale peut être exposée toute sa vie et en continu alors qu'un travailleur (ou une personne en environnement contrôlé) est exposée durant un temps limité correspondant souvent à son temps de travail
- Par principe de précaution, il est justifié de prévenir les individus d'expositions à des agents potentiellement dangereux et de mettre en place des limites adéquates. De plus, la définition d'un *programme de protection aux RF* permet de définir un niveau d'action et de limiter les expositions excessives ;
- Le niveau *environnement non-contrôlé* sert également de base pour l'établissement de limites environnementales<sup>7</sup> car cette catégorie inclut une plus grande marge de sécurité. Mais la catégorie *environnement non-contrôlé* n'entraîne pas nécessairement la création de limites environnementales.

Entre le seuil servant de base aux normes (4 W/kg corps entier) et la première limite en DAS données en 1982 (0,4 W/kg pour une exposition corps entier en environnement contrôlé), il existe un premier facteur de précaution de 10. Ce premier facteur résultant du principe de précaution a été décidé dans la norme C95.1 de l'ANSI de 1982 [5]. C'est une décision plutôt arbitraire des différents comités normatifs car rien ne justifiait quantitativement l'augmentation ou la diminution de ce facteur 10.

De plus un second facteur de précaution est appliqué pour les limites en environnement non-contrôlé (population générale) par rapport à celles en environnement contrôlé. Ce facteur est de 5 et est justifié de la manière suivante :

Un travailleur sur une semaine de 40 h sera exposé au maximum 40 h par semaine alors qu'une personne appartenant à la catégorie population générale est exposée au maximum sur une semaine durant  $7 \times 24 = 168$  h. Le ratio entre les deux est de  $168/40 = 4,2$  qui est arrondi à 5. Les comités normatifs ont donc ajouté un facteur de précaution supplémentaire de 5 pour les limites en environnement non-contrôlé.

Le facteur de précaution total pour la catégorie *travailleur* est donc de 10 et celui pour la catégorie *population générale* de  $10 \times 5 = 50$  vis-à-vis du seuil de 4 W/kg pour la limite en DAS corps entier.

### 1.2.1.3 Moyenne temporelle de 6 min

#### Définition de la constante thermique temporelle

Les constantes de temps font partie de l'analyse des systèmes thermiques. Ces systèmes sont utilisés quand des objets refroidissent ou chauffent uniformément sous l'influence d'un réchauffement ou refroidissement convectif de l'environnement ambiant. Dans ce cas, le transfert de chaleur du corps à une température ambiante et à un temps donné, est proportionnel à la différence de température entre le corps et l'environnement ambiant :

$$F = h A_S (T(t) - T_a) \tag{1.1}$$

avec

- h coefficient de transfert thermique [W/K/m<sup>2</sup>];
- A<sub>S</sub> surface d'échange [m<sup>2</sup>];
- T(t) température du corps à l'instant t [K];
- T<sub>a</sub> température ambiante [K].

---

<sup>7</sup>. Les limites environnementales sont des limites pour un environnement quelconque donc un environnement avec ou sans êtres vivants

La convention de signe choisie indique que  $F$  est positif quand la chaleur quitte le corps  $T(t) > T_a$ . Si de la chaleur est perdue vers l'extérieur, ce transfert de chaleur donne un changement de température dans le corps donné par l'équation 1.2

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = -F \quad (1.2)$$

avec

$\rho$  masse volumique du corps [kg/m<sup>3</sup>];  
 $C_p$  capacité calorifique du corps [J/kg/K];  
 $V$  volume du corps [m<sup>3</sup>].  
 Cela implique donc :

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = h A_S (T_a - T(t)) \quad (1.3)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dT}{dt} + \frac{h A_S}{\rho C_p V} T(t) = \frac{h A_S}{\rho C_p V} T_a \quad (1.4)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dT}{dt} + \frac{T(t)}{\tau} = \frac{T_a}{\tau} \quad (1.5)$$

avec  $\tau = \frac{\rho C_p V}{h A_S}$  constante thermique temporelle en secondes. C'est le temps nécessaire pour que l'élévation de température  $\Delta T$  soit telle que  $\Delta T = 63,2\% T_{max}$  où  $T_{max}$  est la valeur maximale en température.

### Utilisation d'une moyenne temporelle thermique dans les normes

Les normes C95.1 de l'IEEE ou les recommandations de l'ICNIRP utilisent une moyenne temporelle de 0,1 h (6 min) afin de définir les limites d'exposition.

Selon l'IEEE [6], comme la moyenne ou constante thermique temporelle (définie précédemment dans l'équation 1.5) du corps humain est de 1h ou plus, 6 min correspond à la constante thermique temporelle pour une partie du corps. Cette estimation vient des premières versions de la norme C95.1 [8] et serait dérivée d'une estimation de la constante thermique temporelle de petits objets de même taille qu'un œil humain.

De plus les niveaux de référence et les restrictions de base sont plutôt conservateurs même pour des périodes de temps inférieures à 6 min. En utilisant une moyenne temporelle de 6 min dans la bande de fréquence principale 100 kHz - 3 GHz (comprend les fréquences de résonance du corps et des parties du corps humain), l'IEEE juge les niveaux de référence et les restrictions de base ultra-conservateurs pour les expositions locales et corps entier.

## 1.2.2 Niveaux de référence et restrictions de base

Les niveaux de référence et les restrictions de base sont des limites données par les normes et recommandations ([6], [7]), permettant de quantifier les effets des expositions RF sur l'homme et/ou d'évaluer de manière pratique l'exposition. Ces limites sont détaillées dans les paragraphes suivants (paragraphes 1.2.2.1 et 1.2.2.2).

### 1.2.2.1 Définition des niveaux de référence

Les niveaux de référence sont indiqués à des fins d'évaluation pratique de l'exposition, afin de déterminer s'il est vraisemblable que les restrictions de base soient dépassées [7].

Ces niveaux sont dérivés des restrictions de base. Chadwick en donne un exemple dans un article [9] où il calcule la limite en champ magnétique à partir de la limite en DAS corps entier de 0,4 W/kg pour des fréquences inférieures à 50 MHz. Les niveaux de référence sont des limites plus contraignantes que les restrictions de base, car ils peuvent être dépassés si les restrictions de base sont respectées.

Les niveaux de référence sont quelque fois appelés limites dérivées, niveau d'action ou valeurs maximales d'exposition (*Maximum Permissible Exposure* ou *MPE* en anglais), comme c'est le cas

dans la norme IEEE [6] alors que dans la recommandation ICNIRP [7], c'est l'appellation *niveaux de référence* qui est utilisée<sup>8</sup>.

Une des conséquences de l'exposition aux champs RF est l'échauffement local ou global du corps. Celui-ci est du :

- en basses fréquences (BF) :
  - au courant induit dans le corps,
  - ou à la formation de dipôles électriques,
  - ou à la réorientation des dipôles électriques ;
- pour des fréquences supérieures à 100 kHz, à une absorption d'énergie par les tissus.

C'est pourquoi, il est nécessaire de respecter les limites sur les champs externes et le courant induit ou de contact dans le corps, afin de protéger les personnes lors d'exposition RF à des fréquences inférieures à quelques MHz. Deux articles (l'un de 1986 [10] et le second de 1995 [11]) le montrent et l'expliquent.

L'article [10] montre que même en respectant les limites sur les champs électriques externes préconisées par [5] entre 0 et 50 MHz, des courants induits assez élevés peuvent être mesurés. Cela entraîne des valeurs de DAS locales au niveau de la cheville pouvant dépasser les 100 W/kg, ce qui est bien supérieur aux 20 W/kg préconisés pour une exposition locale des membres. Cependant il faut noter que cet article date de 1986 et que les DAS ont été calculés à partir des valeurs de courant induit sur un volume de 1 g de tissus. Avec les moyens actuels de simulation et de mesures de DAS, il est fort probable que dans les mêmes conditions d'exposition, les valeurs de DAS soient beaucoup plus faibles.

L'article [11] montre l'intérêt d'avoir des limites à la fois en courant induit et en champ externe. Même si les valeurs de champs électriques sont respectées, les courants peuvent être élevés et dépasser les valeurs données dans la norme [4], d'où la nécessité de mesurer les deux grandeurs et d'appliquer les deux limites. L'étude a été réalisée pour des fréquences entre 90 et 110 MHz.

Les tableaux A.1 à A.5 présentent les niveaux de référence donnés par la norme IEEE de 2005<sup>9</sup> [6].

Les tableaux A.6 à A.9 présentent les niveaux de référence donnés par la recommandation de l'ICNIRP 1998 [7].

Des limites sur les champs électriques et magnétiques spécifiques aux basses fréquences (jusqu'à 10 MHz) sont également données par l'ICNIRP [12]. Seules les limites entre 100 kHz et 10 MHz sont indiquées dans ce mémoire (tableaux A.10 à A.12).

La figure 1.2 indique que les valeurs de champ électrique préconisées par l'ICNIRP de 2011 (recommandation dédiée aux basses fréquences) sont plus restrictives que celles données dans l'ICNIRP de 1998 [7] pour des fréquences inférieures à 1 MHz. Cependant pour des fréquences supérieures à 1 MHz, ce sont les recommandations de l'ICNIRP de 1998 (recommandation dédiée aux radiofréquences) qui sont les plus restrictives.

### 1.2.2.2 Définition des restrictions de base

Les restrictions de base sont établies à partir des effets avérés sur la santé et incluent des facteurs de précaution suffisants pour les éviter. Les restrictions de base sont exprimées dans plusieurs grandeurs selon la fréquence :

- entre 3 kHz et 5 MHz (pour l'IEEE) ou 10 MHz (pour l'ICNIRP)**, elles sont exprimées en champ électrique interne ou en densité de courant ;
- entre 100 kHz et 3 GHz**, elles sont exprimées en débit d'absorption spécifique (DAS) ;
- entre 3 GHz et 300 GHz**, elles sont exprimées en densité de puissance.

---

8. Pour une meilleure compréhension, ce sont les termes de la recommandation ICNIRP qui seront utilisés dans ce mémoire, donc *Niveaux de référence* et *Restrictions de base*

9. La catégorie *Niveaux d'action* apparaissant dans la norme C95.1 de l'IEEE équivaut à la catégorie *Environnement non-contrôlé* ou *Population générale*. Cette dénomination de l'IEEE vient du fait que c'est à partir de ces valeurs qu'il faut prendre des dispositions particulières (par exemple limiter l'accès de la zone)

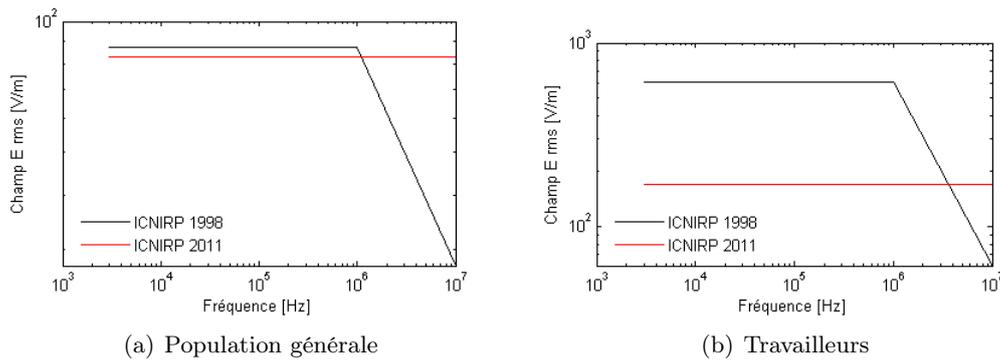


FIGURE 1.2 – Comparaison des valeurs de champs électriques  $E$  préconisées par les recommandations de l'ICNIRP 1998 [7] et de l'ICNIRP 2011 [12]

Sur les tableaux A.13 et A.14 sont présentées les restrictions de base données par la norme C95.1-2005 [6]. Le tableau A.15 présente les limites sur le champ électrique interne préconisées par l'ICNIRP 2011 [12] et les tableaux A.16 et A.17 présentent les restrictions de base données par la recommandation de l'ICNIRP de 1998 [7].

Le DAS local est calculé sur 10 g de tissus pour les expositions partielles et localisées du corps. Les limites données par les restrictions de base permettent d'assouplir les limites imposées par les niveaux de référence.

A l'origine, la norme IEEE de 1991 [4] préconisait un facteur de 20 entre les valeurs limites de DAS corps entier et celles de DAS local. Mais selon les normes [6] et [7], un facteur de 25 environ est utilisé entre le DAS corps entier et le DAS local tête et tronc, et un facteur de 50 entre le DAS corps entier et le DAS local membres. Les limites sur la zone tête & tronc sont donc plus restrictives que sur la zone membres. Ce facteur a été choisi selon des observations et des études sur le rapport entre DAS local et DAS corps entier.

Une publication récente [13] sur des modèles hétérogènes de femme enceinte et d'enfant de 3 ans a montré que le DAS sur un voxel de  $2 \text{ mm}^3$  était jusqu'à 20 fois supérieur au DAS corps entier pour les 99,9% percentile et jusqu'à 10 fois supérieur pour les 99% percentile. Pour les voxels où le DAS est supérieur à  $20 DAS_{CE}$ , les auteurs ont remarqué que ces voxels sont situés à la surface du corps, principalement dans les tissus *peau* et *muscle* au niveau des poignets, bras et poitrine. Les fantômes hétérogènes étaient exposés à une onde plane en polarisation horizontale et verticale entre 50 MHz et 2 GHz. De plus, l'IEEE [6] indique se baser sur des publications pour donner ce facteur de 20 - 25 mais il n'y a aucune mention de ces publications.

Une distinction pour les expositions locales existe entre exposition locale tête et tronc (limite de 10 W/kg pour les travailleurs) et exposition locale membres (limite 20 W/kg pour les travailleurs). Les résultats d'études animales [14], [15] et [16] montrent qu'il faut un DAS supérieur à 150 W/kg pour déclencher une cataracte chez des lapins. La limite de 100 W/kg a été estimée grâce à une sphère de 10 g similaire à l'œil qui serait le seuil de déclenchement d'une cataracte chez l'homme. Le facteur de précaution de 10 est alors appliqué aux 100 W/kg pour obtenir la limite de 10 W/kg sur 10 g pour l'exposition locale tête et tronc.

De plus la norme IEEE de 2005 [6] indique qu'en se basant sur des simulations numériques, une exposition à 10 W/kg moyenné sur 10 g produit une augmentation de température dans l'œil bien inférieure à la température seuil (température seuil de déclenchement de la cataracte de  $41^\circ \text{C}$  selon une étude de Kramar *et al* [17]) nécessaire au déclenchement d'une cataracte chez des lapins. Les comités estiment également que le seuil de déclenchement de cataracte pour un homme est bien supérieur à celui des lapins, donc la limite de 10 W/kg est jugée suffisante pour protéger l'œil humain d'effets nocifs dus aux expositions RF.

| ICNIRP 1998  | IEEE C95.1-2005   |
|--|---|
| Distinction Travailleurs et Population Générale  | Distinction Environnement contrôlé et Niveau d'action   |
| Utilisation de la densité de courant $J$ pour quantifier les effets d'électrostimulation             | Utilisation du champ électrique interne $E_{int}$ pour quantifier les effets d'électrostimulation     |
| Utilisation de $J$ jusqu'à 10 MHz sur la zone tête et tronc  | Utilisation de $E_{int}$ jusqu'à 5 MHz sur les zones cerveau, cœur, extrémités et autres tissus       |
| Pour le DAS : 3 zones d'exposition (corps entier, locales : tête et tronc, et membres)               | Pour le DAS : 3 zones d'exposition (corps entier, locales : extrémités et oreilles, et autres tissus) |
| Valeurs des niveaux de référence différentes (sur les champs, la densité de puissance ou le courant) | Valeurs des niveaux de référence différentes (sur les champs, la densité de puissance ou le courant)  |

TABLE 1.1 – Principales différences entre la recommandation de l'ICNIRP 1998 [7] et la norme C95.1-2005 de l'IEEE [6]

**Note sur le DAS en fonction de la fréquence (fréquence de résonance)**

Hurt indique dans un article [18] qu'en général la résonance intervient pour une longueur du corps (isolé du sol)  $l_{corps}$  proche de  $4\lambda_{air}/10 \Rightarrow l_{corps} \sim 4c/10f$ . Donc pour une personne mesurant 1,7 m la fréquence de résonance sera d'environ 70 MHz. Hurt précise que souvent pour des fréquences inférieures à la fréquence de résonance, le DAS est plus élevé pour un corps parallèle au champ électrique  $E$  et le plus faible pour un corps parallèle au champ magnétique  $H$  [18] [19]. Quand le corps est parallèle à la propagation de l'onde (vecteur d'onde  $k$ ), les valeurs de DAS sont entre les deux. Cela s'explique par deux principes qualitatifs :

- le DAS est plus élevé quand le  $E$  incident est parallèle au corps que perpendiculaire ;
- le DAS est plus élevé quand la section du corps perpendiculaire à  $H$  est grande.

Les différentes polarisations sont présentées en figure 1.3. Pour la polarisation en  $E$ , le champ électrique  $E$  est parallèle au corps et la section perpendiculaire au champ magnétique  $H$  est grande, donc le DAS sera le plus élevé. Pour la polarisation en  $H$ , le champ  $E$  est perpendiculaire au corps et la section parallèle à  $H$  est petite, donc le DAS sera le plus faible. Pour la polarisation en  $k$ , le DAS aura des valeurs comprises entre le DAS fort (polarisation en  $E$ ) et le DAS faible (polarisation en  $H$ ), car le champ  $E$  est perpendiculaire au corps mais la section perpendiculaire à  $H$  est grande.

La polarisation en  $E$  (polarisation verticale) représente donc le pire cas et sera notre cas privilégié d'études dans les chapitres suivants (figure 1.4).

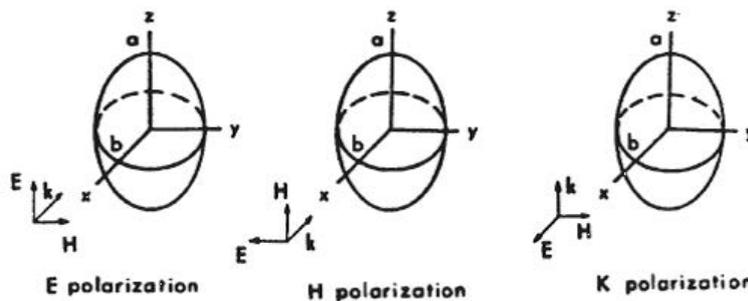


FIGURE 1.3 – Exemples de polarisation [18]

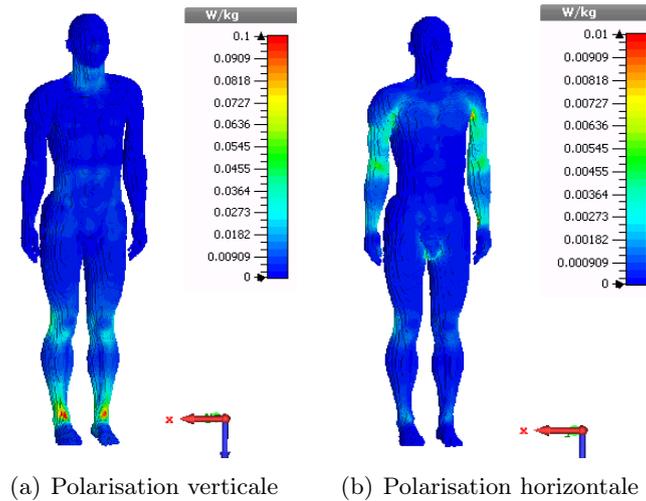


FIGURE 1.4 – Distribution du DAS 10 g sur le fantôme hétérogène Duke [3] pour une exposition en onde plane de face polarisée verticalement ou horizontalement à 30 MHz -  $E = 19,4$  V/m

### 1.2.2.3 Cas de multiples expositions

L'IEEE et l'ICNIRP ont établi des recommandations dans les cas où il y aurait une exposition à plusieurs sources (ou plusieurs fréquences) [6] [7]. Il est nécessaire de pouvoir évaluer l'exposition totale en cas d'exposition à plusieurs sources, car chaque source contribue à cette exposition totale. Même si chaque source est conforme aux normes, l'ensemble peut ne pas être conforme. Il faut donc que chaque grandeur (niveaux de référence et restrictions de base) vérifie la formule suivante :

$$\sum_{f=f_i}^{f_N} \frac{\text{Grandeur caractérisant l'exposition à la fréquence } f_i}{\text{Niveaux de référence ou restrictions de base à } f_i} < 1 \quad (1.6)$$

avec

- N nombre total de sources ;
- $f_i$  fréquences impliquées dans la multi-exposition.

Par exemple, si l'exposition totale comporte deux champs électriques de fréquence différente et un champ magnétique :

- un champ  $E_1$  à la fréquence  $f_1$  ;
- un champ  $E_2$  à la fréquence  $f_2$  ;
- un champ  $H_3$  à la fréquence  $f_3$ .

Alors il faudra vérifier que :

$$\frac{E_1}{\text{limite de } E_1 \text{ à } f_1} + \frac{E_2}{\text{limite de } E_2 \text{ à } f_2} < 1 \quad \text{et} \quad \frac{H_3}{\text{limite de } H_1 \text{ à } f_3} < 1 \quad (1.7)$$

Cela s'applique aux niveaux de référence et aux restrictions de base, donc aux champs électrique et magnétique, au DAS, aux courants de contact et induit, aux densités de courant et aux densités de puissance.

### 1.2.2.4 Lien entre niveaux de référence et restrictions de base

Les niveaux de référence sont obtenus à partir des modules des champs électriques et magnétiques moyennés spatialement, ou des modules au carré des champs électriques et magnétiques, ou de la densité de puissance équivalente en onde plane le long d'un axe correspondant à l'axe du corps humain selon les critères suivants :

**Entre 100 kHz et 300 GHz :** les niveaux de référence sont dérivés de la limite en DAS corps entier, qui est proportionnelle à la densité de puissance équivalente en onde plane moyennée spatialement ou aux modules de E et H au carré moyennée sur la surface illuminée du corps. Les niveaux de référence correspondent donc à la densité de puissance équivalente en onde plane ou à l'amplitude au carré de E et H moyennées sur la surface du corps. En pratique, une mesure sur la longueur du corps est suffisante pour évaluer l'exposition et la comparer aux niveaux de référence préconisés par l'IEEE [6] ou par l'ICNIRP [7].

**Au-delà de 3 GHz :** les niveaux de référence sont exprimés en densité de puissance incidente. Pour assurer la continuité avec les normes entre 3 GHz et 6 GHz, soit les valeurs locales de DAS, soit les densités de puissance incidentes sont évaluées. Entre 3 GHz et 30 GHz, la densité de puissance est moyennée sur n'importe quelle surface continue de 0,01 m<sup>2</sup> (100 cm<sup>2</sup>) et ne doit pas excéder 1000 W/m<sup>2</sup> sur 1 cm<sup>2</sup> obtenu par mesure de champ ou par calcul [6].

Selon [7], les niveaux de référence sont indiqués à des fins d'évaluation pratique de l'exposition : il est en effet plus simple de mesurer le champ externe que le DAS dans une personne. Certains niveaux de référence sont dérivés des restrictions de base correspondants grâce à des mesures et/ou calculs et d'autres sont liés à la perception et aux effets nocifs indirects de l'exposition aux champs RF.

Les grandeurs dérivées sont les suivantes :

- le champ électrique E ;
- le champ magnétique H (ou l'induction B) ;
- la densité de puissance S ;
- le courant I induit dans les membres.

Les grandeurs liées à la perception sont les suivantes :

- le courant I de contact <sup>10</sup> ;
- l'absorption spécifique AS.

### Note sur la limite en DAS local membres de 20 W/kg pour les travailleurs

On se place au niveau de la cheville et on estime sa section efficace S à 10 cm<sup>2</sup>. Comme les niveaux de référence pour un courant induit dans un membre (entre 10 MHz et 110 MHz) indiquent un courant maximal I de 100 mA pour les travailleurs, on suppose que le courant I dans la jambe est de 100 mA.

Comme  $I = SJ \Rightarrow J = \frac{I}{S} = \frac{100e-3}{10e-4} = 100 \text{ A/m}^2$  et cette valeur est cohérente avec la limite en densité de courant J à 10 MHz préconisée par l'ICNIRP [7].

De plus, en supposant que la conductivité moyenne des tissus est  $\sigma = 0,5 \text{ S/m}$  dans la bande 10 à 110 MHz et que la masse volumique est  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , la densité de courant s'écrit  $J = E_{int} \sigma$ . Le champ électrique interne et le DAS s'écrivent donc  $E_{int} = \frac{J}{\sigma} = \frac{100}{0,5} = 200 \text{ V/m} \Rightarrow DAS_{10g-cheville} = \frac{\sigma E_{int}^2}{\rho} = 0,5 \frac{200^2}{1000} = 20 \text{ W/kg}$

La limite en DAS de 20 W/kg proposée par l'ICNIRP pour les membres est donc cohérente avec la limite en courant induit I et pourrait donc aussi s'expliquer par cette limite en courant.

Si l'on prend les valeurs de  $\sigma$  et S proposées par l'article [10], on a donc  $\sigma = 0,6 \text{ S/m}$  et  $S = 9,5 \text{ cm}^2$ , ce qui donne  $J = 105 \text{ A/m}^2$  ;  $E_{int} = 175 \text{ V/m}$  ;  $DAS_{10g-cheville} = 18 \text{ W/kg}$ . Cela confirme la cohérence entre les limites en DAS, en densité de courant J et celles en courant induit autour de 10 MHz.

De plus, la recommandation militaire de l'OTAN (STANAG [2]) précise que la conformité en limite de courant induit dans le corps permet d'assurer la conformité en DAS local sur les poignets et chevilles limitée à 20 W/kg. Cela permet de confirmer les remarques précédentes.

---

<sup>10</sup>. Selon l'IEEE [6], le courant de contact est le courant induit dans un milieu biologique via une électrode conductrice ou une autre source de courant.

### 1.2.3 Evolution des normes

#### 1.2.3.1 Normes publiées par l'ANSI et l'IEEE

Dans les normes IEEE/ANSI de 1966 [8] et de 1974 [20] (premières versions de la norme C95.1 de l'IEEE), aucune limite sur le DAS n'est formulée. Ce sont des limites sur la densité de puissance qui sont données (exposition maximale de  $100 \text{ W/m}^2$ ) ainsi que des limites sur les champs électriques et magnétiques pour [20]. L'exposition est limitée à 0,1 h (6 min) dès les premières versions de la norme C95.1 car 6 min correspond à la constante thermique temporelle d'organes importants (yeux et testicules) selon les comités normatifs (cf section 1.2.1.3).

Dans la norme publiée en 1982 [5], la notion de DAS apparaît. La dosimétrie devient importante et cette norme propose des limites sur une plus large bande de fréquence que les versions précédentes.

A partir de la version de 1991 [4], la catégorie *environnement non-contrôlé* apparaît. Un facteur de précaution supplémentaire est donc ajouté aux limites précédentes (cf 1.2.1.2). La valeur de DAS corps entier limite devient donc  $0,08 \text{ W/kg}$  pour les personnes en environnement non-contrôlé et reste à  $0,4 \text{ W/kg}$  pour les personnes en environnement contrôlé, alors que précédemment la limite était de  $0,4 \text{ W/kg}$  pour tout le monde. Le facteur supplémentaire de précaution de 5 est aussi appliqué aux limites d'expositions localisées.

Dans la version publiée en 2005 [6], les valeurs seuil sont des valeurs d'action à partir desquelles un programme de protection des RF doit être défini. Ce programme de protection vise à définir une signalisation, des campagnes d'informations, ... pour que les personnes exposées prennent conscience de l'exposition et de ses risques potentiels. Une harmonisation avec les autres normes (notamment avec [7]) a été réalisée.

Dans [6], le comité a distingué trois bandes de fréquence selon les effets relevés sur l'être humain :  
**Entre 3 kHz et 5 MHz** : les limites ont pour but de minimiser les effets dus à l'électrostimulation<sup>11</sup> ;

**Entre 100 kHz et 3 GHz** : les limites ont pour but de minimiser les effets dus à l'électrostimulation et à l'échauffement des tissus ;

**Entre 3 GHz et 300 GHz** : les limites ont pour but de minimiser les effets dus à l'échauffement des tissus.

La norme IEEE de 2005 [6] indique qu'il y a peu d'études mettant en évidence des maladies ou blessures résultant d'une exposition électromagnétique RF quand celle-ci reste dans les limites préconisées par la norme. Le risque de brûlures RF lors de contact avec des équipements est bien connu des travailleurs et des comités médicaux et c'est l'un des risques principaux dont il faut se protéger selon [6].

De plus, la norme inclut une marge très conservatrice car avec ces facteurs de précaution, les personnes sont protégées des phénomènes de perception (électrostimulation, changement de comportement, stress thermique) qui sont moins dangereux que les dommages réversibles sur les tissus ou toute autre pathologie permanente pouvant apparaître aux niveaux d'expositions bien supérieurs à ceux de la norme et des phénomènes de perception.

Entre 3 kHz et 5 MHz, l'IEEE indique dans son annexe C [6] utiliser les champs électriques internes plutôt que les densités de courant pour ses limites, car la conductivité  $\sigma$  liant la densité de courant et le champ E interne rajoute une incertitude. Le calcul du champ E interne serait moins sensible aux hypothèses sur les conductivités des tissus que la densité de courant interne. Donc le comité a préféré utiliser le champ électrique interne pour formuler ses restrictions de base associées aux effets d'électrostimulation.

Les tableaux A.18 à A.20 présentent les évolutions des niveaux de référence et des restrictions de base entre 1979, première version de la norme C95.1 [20] et 2005, dernière version de la norme C95.1 [6].

11. Stimulation d'un élément nerveux ou musculaire par un courant électrique

### 1.2.3.2 Normes publiées par l'IRPA et l'ICNIRP

En 1974, l'IRPA (Association Internationale de Radio Protection) constitue un groupe de travail sur les rayonnements non-ionisants qui devient en 1977 l'INIRC (Comité International des Rayonnements Non-Ionisants). L'INIRC rédige un premier guide en 1988 [21].

En partenariat avec l'OMS<sup>12</sup>, l'INIRC a rédigé des documents sur les critères d'hygiène relatifs aux rayonnements non-ionisants. Ces documents donnent un aperçu du caractère physique de ces rayonnements, des techniques de mesure des applications et une analyse des effets biologiques de ces rayonnements ou des risques. Ils ont servi de base de données scientifique pour l'établissement des limites d'exposition.

En 1992 est créée l'ICNIRP (Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants), successeur de l'INIRC. Cette commission est chargée d'étudier les risques potentiels liés aux rayonnements non-ionisants, d'élaborer des guides pour l'établissement de limites d'exposition et traitement de tous les aspects de la protection contre ces rayonnements.

Le guide rédigé par l'ICNIRP de 1998 [7] s'appuie principalement sur deux études [22] et [23]. Seuls les effets avérés ont été retenus comme fondement pour les valeurs limites d'expositions proposées :

- stimulation des muscles ou des nerfs périphériques ;
- chocs et brûlures provoqués par le contact avec des objets conducteurs ;
- échauffement des tissus.

Concernant les effets à long terme, le comité a considéré qu'il n'y avait pas suffisamment de données indiquant de réels effets pour formuler des limites.

Dans les recommandations de l'ICNIRP 1998 [7], la distinction entre *Travailleurs* et *Population générale* est également faite et apparaissait déjà dans la version de 1988 [21]. Dans la version de 1988, la distinction a lieu pour les valeurs maximales d'exposition de champs électrique et magnétique ainsi que pour les densités de puissance. Mais pour les limites en DAS, la distinction n'est formulée que pour le DAS corps entier. Des limites de DAS 10 g sont données mais uniquement pour les travailleurs. Cependant, les limites en DAS sont les mêmes que celles apparaissant dans l'ICNIRP 1998, sauf dans le cas d'une exposition locale de la population générale puisqu'aucune valeur de DAS n'est donnée.

Pour des expositions entre 3 kHz et 5 MHz, les limites dans [7] sont formulées en termes de densité de courant alors que l'IEEE [6] les formule en termes de champ électrique interne. Des différences sur les niveaux de référence sont également relevées entre les dernières recommandations données par l'ICNIRP et l'IEEE [7] et [6]. En effet, l'ICNIRP s'est basée sur un article de Bernhardt [24] pour donner ses limites en densité de courant. Celui-ci indique que c'est le champ électrique qui quantifie les effets biologiques dans les tissus (particulièrement visible avec des cellules excitables électriquement comme les muscle). Mais de nombreuses études portant sur la stimulation de cellules nerveuses ou musculaires utilisent la densité de courant et non le champ électrique interne pour quantifier les effets. C'est pourquoi la densité de courant a d'abord été utilisée dans les recommandations de l'ICNIRP ou de l'IEEE [4] pour définir les effets biologiques cellulaires.

Cependant dans la recommandation de l'ICNIRP pour les basse fréquences [12], le champ électrique interne est utilisé et non la densité de courant, ce qui laisse à penser que l'ICNIRP utilisera peut-être le champ électrique interne pour sa prochaine révision. Les tableaux A.21 à A.23 présentent les évolutions des normes de l'IRPA et de l'ICNIRP de 1988 à 1998.

## 1.2.4 Autres normes spécifiques aux environnements militaires

### 1.2.4.1 Norme de l'OTAN : STANAG 2003

Des recommandations sont également publiées par l'OTAN [2], mais elles sont uniquement destinées aux personnes engagées dans des opérations de l'OTAN et exposées aux champs RF. Il n'y a pas de

---

12. Organisation Mondiale de la Santé

| Fréquence       | Recommandations STANAG  |
|-----------------|---|
| 3 kHz - 100 kHz | $J < 0,35f$ A/m <sup>2</sup> pour 1 cm <sup>2</sup> de tissu en 1 s <i>f en kHz</i> |
| 100 kHz - 6 GHz | Recommandations sur le DAS  |
| $f > 6$ GHz     | Recommandations sur la densité de puissance   |

TABLE 1.2 – Grandeurs utilisées en fonction de la fréquence pour la recommandation STANAG 2003 [2]

| Fréquence f [MHz] | Champ E [V/m] | Champ H [A/m] | Densité de puissance pour (E,H) [W/m <sup>2</sup> ]      | Temps moyen [min]       |
|-------------------|---------------|---------------|--|-------------------------|
| 0,003 - 0,1       | 614           | 163           | (10 <sup>3</sup> , 10 <sup>7</sup> )                     | 6                       |
| 0,1 - 3           | 614           | 16,3/f        | (10 <sup>3</sup> , 10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup> )     | 6                       |
| 3 - 30            | 1842/f        | 16,3/f        | (9000/f <sup>2</sup> , 10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup> ) | 6                       |
| 30 - 100          | 61,4          | 16,3/f        | (10, 10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup> )                   | 6                       |
| 100 - 300         |               |               | f/30   | 6                       |
| 300 - 15000       |               |               | 100  | 6                       |
| 15000 - 300000    |               |               | 100  | 616000/f <sup>1,2</sup> |

TABLE 1.3 – Limites sur les champs électrique et magnétique entre 3 kHz et 300 GHz - STANAG 2003 [2]

distinction entre population générale et travailleurs, car les personnes concernées par cette norme sont toutes supposées *Travailleurs*.

Le tableau 1.2 donne les différentes grandeurs utilisées pour les restrictions de base dans la recommandation STANAG. Les limites en DAS sont appliquées entre 100 kHz et 6 GHz. La densité de courant est utilisée pour limiter les phénomènes d'électrostimulation donc pour des fréquences inférieures à 100 kHz. La densité de puissance est utilisée pour des fréquences supérieures à 6 GHz. Les limites sur la densité de puissance sont moins restrictives que celles préconisées par l'ICNIRP [7].

Pour le DAS, les limites locales sont moyennées sur 10 g de tissu pour la zone *membres* alors qu'elles sont moyennées sur 1 g pour les autres tissus. De plus, il est limité à 8 W/kg sur 1 g de tissu dans l'œil ou limité à 0,4 W/kg sur tout l'œil, sachant que l'œil a une masse d'environ 7 g.

Les limites concernant les champs électrique et magnétique externes, les courants et les densités de puissance équivalente en onde plane sont données dans les tableaux 1.3, 1.4 et 1.5. Les limites sur la densité de puissance équivalente en onde plane sont moins restrictives que celles données pour les travailleurs par l'ICNIRP, contrairement aux limites en courant et champ qui sont équivalentes à celles de l'ICNIRP.

| Fréquence f [MHz] | Courant maximal dans les 2 pieds [mA] | Courant maximal dans un pied [mA] | Courant de contact [mA] | Temps moyen |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------|
| 0,003 - 0,1       | 2000f                                 | 1000f                             | 1000f                   | 1 s         |
| 0,1 - 100         | 200                                   | 100                               | 100                     | 6 min       |

TABLE 1.4 – Limites sur les courants induits et les courants de contact entre 3 kHz et 100 MHz - STANAG 2003 [2]

| Fréquence f<br>[MHz] | Valeur maximale de<br>la moyenne<br>quadratique du<br>champ [ $V^2/m^2$ ou<br>$A^2/m^2$ ] | Densité de<br>puissance<br>équivalente<br>[ $W/m^2$ ] | Temps moyen<br>[min] |
|----------------------|---|---|----------------------|
| 0,1 - 300            | $< 20[E]^2$ ou $20[H]^2$  |   |                      |
| 300 - 6000           |   | $< 200$   | 6                    |
| 6000 - 15000         |   | $< 200(f/6000)^{0,25}$                                | 6                    |
| 15000 - 96000        |   | $< 200(f/6000)^{0,25}$                                | $616000/f^{1,2}$     |
| 96000 - 300000       |   | 400   | $616000/f^{1,2}$     |

TABLE 1.5 – Limites sur les champs et densités de puissance équivalente en onde plane pour des expositions partielles du corps entre 0,1 MHz et 300 GHz - STANAG 2003 [2]

#### 1.2.4.2 Norme IEEE pour les milieux militaires

En 2014, l'IEEE a publié une norme à destination des environnements militaires [25]. Contrairement à la norme destinée au public de 2005, celle-ci commence ses limites à 0 Hz alors que [6] les commençait à 3 kHz. Les limites sont données en *niveau d'exposition de référence* (ou en anglais Exposure reference levels ERL) et en *limites dosimétriques de référence* (ou en anglais Dosimetric reference limits DRL).

Comme dans [6] et [7], la conformité en niveau d'exposition de référence (niveaux de référence) entraîne la conformité en limites dosimétriques de référence (restrictions de base), mais si la conformité en niveaux de référence n'est pas vérifiée, celle en restrictions de base peut quand même être vérifiée.

Quatre zones sont définies de la même manière que l'instruction du Ministère de la Défense français [1] décrite dans la section suivante. Les deux premières zones correspondent aux niveaux *environnement contrôlé* et *environnement non-contrôlé* :

**Zone 0** : correspond à la catégorie *environnement non-contrôlé* de [6] où l'accès est libre (les limites sont les plus restrictives) ;

**Zone 1** : correspond à la catégorie *environnement contrôlé* où l'accès est restreint.

Les deux autres zones sont définies de la manière suivante :

**Zone 2** : où l'accès est strictement réservé aux experts ;

**Zone 3** : où l'accès est strictement interdit.

La figure 1.5 donne un exemple de définition de ces quatre zones à une fréquence donnée : toutes les zones vertes (zones 0 à 3) sont suffisamment protectrices en raison du seuil (4 W/kg corps entier) jugé conservatif définissant ces zones (car cette valeur-seuil de 4 W/kg correspond uniquement à un changement de comportement chez des animaux de laboratoire) [25].

Les principales différences avec la norme de l'IEEE de 2005 [6] sont les limites en courant induit qui deviennent moins restrictives à partir de 3 MHz : limite à 100 mA pour le courant de contact (prise) entre 100 kHz et 110 MHz [6] alors que dans cette norme militaire, la limite est de :

- 100 mA entre 100 kHz et 3 MHz ;
- $100(f/3)^{0,3}$  entre 3 et 30 MHz ;
- 200 mA entre 30 et 110 MHz [25].

Les limites sur les champs externes, internes et le DAS sont identiques à la norme IEEE de 2005 [6]. La figure 1.6 donne les valeurs des niveaux d'exposition de référence pour les zones 0 et 1.

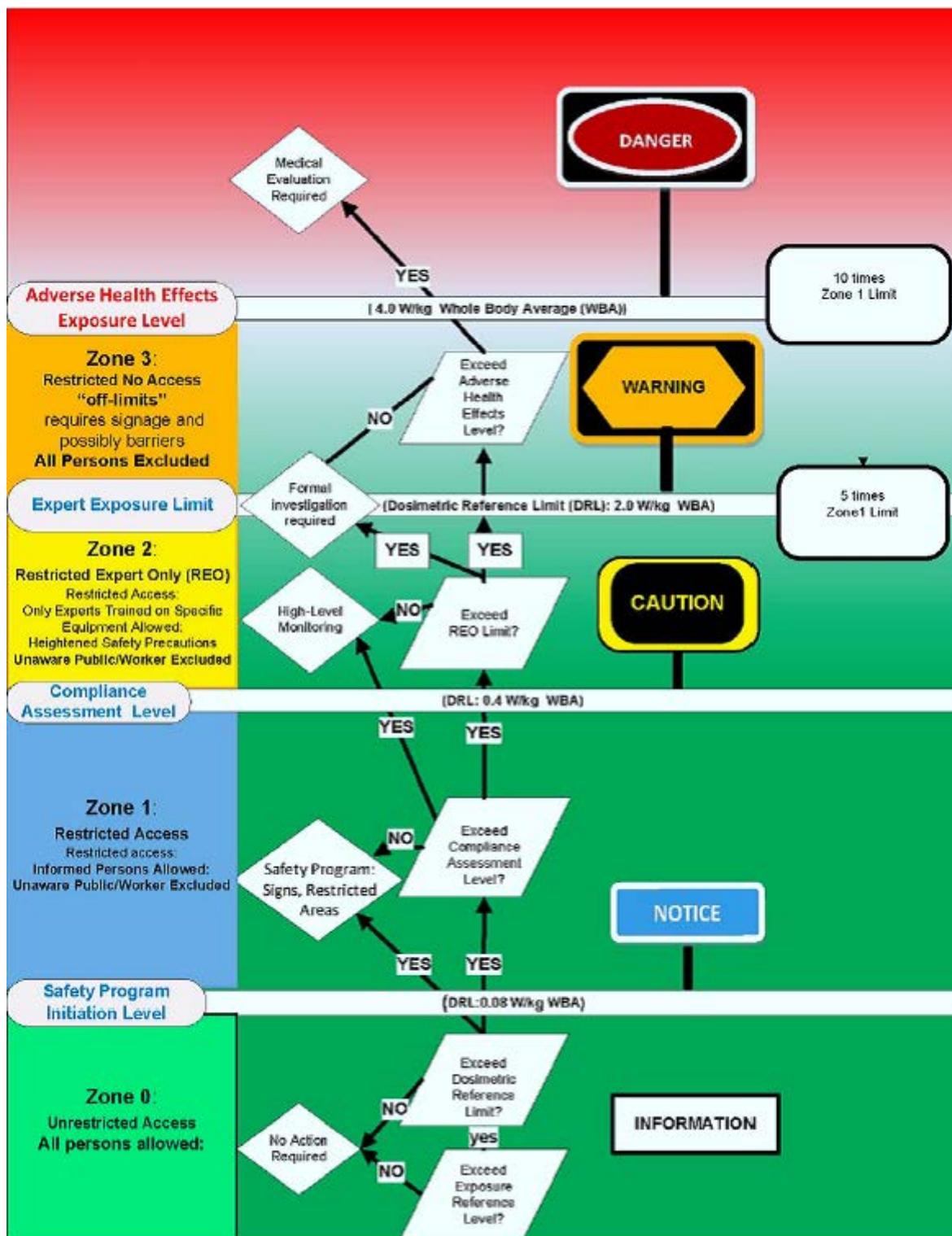
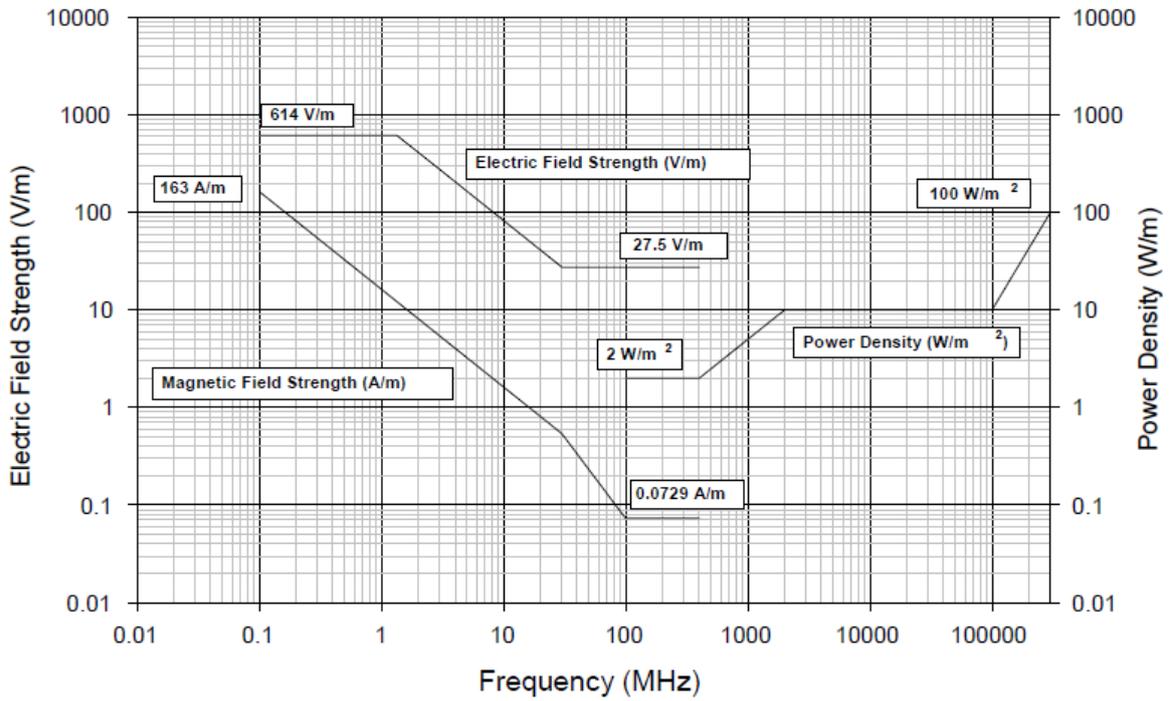
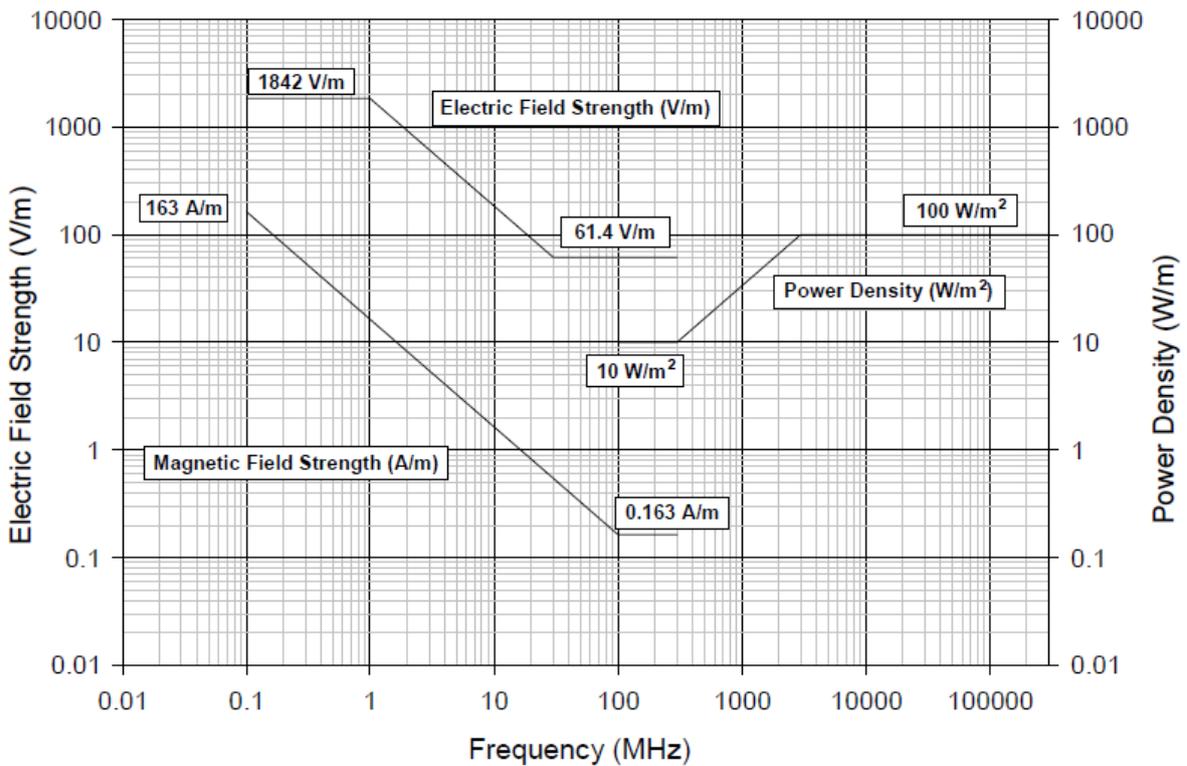


FIGURE 1.5 – Définition des zones d'exposition - Extrait de la norme IEEE relative aux environnements militaires [25]



(a) Zone 0



(b) Zone 1

FIGURE 1.6 – Représentation graphique des niveaux d'exposition de référence de la norme IEEE relative aux environnements militaires [25]

### 1.2.4.3 Norme militaire spécifique à la France : Directive du Ministère de la Défense

Le Ministère de la Défense français a publié en 2003 une directive basée sur les limites de l'ICNIRP [7] pour protéger les personnes contre les effets des champs électromagnétiques [1]. Ces limites sont identiques à celles données par la recommandation de 1998 de l'ICNIRP et sont complétées par des limites pour l'exposition des yeux. Ces limites particulières sont présentées dans le tableau 1.6.

La catégorie *habilité* correspond à la catégorie *Travailleurs* et la catégorie *non-habilité* à la catégorie *Population générale*. De plus cette directive introduit des zones permettant de définir les limites :

**Zone verte** : correspond à un environnement non-contrôlé donc à la population générale ;

**Zone jaune** : correspond à un environnement contrôlé donc aux travailleurs ;

**Zone orange** : est une zone où les limites des travailleurs peuvent être dépassées mais le temps d'exposition est restreint ;

**Zone rouge** : est une zone où l'accès est interdit.

La directive précise que dans le cas d'émetteurs à faible puissance dont la structure rayonnante risque de se trouver à moins de 2,5 cm du corps, seul un calcul ou une mesure de DAS ou d'AS permet de vérifier le respect des restrictions de base et donc de supprimer les restrictions d'emploi (ou de les adapter).

| Fréquence        | Exposition     |               | Limites en DAS et AS |          |
|------------------|----------------|---------------|----------------------|----------|
|                  |                |               | non-habilité         | habilité |
| 100 kHz - 10 GHz | Corps entier   |               | 0,08 W/kg            | 0,4 W/kg |
|                  | Localisée 10 g | tête et tronc | 2 W/kg               | 10 W/kg  |
|                  |                | membres       | 4 W/kg               | 20 W/kg  |
|                  |                | œil           | 0,08 W/kg            | 0,4 W/kg |
| 300 MHz - 10 GHz | Localisée 10 g | tête et tronc | 2 mJ/kg              | 10 mJ/kg |

TABLE 1.6 – Limites en DAS publiées dans la directive du Ministère de la Défense français de 2003 [1]

## 1.3 Effets avérés d'une exposition

### 1.3.1 Introduction

La norme IEEE de 2005 [6] a rassemblé environ 1300 publications depuis 1950 sur les effets biologiques des expositions RF et n'a révélé que des effets dus à l'électrostimulation et à l'échauffement des tissus. De plus, en examinant plus attentivement la littérature, aucun effet reproductible non-thermique, même faible, sur la santé n'a été trouvé, et ce, même avec des conditions extrêmes d'exposition.

Les conclusions faites à l'issue d'études animales n'indiquent aucun effet sur le développement ou la reproduction pour des DAS corps entier inférieurs à 4 W/kg, ni d'augmentation de température significative. Concernant les expositions humaines, aucun effet n'a été observé pour des expositions respectant les limites normatives. Les résultats de plusieurs études ont confirmé que la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique pouvait être affectée par une augmentation significative de température causée par l'absorption d'énergie RF mais aucune étude n'a pu montrer que c'est un effet répétitif à faible niveau. Cependant pour des DAS corps entier inférieurs à 4 W/kg, il n'y a pas de résultat probant montrant un changement d'efficacité de la barrière hémato-encéphalique.

Les effets néfastes d'exposition RF sur l'œil (comme la cataracte) sont seulement associés à des augmentations locales de température significatives dues à l'absorption d'énergie. Il n'y a pas d'autres effets notables pour les yeux pouvant justifier un changement de la base normative de 4 W/kg sur le corps entier.

Quelques études ont rapporté des effets dus à des expositions RF sur les fonctions in-vitro de la membrane et la fuite de protéines à travers des membranes cellulaires et artificielles, car l'exposition peut produire une augmentation locale de température pouvant contribuer à ces effets. Il existe de nombreuses études portant sur la fluidité membranaire et le transport des ions influencé par l'exposition RF (effets thermiques).

Les études humaines ont permis de répertorier plusieurs effets :

- fonction cognitive ;
- mémoire ;
- troubles du sommeil ;
- maux de tête ;
- hypersensibilité ;
- pression artérielle ;
- ...

Cependant, aucune étude n'a permis de montrer un lien entre ces effets et les expositions RF mais la recherche sur ce sujet continue à cause des résultats parfois contradictoires.

Des études sur des animaux exposés quotidiennement aux champs RF (exposition chronique avec un DAS compris entre 0,5 et 4 W/kg) n'ont pas montré d'effet néfaste.

De plus, des études ont été faites pour examiner l'ADN (mutation, cassure ...), les chromosomes, la formation et le cycle cellulaire ou la toxicité des cellules mais la majorité d'entre elles ne rapporte aucun effet. Cependant les conditions initiales d'expérimentation ne sont pas toujours reproductibles et/ou les résultats ne sont pas statistiquement significatifs.

Cette partie s'intéressera d'abord aux mécanismes biologiques survenant lors d'une exposition, puis aux effets thermiques sur l'homme et leurs conséquences, enfin les autres effets en cours d'étude et les effets retenus pour établir les normes seront présentés.

### 1.3.2 Mécanismes d'interaction lors d'une exposition électromagnétique

L'analyse des mécanismes biologiques et biophysiques est importante car elle permet d'évaluer la pertinence des différentes conclusions et explications proposées pour certains résultats d'études.

Dans le cas d'exposition à des champs entre 3 kHz et 300 GHz, les mécanismes physiques d'interaction permettent de comprendre pourquoi tel tissu ou tel organe est affecté et à quel niveau. Les mécanismes biologiques pour la thermorégulation, les réponses sensorielles à la température de la peau et les réponses auditives aux champs pulsés sont, par exemple, des facteurs critiques pour justifier l'utilisation de certains résultats d'études animales de laboratoire ou de sujets humains.

De plus, le développement de normes requiert une différenciation entre mécanismes établis et spéculés. Les mécanismes établis provoquent des réactions qui sont comprises en termes de mécanismes biologiques et biophysiques. S'ils ne provoquent pas d'effets nocifs même à forte dose, ils ne sont pas utiles pour définir les limites quantitatives requises pour l'élaboration des normes et recommandations.

Les mécanismes spéculés sont ceux dont il n'est pas possible de les expliquer clairement et suffisamment pour définir des niveaux d'interaction avec l'homme. Ils n'ont pas non plus de *réel support* au niveau de la littérature expérimentale.

Un certain nombre de mécanismes établis et spéculés d'interaction RF avec les systèmes biologiques est proposé dans l'annexe B de [6], cependant les mécanismes formant la base des limites et des guides d'exposition (donc établis) sont les suivants :

- Thermique ;
  - réactions systématiques (système de thermorégulation),
  - chaleur localisée,
  - micro-thermique (insignifiante),
- Effets champs forts sans lien avec les champs faibles ;
  - champ fort à pulsation courte,
  - champ RF pulsation courte,

- chocs RF et brûlures,
- Electrostimulation.

### Confort thermique chez l'homme

La chaleur métabolique est la chaleur requise par le métabolisme donc par le corps pour maintenir les fonctions vitales (respiration ou la circulation sanguine) à un niveau d'activité externe nul. Le taux de chaleur métabolique augmente avec le niveau d'activité. Il correspond à la conversion par le corps de l'énergie chimique des aliments (ou de la graisse) en chaleur qui est ensuite dissipée dans l'air.

Le confort thermique du corps humain dépend principalement de trois paramètres de l'environnement :

- la température ;
- l'humidité relative ;
- le mouvement de l'air.

Un fort taux d'humidité dans l'air ambiant empêche l'évaporation de la transpiration du corps donc empêche le refroidissement du corps. Alors que le mouvement de l'air (courant d'air) peut provoquer des refroidissements (ou échauffements) locaux de la peau et du corps, ce qui peut entraîner un inconfort.

La plupart des personnes se sentent confortables thermiquement pour une température moyenne de la peau à 33,3 °C alors qu'ils ont extrêmement froid pour une température moyenne de la peau à 29 °C. La première défense du corps face aux pertes de chaleur dans un environnement froid est de réduire la température de la peau et donc de réduire le transfert de pertes de chaleur vers la peau en contractant les veines et diminuant le flux sanguin vers la peau. Cela fait diminuer la température des tissus adjacents à la peau mais permet de maintenir constante la température à l'intérieur du corps pour protéger les organes vitaux.

En environnement chaud, les pertes de chaleur du corps sont inférieures au taux de chaleur métabolique. Donc le corps active des mécanismes opposés, le corps augmente le flux sanguin et donc le transport de chaleur vers la peau, ce qui permet d'augmenter la température de la peau et des tissus adjacents et donc se rapprocher de la température interne du corps. Le corps va aussi augmenter la sécrétion d'eau des glandes sudorales<sup>13</sup> et l'éliminer via la transpiration sur la peau. Le corps peut maintenir une température constante de 37 °C indéfiniment grâce à ce mécanisme de transpiration si la personne boit en permanence de l'eau et si l'air ambiant est suffisamment sec pour que la sueur s'évapore au lieu de stagner sur la peau. Une personne peut tolérer une augmentation de température interne de 1,4 °C sans inconfort majeur mais peut avoir un malaise si l'augmentation atteint 2,8 °C. En général, les personnes se sentent léthargiques et moins efficaces quand leur température corporelle monte à 39 °C. Une température supérieure à 41 °C peut endommager le fonctionnement de l'hypothalamus entraînant :

- un arrêt de la sécrétion de sueur ;
- une augmentation de la production de chaleur par les frissonnements ;
- un coup de chaleur irréversible ;
- voire un dommage vital.

La mort peut survenir au-dessus d'une température corporelle de 43 °C. Cependant une personne peut rester dans une pièce à 100 °C pendant 30 min sans subir aucun dommage ou douleur sur la peau grâce au refroidissement par évaporation et à la résistance de convection à la surface de la peau [6] [26].

### 1.3.3 Principales études sur les effets des rayonnements RF

#### 1.3.3.1 Effets thermiques reconnus lors d'exposition RF : sensations et thermorégulation

En 1998, Adair *et al* [27] ont mesuré les températures de volontaires exposés à une onde RF sur tout le corps à 450 MHz en onde plane polarisée verticalement. Cette étude est la première décrivant

13. Glandes sécrétant la sueur

en détail les effets thermo-physiologiques d'une exposition RF en corps entier sur des personnes en environnement contrôlé thermiquement. Les personnes ont été exposées à deux densités de puissance (18 et 24 mW/cm<sup>2</sup>, soit un champ électrique de 260 V/m et 300 V/m) avec des températures environnantes de 24, 28 et 31 ° C pour une durée de 45 min. Avant l'exposition, la personne est placée dans la chambre anéchoïque pendant 30 min afin que sa température corporelle s'habitue à la température ambiante et se stabilise. Cela permet de voir si la température ambiante déclenche déjà des phénomènes de thermorégulation dans le corps. Par exemple pour une température ambiante de 31 ° C, Adair *et al* ont constaté que le mécanisme de transpiration est déclenché avant même l'exposition sur certains volontaires, notamment chez les hommes. Cela a permis de montrer que la température de l'œsophage peut être utilisée pour mesurer la température interne du corps, car elle est relativement simple à mesurer (mesure peu invasive) et est peu sensible aux changements de posture. De plus, les auteurs ont remarqué qu'elle variait peu entre les diverses étapes de mesure (les expériences étant étalées sur 5 mois le matin et l'après-midi).

La température moyenne de la peau a été calculée selon les températures pondérées de certaines zones du corps :

$$T_{peau} = 0,18 T_{bras} + 0,23 T_{jambe} + 0,21 T_{front} + 0,17 T_{bas-dos} + 0,11 T_{haut-dos} + 0,1 T_{poitrine} \quad (1.8)$$

Durant toute l'expérience, des questions ont été posées aux volontaires sur :

- leur confort thermique ;
- les sensations de froid ou de chaleur ;
- les sensations thermiques sur la peau ;
- la transpiration ressentie par les volontaires ;
- si l'air ambiant est confortable ou ;
- s'ils préfèrent un environnement plus froid ou plus chaud.

Durant les expériences les auteurs ont constaté que même si les conditions ambiantes étaient jugées inconfortables par les volontaires, la température interne du corps restait régulée grâce aux différents mécanismes du corps, notamment grâce à la transpiration. De même, ils ont mesuré une augmentation de 2,6 ° C de la température de la peau tout en gardant une température de l'œsophage donc du corps relativement constante.

En 1999, Foster *et al* [28] ont étudié plusieurs expositions RF et leurs effets thermiques. Ils ont repris certains résultats de Blick *et al* [29] donnant les niveaux de densité de puissance entraînant des perceptions de chaleur ou de brûlure, et ont ainsi constaté que sur une zone localisée, pour une exposition de 10 s, le niveau de perception de chaleur est de 0,08 ° C sur la peau et que c'est à partir d'une élévation de 8 ° C sur la peau qu'une personne ressent une douleur ou brûlure. Les auteurs ont ainsi constaté que la réponse thermique du corps était différente selon l'exposition à cause de la fréquence d'exposition et de la nature de l'exposition (onde plane, proximité d'une antenne, contact avec des électrodes ...) ou selon la personne exposée. Une personne âgée sera par exemple moins sensible aux élévations de température sur la peau. De plus, le système de thermorégulation n'est pas le même entre les êtres vivants car l'homme semble réguler plus efficacement sa température que certains animaux.

En 2003, Adair et Black [30] ont publié un article expliquant les principales réponses de thermorégulation du corps lors d'une absorption d'énergie RF. Il existe dans le corps humain deux systèmes distincts de thermorégulation :

**La thermorégulation comportementale :** actes conscients et volontaires permettant d'ajuster les caractéristiques de l'interface peau/air comme enlever ou mettre un vêtement ;

**La thermorégulation autonome ou physiologique :** réponses involontaires du corps pour générer ou dissiper la chaleur du corps.

Lors d'activités sportives, c'est principalement la thermorégulation physiologique qui permet de réguler la température du corps. La chaleur présente dans le corps, perdue par le corps ou générée par le corps répond à la loi de conservation d'énergie et s'exprime par l'équation 1.9 :

$$M + W = R + C + E + S \quad (1.9)$$

avec

- M chaleur métabolique ;
- W chaleur générée par le travail du corps ;
- R échange de chaleur par radiation ;
- C échange de chaleur par convection ;
- E échange de chaleur par évaporation ;
- S chaleur stockée par le corps.

Ces grandeurs peuvent être positives ou négatives, cela dépend du corps qui reçoit ou perd de la chaleur.

La chaleur métabolique est la chaleur produite par le corps, circulant grâce au flux sanguin. Elle est principalement produite dans le tronc, le cerveau et les viscères. Le principal échange de chaleur par évaporation est la transpiration, donc l'efficacité de refroidissement dépend du taux d'humidité ambiant et de la surface d'évaporation. Pour se refroidir, le corps utilise également la vasodilatation. Cela permet de dilater les vaisseaux sanguins, donc d'avoir plus de place pour la circulation sanguine et donc de diminuer la pression sanguine.

Des thermocapteurs sont répartis sur tout le corps afin de donner au corps des informations sur les températures locales. Les thermocapteurs les plus importants sont situés sur la peau, au niveau de l'hypothalamus ou de la moëlle épinière. Ils envoient des signaux neurologiques que le corps interprète pour augmenter ou diminuer sa température.

En 2007, Hirata *et al* [31] ont étudié les élévations de température dues à une exposition en onde plane aux limites travailleurs de l'ICNIRP [7] à 65 MHz et 2 GHz. Ils ont constaté que l'évolution de la température du sang dépendait du taux de transpiration variable selon les personnes. De plus, ils ont constaté avec leur modèle qu'il fallait un DAS corps entier de 4,5 W/kg avec un faible taux de transpiration pour que le sang subisse une élévation de 1 °C. Ils ont également montré que la modélisation de la température sanguine était un facteur dominant pour caractériser la température du corps entier, car elle permet de prendre en compte les élévations de température des tissus internes. Cependant, avec leur modèle ils observent que la fréquence d'exposition a peu d'influence sur les élévations de température alors qu'elle influe beaucoup sur la distribution en DAS sur le corps. Dans le chapitre 3 de ce mémoire, nous observons également que la fréquence d'exposition n'influe pas sur les élévations de température moyennes du sang. En revanche, nous obtenons toujours des élévations de température du corps inférieures à 1 °C même pour un DAS corps entier de 4,5 W/g, cela est dû au choix de caractérisation de la température du corps entier.

### 1.3.3.2 Effets sur la reproduction et le développement

Selon la norme IEEE de 2005 [6], il n'y a apparemment pas d'autre effet indésirable résultant de l'exposition RF que les effets thermiques.

C'est en conditions extrêmes qu'il peut y avoir un effet sur la reproduction car l'augmentation de température pourrait causer un certain stress chez l'animal ainsi que chez l'homme. Il existe des cas particuliers mais il n'y a rien de générique permettant de conclure à un véritable risque sur la reproduction. Concernant les effets thermiques, la température des testicules (initialement autour de 33 - 35 °C) doit monter jusqu'à 37 - 38 °C pour qu'il y ait des problèmes temporaires d'infertilité [6]. Des études sur des rats ont montré qu'il fallait que la température monte à 45 °C pour que les problèmes d'infertilité soient permanents [32].

Concernant le développement, il peut y avoir des problèmes de développement chez les rats durant la gestation s'ils sont exposés à des DAS très élevés (16,6 - 22 W/kg), ayant pour conséquence par exemple de changer le nombre de cellules ou de modifier la taille du cerveau chez le fœtus et/ou chez le rat à la naissance [33] [34]. Mais ces effets restent des effets thermiques dus aux expositions RF.

Les études portant sur de potentiels effets indésirables de l'exposition RF entraînant un *stress de chaleur* chez des animaux ont montré que des augmentations significatives d'anormalités (dus à la chaleur) avaient lieu pour une augmentation de 2 - 2,5 °C pour une exposition de 10 min à 1 h. D'autres

études effectuées avec de faibles expositions n'ont pas réussi à montrer de liens entre expositions RF et effets non-thermiques par manque de rigueur ou de reproductibilité des études.

La norme IEEE [6] conclut que pour un DAS inférieur à 4 W/kg, il n'y a pas d'effets indésirables sur la reproduction ou le développement chez l'animal et chez l'homme.

### 1.3.3.3 Maladies de l'œil

Pour étudier le risque de cataracte, des études animales ont été réalisées. Des études sur des lapins et des singes ont bien mis en évidence des effets sur l'œil mais ils ne résultent pas systématiquement en des cataractes [14], [15], [16] et [35].

D'autres études plus récentes ont été réalisées sur des rats et des lapins [36] et [37], et aucune cataracte n'a été détectée (exposition à 2,45 GHz avec des DAS d'environ 100 W/kg). Des effets sur la cornée ou la rétine ont été observés et ces effets ne sont pas forcément irréversibles. Les effets sont différents d'un animal à l'autre sûrement à cause de la morphologie de la tête. Il semble que les primates (dont l'Homme fait partie) sont moins sensibles que les lapins aux expositions RF.

Un livre publié par l'ICNIRP [38] indique que l'œil est probablement plus sensible aux RF car il est moins vascularisé et aurait donc une capacité limitée pour dissiper la chaleur induite par les expositions RF. D'ailleurs des cataractes ont été diagnostiquées chez des lapins anesthésiés et exposés pendant 100 à 200 min où la température de l'œil s'élevait à 41 - 43 ° C, correspondant à un DAS localisé de 100 - 140 W/kg.

Selon [38], des études récentes ont confirmé que l'anesthésie réduisait les capacités de thermorégulation de l'œil car la pression sanguine était réduite et donc les effets thermiques étaient plus importants chez des animaux anesthésiés.

L'IEEE [6] indique également que la cataracte résulte de fortes augmentations de température, donc l'homme exposé ressentira d'abord des échauffements sur le visage. Mais dans les limites préconisées par l'IEEE et l'ICNIRP, aucun effet n'est constaté. Il n'y a donc actuellement aucune raison de remettre en cause (c'est-à-dire de diminuer) les valeurs des restrictions de base ou les niveaux de référence, et donc de donner des limites particulières pour l'œil.

### 1.3.3.4 Effets biochimiques

La norme développée par l'IEEE et publiée en 2005 [6] indique que certaines études ont constaté des effets sur l'hématologie et l'immunologie chez les animaux et des modèles *in vitro*. La majorité de ces études a été réalisée à des niveaux thermiques élevés d'exposition RF (DAS corps entier supérieur à 100 W/kg) et les effets sont dus aux températures élevées. Pour les études réalisées à de faible niveau d'exposition (pour observer les potentiels effets non-thermiques), les résultats sont généralement contradictoires entre eux et avec les nombreuses études ne montrant aucun effet dans les mêmes conditions d'exposition.

Les auteurs de [38] ont constaté que plusieurs études avaient réussi à montrer que l'exposition RF avait des effets sur l'activité cérébrale (modification d'électro-encéphalogramme) a priori sans conséquence néfaste sur la santé.

Les auteurs de [6] indiquent que les résultats de différentes études ont montré qu'à faible exposition, il n'y avait pas d'effet et qu'à forte exposition, la barrière hémato-encéphalique était affectée par l'augmentation de température. Par exemple, à cause de la chaleur, la barrière hémato-encéphalique peut laisser passer de grandes protéines (comme l'albumine<sup>14</sup>) ou des virus ou encore certaines drogues. Avec un DAS local de 2 W/kg au niveau de la tête, l'échauffement est de 0,2 ° C, ce qui est insuffisant pour modifier la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique. D'ailleurs, les études réalisées à des expositions de moins de 4 W/kg ne sont pas prises en compte lors de l'établissement des normes (pour l'IEEE) car les effets ne sont pas confirmés et le lien entre exposition et effet n'est pas évident.

---

14. Protéine transportant notamment les acides gras, certaines hormones et drogues, servant également de réserve d'acides aminés

Concernant la biochimie membranaire, ce sont les effets thermiques qui causent des changements au niveau de la fluidité de la membrane et du transport ionique. Les études réalisées sur la concentration de certains ions dans le sang ont principalement été faites sur des animaux. Les échauffements liés à l'exposition RF peuvent entraîner des changements de concentration en potassium  $K^+$ , en calcium  $Ca^{2+}$  et en sodium  $Na^+$  dans le sang.

Pour des expositions à faible puissance, les études et les effets ne sont pas bien définis, ni caractérisés : rien n'est relevé pour les ions  $Ca^{2+}$ . Or s'il y avait un effet sur le transfert des ions  $Ca^{2+}$ , cela devrait influencer les tissus nerveux, ce qui n'est pas le cas selon l'IEEE [6].

Des problèmes sur les neurones peuvent avoir lieu à cause de l'échauffement mais si ce dernier est limité, il n'y a pas d'effet sur les neurones dû à des expositions RF.

### 1.3.3.5 Perception auditive des RF et électro-hypersensibilité

Le phénomène de perception des RF chez l'homme est un effet biologique bien connu sans conséquence sanitaire connue. Les bruits induits par les RF sont similaires à d'autres bruits courants. Ce sont des sons de faible intensité entendus plutôt dans des environnements calmes [6].

Lors d'études expérimentales sur la résonance magnétique sur la tête d'un homme, les champs RF peuvent causer une certaine pression sonore (jusqu'à 10 000 fois l'intensité faible d'un bruit RF) mais rien ne prouve que ce soit au détriment de la santé. Une comparaison avec l'échographie suggère que même cinq fois plus fort, il n'y aurait pas d'effet indésirable.

Concernant l'électro-hypersensibilité (EHS), il n'y a rien de concluant sur ce sujet. Des études ont montré l'absence d'effets et d'autres la présence d'effets sur la mémoire, la fatigue ... mais étant donné qu'il y a beaucoup de paramètres à prendre en compte lors de ces études, et que certaines personnes se déclarent atteintes de maux en présence de sources RF, la recherche sur ce sujet continue.

### 1.3.3.6 Etudes sur le cancer

Pour des DAS inférieurs à 4 W/kg, aucune étude n'a montré que l'exposition RF augmentait le risque de cancer et pourtant certaines études ont été faites sur de longues durées [6].

Les études épidémiologiques sur un lien potentiel entre l'exposition RF et l'apparition de cancer sont réparties en cinq groupes :

- Etudes sur des groupes de malades afin de constater s'ils étaient exposés fortement aux sources RF avant la déclaration de leur maladie ;
- Etudes de la population générale exposée aux sources RF (télévision, radio, transmetteur de communication) ;
- Etudes sur des groupes de travailleurs, personnes exposées plus fortement que la population générale mais l'exposition est aussi mieux contrôlée ;
- Etudes sur des cas particuliers contrôlés ;
- Etudes sur des utilisateurs de téléphones portables.

Il n'y a pas d'étude montrant clairement qu'il y a plus de cancer et/ou maladie résultant d'expositions RF. Mais dans la plupart des études, les données sont biaisées ou manquent de précision, donc rien ne prouve l'absence de risque mais s'il y en a, ils sont sûrement faibles selon l'IEEE [6].

### 1.3.4 Conclusion : effets établis formant la base normative

Les mécanismes entraînant l'échauffement des tissus biologiques par les expositions RF sont identifiés et l'échauffement est l'effet prépondérant lors d'une exposition RF, entraînant plusieurs réponses au niveau physiologique et pathologique chez des sujets animaux et humains. Cet échauffement est d'ailleurs le sujet de nombreuses études in-vitro et d'effets constatés.

Le seuil de 4 W/kg correspondant à un changement de comportement chez des animaux est utilisé comme base pour l'établissement des normes et recommandations sur les personnes. De plus, l'homme ayant un système de thermorégulation plus efficace que les animaux, le seuil de 4 W/kg semble bien choisi surtout que la plupart des études ne décèle aucun effet indésirable pour des DAS inférieurs à 4 W/kg.

Les études récentes se sont concentrées sur les expositions à faible niveau des RF, caractéristique de l'utilisation des téléphones portables afin de démontrer l'existence d'effets non-thermiques induits par les sources RF. Les résultats de ces études semblent indiquer que si ces effets existent réellement, ils sont faibles et difficilement détectables.

Concernant les effets sur le cancer, [38] indique que les études sur la génotoxicité<sup>15</sup> et la carcinogénèse<sup>16</sup> sont probantes et montrent que ces effets ne semblent pas apparaître pour des DAS inférieurs à 4 W/kg. En prenant en compte les études in-vitro sur les effets RF non-génotoxiques, les résultats sont plus ambigus mais les conséquences limitées. Les résultats d'études sur la prolifération cellulaire et la différenciation, la mort cellulaire et la mutation sont le plus souvent négatifs.

Il y a des preuves de petits changements sur la physiologie cérébrale, notamment grâce à des électro-encéphalogrammes spontanés et des preuves moins évidentes de changements au niveau du sommeil et de l'irrigation du cerveau localement. Mais les conséquences sont limitées au niveau fonctionnel. De plus, aucun changement pour les fonctions cognitives n'a été relevé.

Aucun effet non-thermique n'a pu être observé sur le système cardiovasculaire, le taux d'hormones ou les fonctions auditives (à part la perception auditive des RF pulsés). Cependant pour un échauffement suffisant, certaines études ont révélé un changement de concentration pour certaines hormones et protéines ou une légère altération de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique. Mais cela n'a eu lieu que pour une augmentation de température importante (température supérieure à 40 ° C) et cela reste réversible.

Les symptômes tels que les maux de tête, les troubles du sommeil... souvent imputés à l'électrohypersensibilité sont bien réels mais n'ont pas pu être reliés directement aux expositions RF durant les nombreuses études effectuées sur ce sujet [6] [38].

De plus la norme IEEE publiée en 2014 pour les militaires [25] indique que la majorité des surexpositions ne présente aucun symptôme, car les facteurs de précaution utilisés dans les normes sont très conservatifs. La plupart des personnes ne ressent rien de particulier et ne se rend même pas compte qu'elle est surexposée, mais en apprenant avoir été surexposées, quelques personnes développent des réactions aiguës d'anxiété et ont besoin d'être rassurées.

## 1.4 Moyens de mesure dosimétrique

### 1.4.1 Mesures expérimentales de DAS

Différents systèmes de mesure de DAS existent. Pour évaluer le DAS, la plupart de ces systèmes mesurent soit les champs électriques internes soit les augmentations de température dans le corps.

#### Détermination du DAS par la mesure de champs internes

Le principe de mesure est basé sur l'équation suivante :

$$DAS = \frac{\sigma}{\rho} E_{int}^2 \quad (1.10)$$

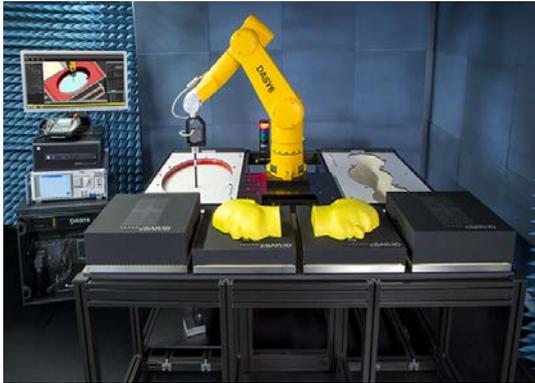
où

DAS Débit d'Absorption Spécifique [W/kg] ;

---

15. altération de l'expression des gènes

16. formation de cancers



(a) cSARD6 de SPEAG [39]



(b) Art-MAN de ART-Fi [40]

FIGURE 1.7 – Système de mesure de champ interne pour l'évaluation de DAS

$\sigma$  Conductivité du tissu [S/m] ;

$\rho$  Masse volumique du tissu [kg/m<sup>3</sup>] ;

$E_{int}$  Champ électrique interne dans le tissu [V/m].

Une sonde de champ électrique ou plusieurs sondes sont placées dans un fantôme homogène afin de mesurer le champ électrique. Ces sondes peuvent se déplacer mécaniquement dans le fantôme pour faire des mesures en plusieurs points ou être fixes.

Les fantômes utilisés pour ces mesures peuvent être de géométrie et morphologie différentes : humain, main, tête, plan ... Une sonde de champ est placée dans le fantôme liquide ou semi-liquide (figure 1.7). La plupart de ces systèmes de mesure fonctionnent entre 300 MHz et 6 GHz. Il faut en effet avoir des liquides équivalents pour chaque bande de fréquence et en-dessous de 300 MHz, les propriétés diélectriques des tissus peuvent fortement varier.

### Détermination du DAS par la mesure de température

Le principe de mesure de DAS par la température est basé sur l'équation suivante :

$$DAS = C \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (1.11)$$

où

DAS Débit d'Absorption Spécifique [W/kg] ;

C Capacité calorifique du tissu [J/kg/ ° C] ;

$\Delta T$  Elévation de température pendant la durée d'exposition [ ° C] ou [K] ;

$\Delta t$  Durée d'exposition [s].

Ces systèmes de mesure de DAS par la température utilisent des sondes de température ou des thermomètres infrarouges [41] [42] [43]. Des fantômes semi-solides ou solides sont utilisés. Cependant, il faut prendre en compte de nombreux facteurs extérieurs, par exemple :

- l'humidité de l'air ;
- les phénomènes de convection, ;
- les propriétés diélectriques des tissus pouvant varier avec la température, ;
- les variations de température qui ne sont pas instantanées.

Il est donc difficile de faire un scan de mesure de DAS en peu de temps contrairement aux sondes de champs électriques. Les sondes de température sont également limitées par leur sensibilité et aussi par les variations de température de l'air extérieur qui peuvent être supérieures à celles du système à mesurer. Ces systèmes de mesure sont donc peu adaptés aux émetteurs de faible puissance.

### Fantômes expérimentaux

Pour les mesures de DAS, des fantômes expérimentaux sont utilisés. Ils sont répartis en trois catégories :

- Fantômes solides ;
- Fantômes semi-solides ou gel ;
- Fantômes liquides.

Les fantômes solides (figure 1.8) sont remplis d'un liquide ayant des propriétés diélectriques équivalentes à celles du corps et recouverts d'une fine couche de résine (avec une permittivité très faible afin que les propriétés diélectriques du corps soient conservées). Cela permet d'obtenir des fantômes transportables et de différentes formes avec une durée de vie plus longue que les fantômes liquides ; le liquide s'altère moins vite puisqu'il n'est pas en contact avec l'extérieur. Ces fantômes sont plutôt utilisés pour faire des mesures à la surface du corps.



FIGURE 1.8 – Exemple d'un fantôme solide [44]

Les fantômes liquides permettent de faire des mesures de DAS à l'intérieur du fantôme mais pas à sa surface. L'enveloppe les contenant doit avoir une très faible permittivité pour ne pas modifier les propriétés diélectriques du corps. La figure 1.9 présente un exemple de fantôme liquide représentant la tête.

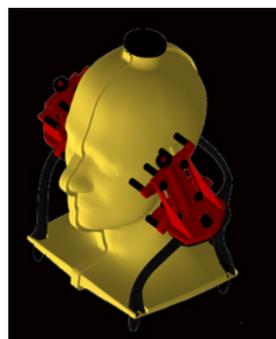


FIGURE 1.9 – Exemple de fantôme tête liquide [45]

Les fantômes semi-solides sont développés à partir de fantômes liquides dans lesquels un coagulant

a été ajouté [46]. Ces fantômes sont faciles à fabriquer, peu coûteux et il est possible d'avoir plusieurs couches. Ils sont utilisables à la fois pour des mesures internes au fantôme et pour des mesures en surface, cependant leur durée de vie est limitée (environ un mois) à cause notamment de l'évaporation et/ou de l'apparition de moisissures. Tout comme les fantômes solides, il est possible d'avoir des fantômes semi-solides de différentes formes. Comme ils sont composés de divers matériaux (solides, liquides et gels), il est facile également d'ajuster les propriétés (conductivité et permittivité) de ces fantômes en ajoutant de l'eau, du sel, de l'aluminium, etc permettant de couvrir de plus grandes bandes de fréquence [47] [48].

Ces trois types de fantômes restent difficilement utilisables au-dessous de 30 MHz, car les propriétés des tissus biologiques varient fortement dans cette bande de fréquence (notamment entre 1 et 10 MHz). Ils ne sont donc pas utilisés lors de la validation d'équipements militaires tactiques en HF et VHF. Il existe également peu de fantôme corps entier, car la plupart a été développée pour la téléphonie mobile, ce qui est peu adapté aux basses fréquences (de 1 à 90 MHz) où l'absorption d'énergie se produit principalement au niveau des membres : chevilles, genoux et poignets.

## 1.4.2 Moyens numériques

### 1.4.2.1 Modèles numériques de l'humain

Un modèle numérique d'un être vivant est appelé fantôme. Les premiers fantômes de l'humain datent de 1966. Le MIRD fantôme, développé par Snyder et Fisher, est un fantôme homogène<sup>17</sup> dont les organes sont modélisés par des géométries simples (cercle, ellipse, rectangle, trapèze). Ce fantôme possède 22 organes. C'est le premier fantôme anthropomorphe adulte unisexe utilisable pour la dosimétrie à l'intérieur du corps [49]. La figure 1.10 présente le premier fantôme hétérogène<sup>18</sup> MIRD-5 de 1969.

Les premiers fantômes masculin et féminin datent de 1982 avec le fantôme masculin Adam et le fantôme féminin Eva [50]. Ces fantômes sont dérivés du fantôme MIRD-5. Enfin en 1997, le fantôme MCAT est dérivé du fantôme MIRD-5 et prend en compte le mouvement cardiaque.

Ces fantômes sont des *Stylized phantoms*, ils ont une précision faible mais il est très facile de les déformer afin de simuler les mouvements ou de s'adapter à la morphologie des personnes.

Après les *stylized phantoms*, des fantômes de voxels sont apparus grâce au développement des CT scan<sup>19</sup> et des IRM<sup>20</sup>. Le principe de développement de ces fantômes est présenté en figure 1.11. L'avantage de ces fantômes est qu'ils ont une meilleure précision que les fantômes stylisés, cependant ils sont difficilement déformables et les images les constituant doivent être segmentées manuellement.

L'un des principaux fantômes de voxels est Visible Human issu du Visible Human Project [51]. Le Visible Human Project est dirigé par la National Library of Medicine des Etats-Unis et a pour objectif de créer une base de données d'images du corps humain. Ce projet a débuté en 1989 et s'est achevé en 1994 pour les images d'un homme et en 1995 pour celles d'une femme. Grâce à ce projet, de nombreux fantômes ont été développés en se basant sur les images du Visible Human Project, comme par exemple le fantôme Hugo (figure 1.12) utilisé avec le logiciel de simulation électromagnétique CST pour la dosimétrie non-ionisante.

Des fantômes de voxels asiatiques ont également été développés car la morphologie des Asiatiques est différente de celle des Caucasiens, comme par exemple les fantômes Taro et Hanako de 2004 [52] possédant une cinquantaine de tissus et ayant une résolution de 2 mm.

17. Un fantôme homogène est un fantôme où les tissus et organes ont les mêmes propriétés.

18. Un fantôme hétérogène est un fantôme où les propriétés des tissus et organes diffèrent.

19. Tomodensitométrie, technique d'imagerie médicale consistant à mesurer l'absorption des rayons X par le corps et à reconstruire des images du corps par traitement informatique

20. Imagerie par Résonance magnétique, technique d'imagerie médicale permettant d'obtenir des images en 2D ou 3D du corps

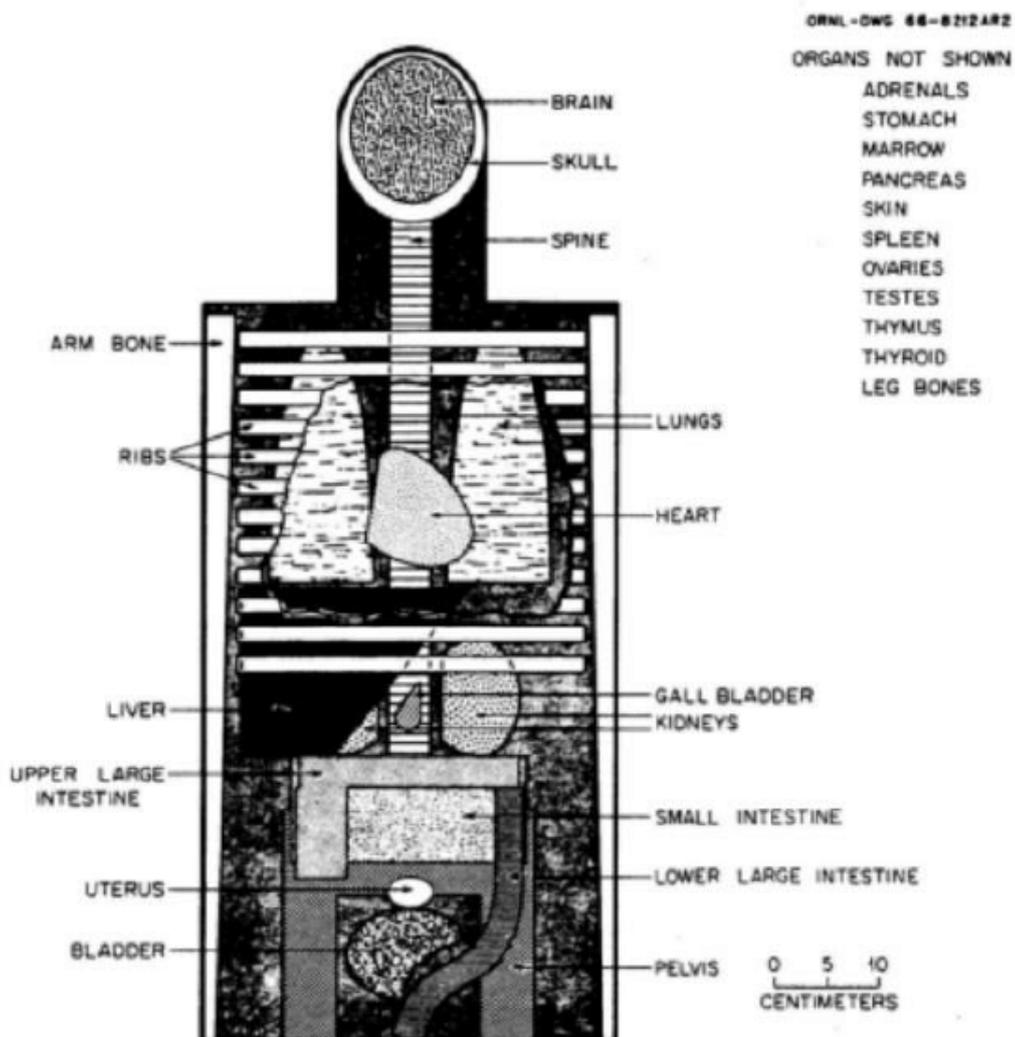


FIGURE 1.10 – Fantôme MIRD-5 hétérogène (1969)

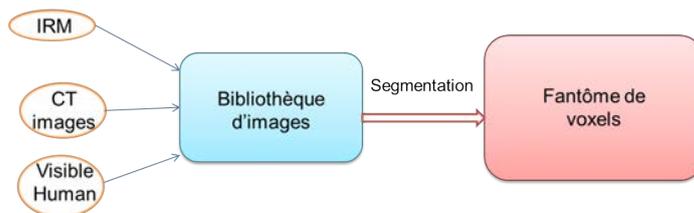


FIGURE 1.11 – Principe de développement d'un fantôme de voxels



FIGURE 1.12 – Fantôme Hugo issu du Visible Human Project [51]

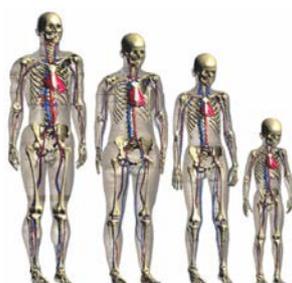


FIGURE 1.13 – Fantômes de la Virtual Family : Duke, Ella, Billie et Thelonius [3]

Des familles de fantômes de voxels ont également été développées, notamment la Virtual Family [3]. Ces fantômes ont une résolution de 0,5 mm et possèdent jusqu'à 84 tissus. Ils ont été développés à partir des images IRM de volontaires (figure 1.13). Le tableau 1.7 présente les principaux modèles numériques réalistes du corps humain.

Des fantômes hybrides ont également été développés (principe de développement illustré en figure 1.14). Ces fantômes ont l'avantage d'être aussi précis que les fantômes de voxels tout en étant faciles à déformer comme les fantômes stylisés. La surface des organes est représentée par des équations mathématiques ou des maillages triangulaires.

Les fantômes utilisés dans ce mémoire sont Duke et Ella de la Virtual Family [3], ainsi qu'Hugo qui est basé sur le Visible Human [51].

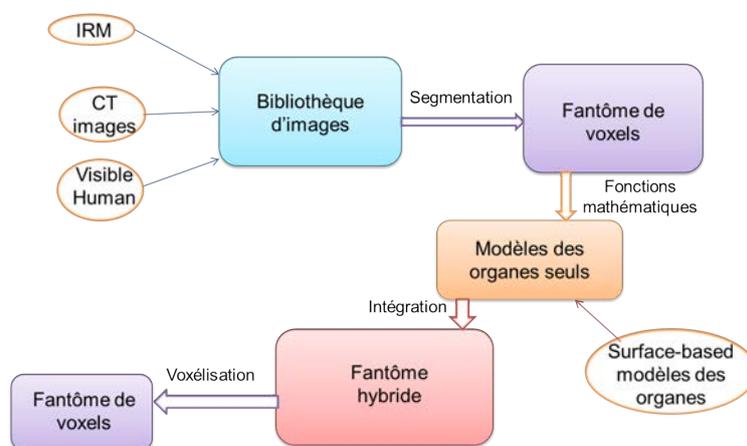


FIGURE 1.14 – Principe de développement d'un fantôme hybride

| Fantôme                | Sexe | Hauteur | Poids    | Age                         | Type      | Année |
|------------------------|------|---------|----------|-----------------------------|-----------|-------|
| Voxel Man [53]         | M    | -       | -        | Adulte                      | Caucasien | 1994  |
| Visible Human [51]     | M    | 1,87 m  | 113 kg   | Adulte                      | Caucasien | 1994  |
| Norman [54]            | M    | 1,76 m  | 73 kg    | Adulte                      | Caucasien | 1997  |
| Baby [55] [56]         | F    | 0,57 m  | 4,2 kg   | Bébé, 8 sem.                | Caucasien | 2002  |
| Child [55] [56]        | F    | 1,15 m  | 21,7 kg  | Enfant, 7 ans               | Caucasien |       |
| Donna [55] [56]        | F    | 1,76 m  | 79 kg    | Adulte                      | Caucasien |       |
| Helga/Emma [55] [56]   | F    | 1,7 m   | 81 kg    | Adulte                      | Caucasien |       |
| Golem/Gustav [55] [56] | M    | 1,76 m  | 69 kg    | Adulte                      | Caucasien |       |
| Laura/Irene [55] [56]  | F    | 1,63 m  | 51 kg    | Adulte                      | Caucasien |       |
| Taro [52]              | M    | 1,73 m  | 65 kg    | Adulte                      | Asiatique | 2004  |
| Hanako [52]            | F    | 1,61 m  | 53 kg    | Adulte                      | Asiatique |       |
| Naomi [57]             | F    | 1,58 m  | 64 kg    | Adulte                      | Caucasien | 2005  |
| Korean male [58]       | M    | 1,76 m  | 76 kg    | Adulte                      | Asiatique | 2006  |
| HD Korean model [59]   | M    | 1,7 m   | 72 kg    | Adulte                      | Asiatique | 2008  |
| Katja [60]             | F    | 1,63 m  | 62 kg    | Adulte, enceinte de 24 sem. | Caucasien | 2008  |
| Louis [61]             | M    | 1,69 m  | 50,4 kg  | Enfant, 14 ans              | Caucasien | 2009  |
| Eartha [61]            | F    | 1,36 m  | 30,7 kg  | Enfant, 8 ans               | Caucasien |       |
| Dizzy [61]             | M    | 1,39 m  | 26 kg    | Enfant, 8 ans               | Caucasien |       |
| Roberta [61]           | F    | 1,09 m  | 17,8 kg  | Enfant, 5 ans               | Caucasien |       |
| Duke [3]               | M    | 1,74 m  | 70 kg    | Adulte                      | Caucasien | 2010  |
| Ella [3]               | F    | 1,6 m   | 58 kg    | Adulte                      | Caucasien |       |
| Billie [3]             | F    | 1,46 m  | 36 kg    | Enfant, 11 ans              | Caucasien |       |
| Thelonius [3]          | M    | 1,17 m  | 20 kg    | Enfant, 6 ans               | Caucasien |       |
| Glenn                  | M    | 1,73m   | 65 kg    | Adulte, 84 ans              | Caucasien |       |
| Fats                   | M    | 1,82 m  | 119,6 kg | Adulte, obèse               | Caucasien |       |
| Chinese female [62]    | F    | 1,62 m  | 53,5 kg  | Adulte                      | Asiatique | 2011  |
| Chinese male [62]      | M    | 1,72 m  | 63,05 kg | Adulte                      | Asiatique |       |

TABLE 1.7 – Principaux modèles numériques du corps humain

### 1.4.2.2 Outils de simulation

Les fantômes développés précédemment peuvent être utilisés en simulation dans plusieurs logiciels. Différents logiciels sont disponibles permettant d’avoir différents maillages et méthodes de calculs. Les principaux logiciels sont développés dans le tableau 1.8. Les méthodes numériques utilisées dans ces logiciels sont les suivantes :

- **FDTD (Différences finies)** : Sim4Life, SemCad, XFDTD → *résolution temporelle* ;
- **FEM (Eléments finis)** : HFSS, CST → *résolution fréquentielle* ;
- **FIT (Intégration finie)** : CST → *résolution temporelle ou fréquentielle* ;
- **MoM (Méthode des moments)** : Feko → *résolution fréquentielle*.

|                                 | Maillage cartésien | Maillage tétraédrique | Maillage surfacique | Maillage non-uniforme | Large bande |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------|
| <b>SemCad (devenu Sim4Life)</b> | oui                |                       |                     | oui                   | oui         |
| <b>XFDTD</b>                    | oui                |                       |                     | oui                   | oui         |
| <b>CST</b>                      | oui                | oui                   |                     | oui                   | oui         |
| <b>HFSS</b>                     |                    | oui                   |                     | oui                   | oui         |
| <b>Feko</b>                     |                    | oui                   | oui                 | oui                   |             |

TABLE 1.8 – Caractéristiques des principaux logiciels utilisés en dosimétrie numérique

## 1.5 Positionnement et objectifs de la thèse

Tout comme les systèmes GSM, les systèmes HF et VHF doivent respecter des normes et recommandations pour limiter le risque de surexposition électromagnétique des opérateurs. Grâce au chapitre 1, nous avons vu que ces normes reposent essentiellement sur des études faites sur des animaux, extrapolées ensuite à l’homme et que les moyens de mesure ou de modélisation dosimétriques sont peu adaptés aux fréquences HF et VHF, car conçus pour des fréquences supérieures à 300 MHz, bien que la fréquence de résonance du corps apparaisse autour de 70 MHz et que l’absorption d’énergie par le corps ne se limite pas à la première couche de tissu (peau) du corps.

C’est pourquoi, nous étudions dans le chapitre 2, trois fantômes de l’humain hétérogènes et homogènes. Grâce à la comparaison des DAS corps entier et 10 g de ces fantômes, nous sélectionnons un fantôme pour la suite de la thèse nous permettant d’étudier plus précisément le caractère thermique d’une exposition et le couplage électromagnétique avec le corps. Ce chapitre permet également d’étudier l’influence d’une couche de tissu ou d’une couche d’eau sur le fantôme sélectionné.

Dans le chapitre 3, nous étudions les réactions thermiques du corps lors d’une exposition en bande HF et VHF sur le fantôme hétérogène Duke (fantôme choisi à l’issue du chapitre 2). En plus de l’influence de la durée d’exposition ou de la température ambiante sur la température en un point donné du corps, nous caractérisons la température du corps entier et étudions la faisabilité d’utilisation d’un fantôme homogène au niveau thermique.

Dans le chapitre 4, nous nous intéressons aux relations existant entre les grandeurs physiques extérieures et intérieures au corps : champs électriques et magnétiques, courant induit, densité de courant et DAS. Cela nous permet alors de proposer une modélisation du corps par des circuits électriques ou des antennes permettant d’évaluer rapidement les courants induits ou le DAS dans le corps.

Enfin dans le chapitre 5, nous présentons une nouvelle méthode d’évaluation des DAS à partir de courants induits calculés en simulation ainsi qu’un nouvel ensemble de tissus formant un fantôme hétérogène simple, car composé uniquement de trois tissus différents.



## Chapitre 2

# Caractérisation électromagnétique d'une exposition en bandes HF et VHF

### Sommaire

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>34</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Comparaison de trois fantômes sur les valeurs de DAS</b> | <b>34</b> |
| 2.2.1      | En onde plane, polarisation verticale : Configuration 1     | 36        |
| 2.2.2      | En onde plane, autres polarisations et angles d'incidence   | 36        |
| 2.2.3      | En champ proche avec un portatif                            | 41        |
| <b>2.3</b> | <b>Influence des tissus en surface des fantômes</b>         | <b>43</b> |
| 2.3.1      | Influence de la graisse et de la peau                       | 43        |
| 2.3.2      | Influence d'une couche d'eau                                | 45        |
| 2.3.3      | Influence d'une couche de tissu/vêtement                    | 48        |
| <b>2.4</b> | <b>Conclusion</b>   | <b>49</b> |

---

## 2.1 Introduction

Comme nous avons pu le constater dans le chapitre 1, il existe de nombreux fantômes de l'humain. Nous comparons dans ce chapitre le comportement de plusieurs fantômes hétérogènes et homogènes vis-à-vis d'une exposition électromagnétique. L'analyse des résultats nous permet de comparer les niveaux d'exposition électromagnétique induits dans le corps, selon la morphologie des fantômes, la composition des tissus ou encore selon le type d'exposition pour des fréquences HF<sup>21</sup> et VHF<sup>22</sup>.

Tous les résultats présentés dans ce chapitre ont été calculés par simulation avec le logiciel CST Microwave. La méthode FIT (Finite Integration Technique [63]) est utilisée avec un solveur temporel. Les valeurs de DAS 10 g sont calculées selon la méthode donnée par l'IEEE dans la norme 62704 [64], qui correspond à la même méthode que la norme C95.3 [19] mais utilise un critère supplémentaire limitant le volume d'air à 10% dans le cube de 10 g.

## 2.2 Comparaison de trois fantômes sur les valeurs de DAS

Nous comparons dans cette première partie les valeurs de DAS corps entier ( $DAS_{CE}$ ) et de DAS 10 g maximales de trois fantômes de l'humain hétérogènes et homogènes. Les fantômes considérés sont les suivants :

- Hugo hétérogène du Visible Human Project [51];
- Ella hétérogène de la Virtual Family [3];
- Duke hétérogène de la Virtual Family [3].

Les fantômes Duke et Ella ont des voxels de résolution 5 mm<sup>3</sup> et le fantôme Hugo de 4 mm<sup>3</sup>. Le maillage choisi pour ces fantômes est de même dimension que les voxels, car la longueur d'onde est 100 fois supérieure aux dimensions des voxels :

- A 1 MHz,  $\lambda = 300 \text{ m} \gg 5 \text{ mm}$ ;
- A 100 MHz,  $\lambda = 3 \text{ m} \gg 5 \text{ mm}$ .

Les fantômes sont homogénéisés par un même tissu dont les propriétés diélectriques sont données en figure 2.1. Le tissu homogène est issu d'une collaboration entre Thales Communications & Security [65]. Ses propriétés sont la moyenne pondérée des propriétés des neuf tissus les plus présents en volume dans le fantôme Hugo [51] (cf. annexe B). Les propriétés des tissus présents dans les fantômes hétérogènes sont données par Gabriel *et al* [66].

Les fantômes sont exposés dans un premier temps à une onde plane entre 1 MHz et 90 MHz, en espace libre dont la polarisation et l'angle d'incidence varient (figure 2.2). Le champ électrique appliqué est de 19,4 V/m, soit une densité de puissance de 1 W/m<sup>2</sup>.

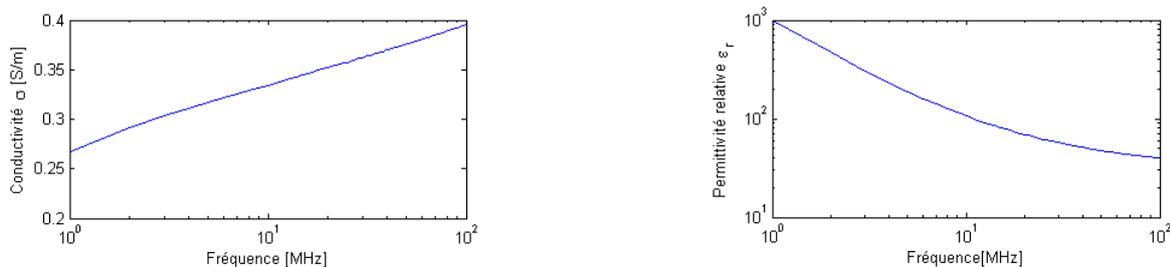


FIGURE 2.1 – Propriétés diélectriques du tissu équivalent servant à homogénéiser les fantômes entre 1 et 100 MHz

---

21. 3 à 30 MHz, cependant certains produits Thales sont utilisés à 1,5 MHz, c'est pourquoi dans ce chapitre et les suivants, nous étudions également les résultats entre 1 et 3 MHz.

22. 30 à 300 MHz

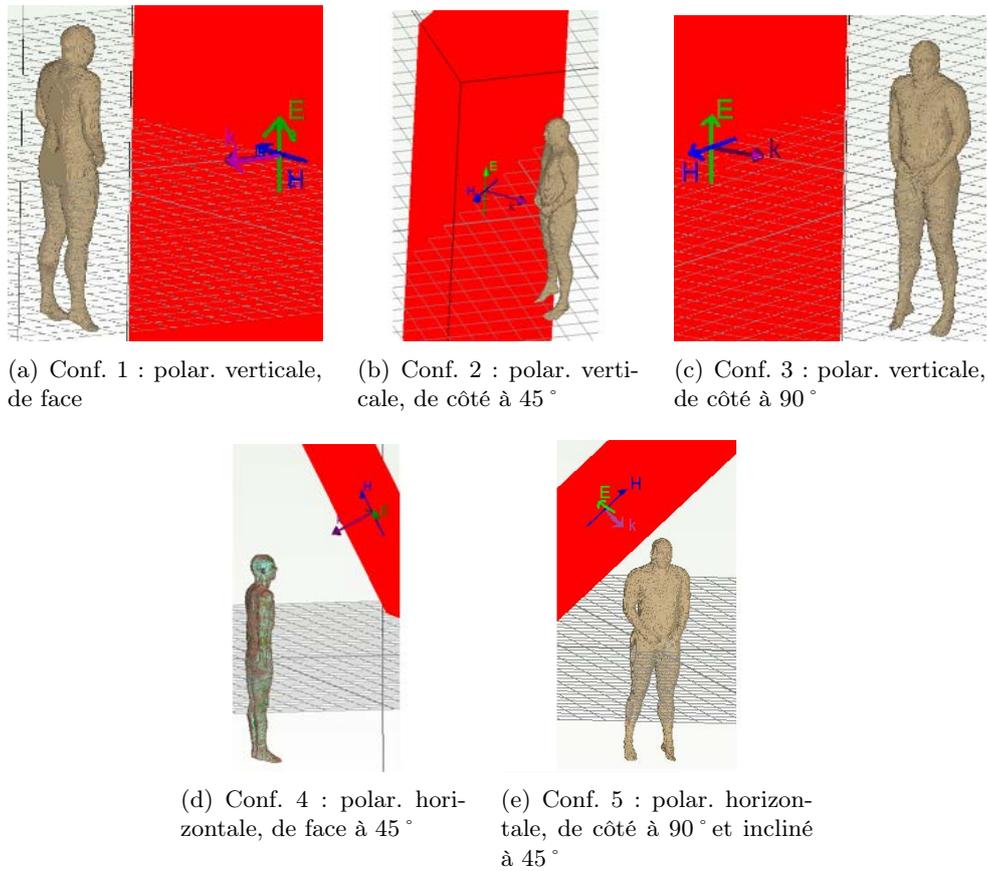


FIGURE 2.2 – Configurations étudiées pour la comparaison électromagnétique de différents fantômes en onde plane

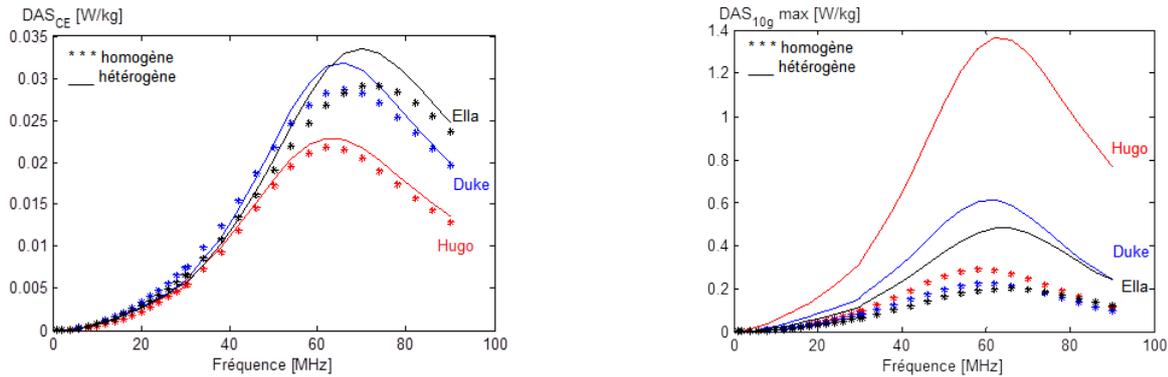


FIGURE 2.3 – DAS corps entier et DAS 10 g max en configuration 1

### 2.2.1 En onde plane, polarisation verticale : Configuration 1

Dans cette première configuration, les fantômes sont exposés de face à l'onde plane polarisée verticalement.

Nous constatons que dans ce premier cas, les écarts entre un fantôme hétérogène et son analogue homogène sont compris entre -1 et 2,5 dB pour le  $DAS_{CE}$  (figure 2.3). Pour le DAS 10 g max, ils sont inférieurs à 5 dB pour les fantômes Ella et Duke alors qu'ils atteignent 9 dB pour le fantôme Hugo. De plus, les valeurs de DAS 10 g max sont deux fois plus élevées dans le fantôme Hugo que dans les fantômes Duke et Ella. Par ailleurs, quelle que soit la composition des tissus (homogène ou hétérogène), les zones qui absorbent le plus le champ sont les chevilles et le cou (figures 2.5 et 2.6).

Nous pouvons également constater que la fréquence de résonance des différents fantômes n'est pas la même, ce qui s'explique par la taille des fantômes. En effet, la fréquence de résonance du corps est d'autant plus élevée que la personne est petite.

Cependant, la différence sur les valeurs de DAS 10 g entre Hugo et Ella/Duke ne s'explique pas par la morphologie, mais plutôt par la composition des fantômes. Le fantôme Hugo ne présente en effet qu'une trentaine de tissus et sa surface est composée à plus de 90% de graisse, alors que Ella et Duke possèdent plus de 70 tissus avec une surface formée de graisse et de peau. L'influence de ces tissus en surface sera étudiée par la suite (cf section 2.3.1).

Pour des fréquences VHF (30 à 90 MHz), le rapport entre le DAS 10 g max et le  $DAS_{CE}$  (figure 2.4) pour les fantômes hétérogènes est :

- compris entre 30 et 11 pour Duke ;
- compris entre 25 et 10 pour Ella ;
- d'environ 60 pour Hugo.

En fréquences HF, ce rapport est :

- compris entre 55 et 30 pour Duke ;
- compris entre 30 et 20 pour Ella ;
- compris entre 85 et 60 pour Hugo.

A 50 MHz, nous retrouvons les mêmes rapports que ceux de l'étude d'Asayama *et al* [13] pour les fantômes Duke et Ella. Les valeurs de DAS 10 g dans le fantôme Hugo étant particulièrement élevées, il est normal que ce rapport soit aussi important.

### 2.2.2 En onde plane, autres polarisations et angles d'incidence

Dans cette partie, nous étudions les six fantômes en onde plane en espace libre pour des polarisations verticale et horizontale et des angles d'incidence variables.

En configuration 2 (onde plane, polarisation verticale de côté à  $45^\circ$ , figure 2.2), nous constatons que le  $DAS_{CE}$  est toujours plus élevé avec le fantôme Ella et le plus faible avec le fantôme Hugo (figure 2.7). De même que le DAS 10 g max est toujours aussi élevé pour le fantôme Hugo hétérogène en

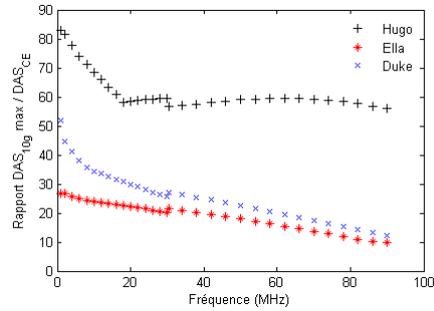


FIGURE 2.4 – Rapport entre le DAS 10 g max et le DAS corps entier en configuration 1

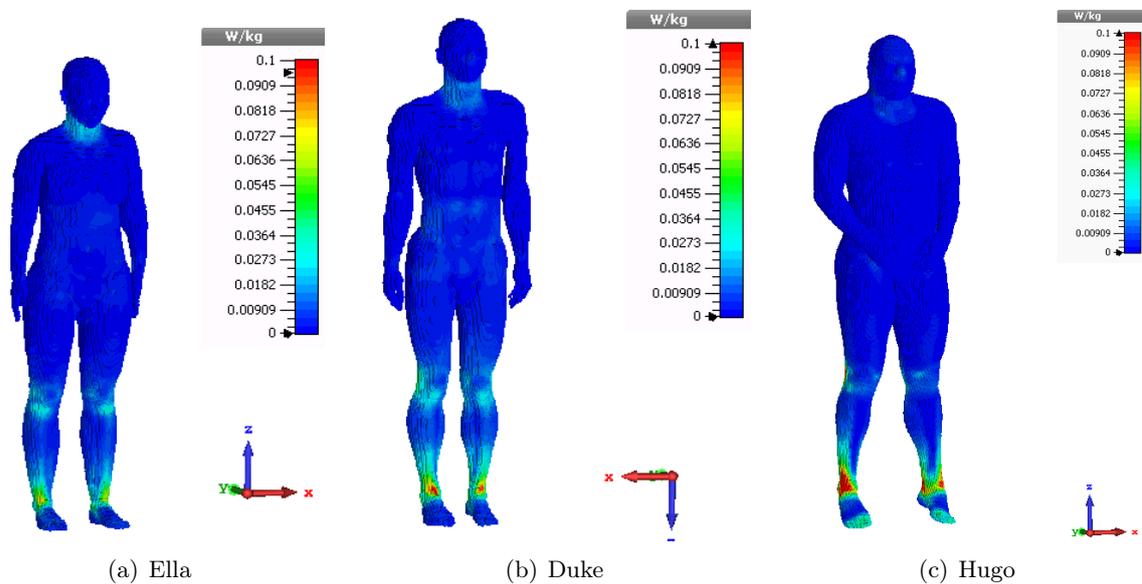


FIGURE 2.5 – Répartition du DAS 10 g sur les fantômes Ella, Duke et Hugo hétérogènes à 30 MHz en onde plane - configuration 1

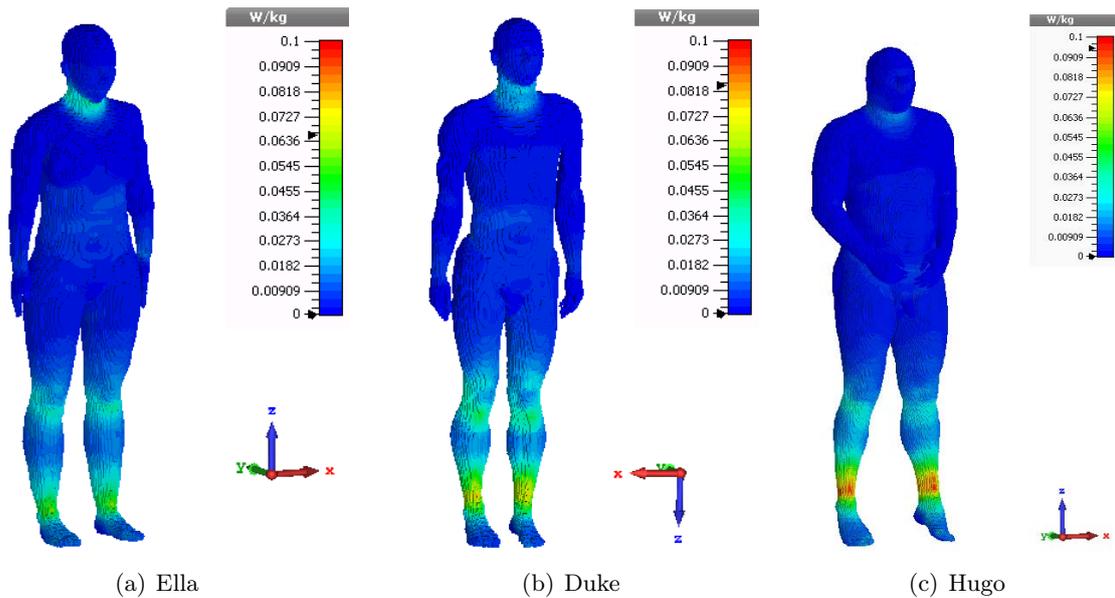


FIGURE 2.6 – Répartition du DAS 10 g sur les fantômes Ella, Duke et Hugo homogènes à 30 MHz en onde plane - configuration 1

comparaison des autres fantômes. Les principales zones d'absorption du champ sont toujours le cou et les chevilles, car la polarisation est toujours verticale (cf section 1.2.2.2). Les écarts entre un fantôme hétérogène et son homogène sont compris entre 3 et 4,5 dB pour Ella et Duke et entre 5,5 et 7 dB pour Hugo pour le DAS 10 g max, alors que pour le DAS<sub>CE</sub>, ils sont de  $\pm 1$  dB pour les trois fantômes. Nous notons que la fréquence de résonance est toujours de 60 MHz pour Hugo, de 65 MHz pour Duke et de 70 MHz pour Ella.

Pour des fréquences VHF (30 à 90 MHz), le rapport entre le DAS 10 g max et le DAS<sub>CE</sub> (figure 2.8) pour les fantômes hétérogènes est :

- compris entre 28 et 11 pour Duke ;
- compris entre 20 et 10 pour Ella ;
- d'environ 60 pour Hugo.

Comme précédemment, nous retrouvons des rapports similaires à ceux de l'étude d'Asayama *et al* [13] pour les fantômes Duke et Ella.

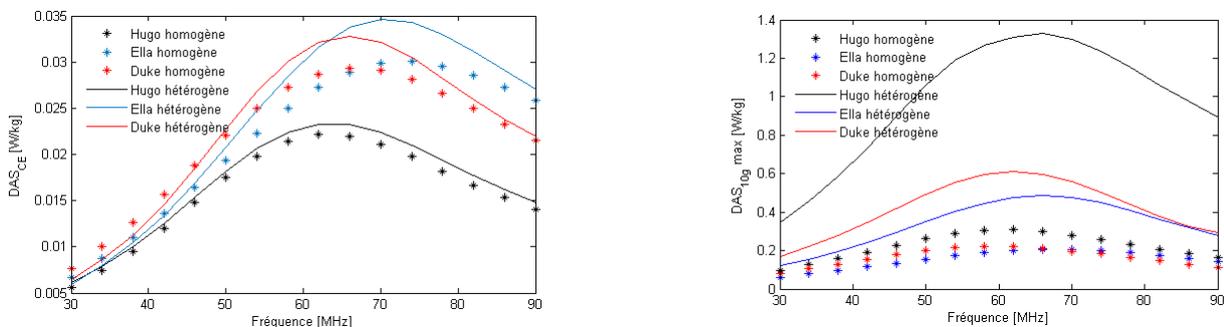


FIGURE 2.7 – DAS corps entier et 10 g max en configuration 2

En configuration 3 (onde plane, polarisation verticale de côté à  $90^\circ$ , figure 2.2), nous constatons que de par sa morphologie, le fantôme Hugo présente toujours un DAS<sub>CE</sub> inférieur à celui des fantômes Ella et Duke. De même que le DAS<sub>CE</sub> du fantôme Ella est toujours supérieur aux autres (figure 2.9). De plus, le fantôme Hugo hétérogène présente toujours le DAS 10 g max le plus élevé parmi les six

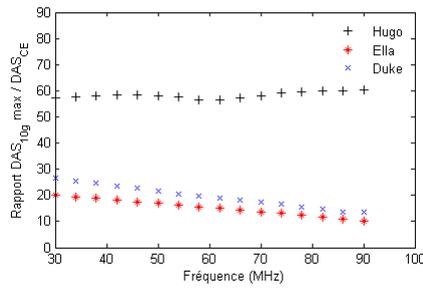


FIGURE 2.8 – Rapport entre le DAS 10 g max et le DAS corps entier en configuration 2

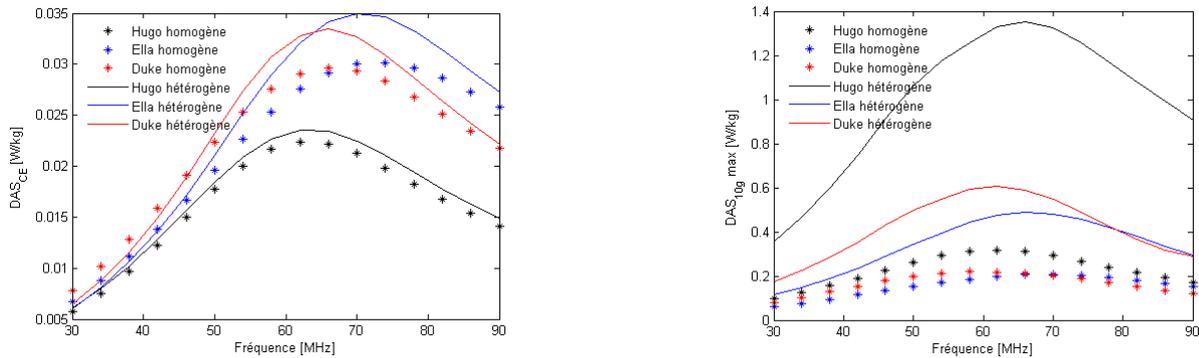


FIGURE 2.9 – DAS corps entier et 10 g max en configuration 3

fantômes et les zones à forte absorption sont identiques aux configurations 1 et 2. Les écarts entre un fantôme hétérogène et son homogène sont compris entre 3 et 4,5 dB pour Ella et Duke et entre 5,5 et 7 dB pour Hugo pour le DAS 10 g max, alors que pour le DAS<sub>CE</sub>, ils sont de ±1 dB pour les trois fantômes.

Pour des fréquences VHF (30 à 90 MHz), le rapport entre le DAS 10 g max et le DAS<sub>CE</sub> (figure 2.10) pour les fantômes hétérogènes est :

- compris entre 28 et 11 pour Duke ;
- compris entre 20 et 10 pour Ella ;
- d'environ 60 pour Hugo.

Comme précédemment, les rapports sont similaires à ceux de l'étude d'Asayama *et al* [13] pour les fantômes Duke et Ella, le fantôme Hugo étant toujours un cas particulier par ses valeurs élevées de DAS 10 g.

En configuration 4 (onde plane, polarisation horizontale de face et une incidence de 45°, figure

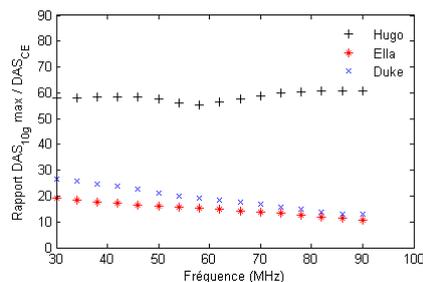


FIGURE 2.10 – Rapport entre le DAS 10 g max et le DAS corps entier en configuration 3

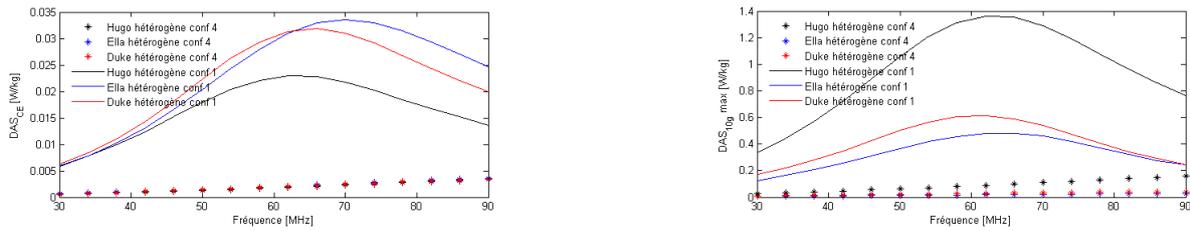


FIGURE 2.11 – Comparaison des DAS corps entier et 10 g max en configuration 4 et en configuration 1 pour les fantômes hétérogènes

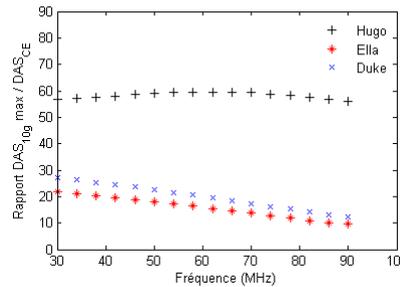


FIGURE 2.12 – Rapport entre le DAS 10 g max et le DAS corps entier en configuration 4

2.2), nous constatons que les valeurs de  $DAS_{CE}$  et DAS 10 g sont beaucoup plus faibles que celles en polarisation verticale (écart  $\geq 10$  dB), ce qui est cohérent avec le chapitre 1 (cf section 1.2.2.2). Les valeurs de DAS 10 g max restent élevées pour Hugo hétérogène par rapport aux autres fantômes hétérogènes. Dans cette configuration, les zones absorbant le plus le champ électromagnétique sont les bras et plus légèrement les genoux et les chevilles. Cependant ces zones sont moins prononcées qu'en polarisation verticale. Le rapport entre le DAS 10 g max et le  $DAS_{CE}$  (figure 2.12) pour les fantômes hétérogènes est :

- compris entre 28 et 11 pour Duke ;
- compris entre 22 et 10 pour Ella ;
- compris entre 55 et 60 pour Hugo.

Malgré le changement de polarisation, nous retrouvons des rapports similaires à ceux de l'étude d'Asayama *et al* [13] pour les fantômes Duke et Ella.

En configuration 5 (onde plane, polarisation horizontale de côté à  $90^\circ$  et une incidence de  $45^\circ$ , figure 2.2), les valeurs de  $DAS_{CE}$  et DAS 10 g sont toujours plus faibles qu'en polarisation verticale. De plus, les DAS 10 g dans Hugo sont toujours supérieurs à ceux des autres fantômes en hétérogène. La principale zone d'absorption est le torse, ce qui s'explique par l'orientation sur le côté de la polarisation horizontale. Par ailleurs, les écarts d'homogénéisation sont de  $\pm 1$  dB pour les trois fantômes sur le  $DAS_{CE}$ , alors qu'ils sont de  $\pm 2$  dB sur le DAS 10 g max.

En polarisation horizontale, les écarts d'homogénéisation sont moins importants qu'en polarisation verticale, bien que le fantôme Hugo hétérogène présente toujours des valeurs de DAS 10 g max deux fois plus élevées que les deux autres fantômes hétérogènes Ella et Duke. Cela s'explique par le fait que le corps absorbe moins d'énergie en polarisation horizontale et que les zones de forte absorption ne sont pas situées aux mêmes endroits pour les deux polarisations (cf. section 1.2.2.2).

De plus, le rapport entre le DAS 10 g max et le  $DAS_{CE}$  (figure 2.14) pour les fantômes hétérogènes est :

- compris entre 27 et 11 pour Duke ;
- compris entre 20 et 8 pour Ella ;
- compris entre 52 et 20 pour Hugo.

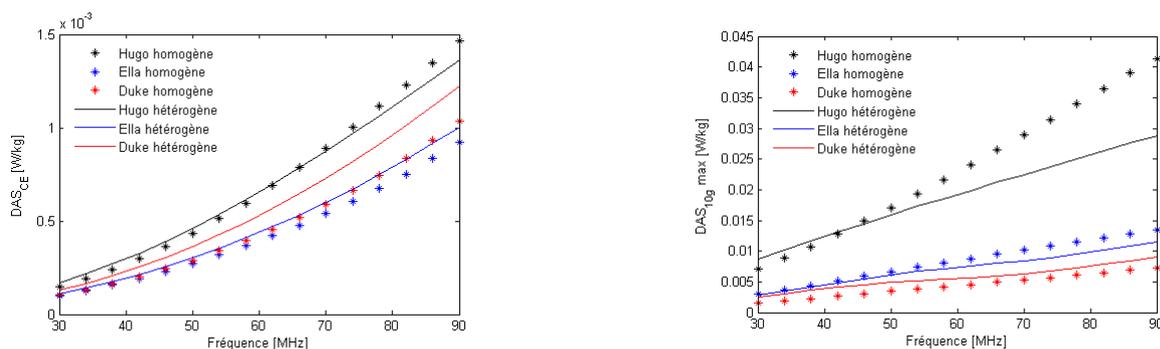


FIGURE 2.13 – DAS corps entier et 10 g max en configuration 5

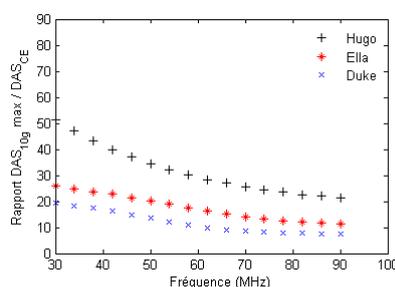
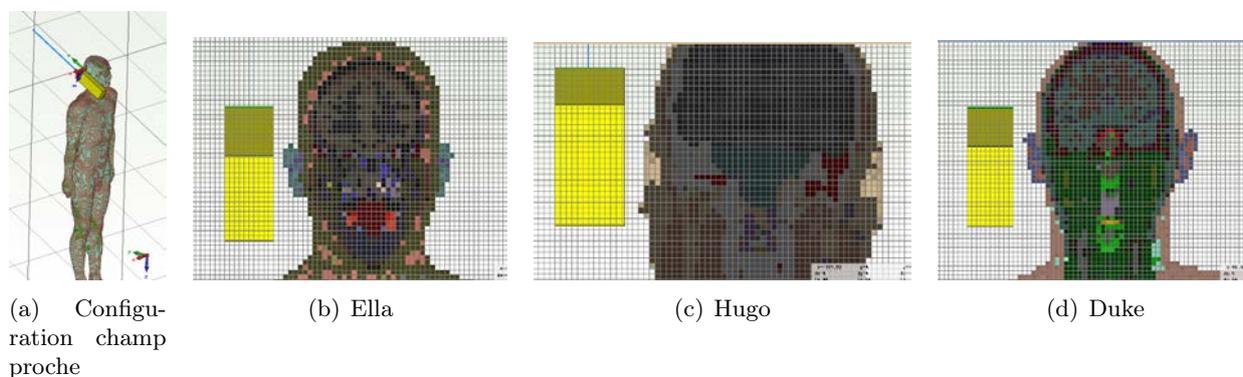


FIGURE 2.14 – Rapport entre le DAS 10 g max et le DAS corps entier en configuration 5

Quels que soient la polarisation (verticale ou horizontale) ou l'angle d'incidence, nous retrouvons des rapports similaires à ceux de l'étude d'Asayama *et al* [13] pour les fantômes Duke et Ella, tandis que le rapport pour Hugo reste très élevé à cause de des valeurs de DAS 10 g.

### 2.2.3 En champ proche avec un portable

Le champ proche est créé par le champ rayonné d'une antenne placée sur un poste radio portable (figure 2.15). L'appareil portable est placé à 1 cm de la tête du fantôme. Ses dimensions sont 50 mm x 248 mm x 76 mm et il est composé de cuivre. L'antenne mesure 1 m entre 1 et 30 MHz et 50 cm entre 30 et 90 MHz avec une puissance rayonnée imposée de 1 W.

FIGURE 2.15 – Configurations en champ proche pour les trois fantômes : résolution de voxels et maillage de  $(5 \text{ mm})^3$  pour Duke et Ella et  $(4 \text{ mm})^3$  pour Hugo

Nous constatons que c'est maintenant le fantôme Ella qui présente les valeurs de DAS 10 g maximales : Ella hétérogène en HF (figure 2.16) et Ella homogène en VHF (figure 2.17). Le fantôme Hugo

homogène présente, quant à lui, les valeurs de DAS 10 g les plus faibles contrairement à l'onde plane. De plus, les valeurs de DAS 10 g max pour Hugo hétérogène sont maintenant du même ordre que celles de Duke et Ella. En effet, les écarts sont inférieurs à 1,5 dB entre Ella et Hugo hétérogènes et inférieurs à 2,1 dB entre Ella et Duke hétérogènes. Les écarts d'homogénéisation sur le DAS 10 g max sont inférieurs à 1,5 dB pour Ella et Duke et de 6 dB pour Hugo. Concernant le DAS corps entier, ces écarts sont de  $\pm 0,3$  dB pour Duke et Ella et de  $\pm 0,6$  dB pour Hugo. Nous remarquons qu'en champ proche, la résonance du corps n'apparaît pas puisque c'est la tête (fréquence de résonance  $\sim 200$  MHz) qui est exposée et non le corps entier contrairement à l'exposition en onde plane.

Comme en onde plane, les rapports entre le DAS 10 g max et le  $DAS_{CE}$  sont calculés pour les fantômes hétérogènes (figure 2.18). Ce rapport varie :

- en HF :
  - entre 380 et 240 pour Hugo ;
  - entre 300 et 150 pour Duke ;
  - entre 300 et 150 pour Ella ;
- en VHF :
  - entre 340 et 140 pour Hugo ;
  - entre 230 et 80 pour Duke ;
  - entre 250 et 90 pour Ella.

Les rapports DAS 10 g max sur  $DAS_{CE}$  sont plus élevées qu'en onde plane, mais cela s'explique par les valeurs de  $DAS_{CE}$  inférieures à celles en onde plane, car seulement une partie du corps (la tête) est exposée. L'absorption d'énergie ne se fait donc pas sur tout le corps mais seulement au niveau de la tête, tandis que le DAS 10 g max conserve le même ordre de grandeur qu'en onde plane.

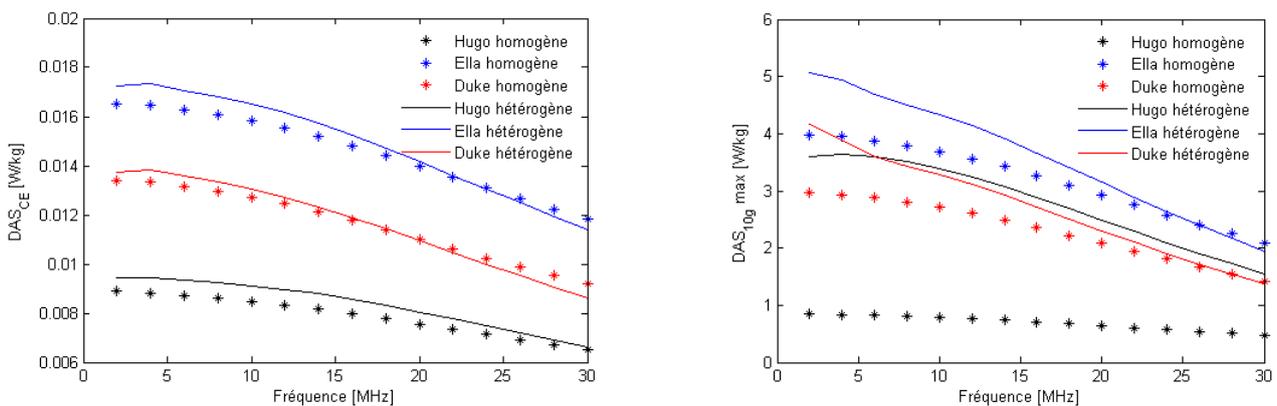


FIGURE 2.16 – DAS corps entier et 10 g max en exposition champ proche - HF antenne de 1 m

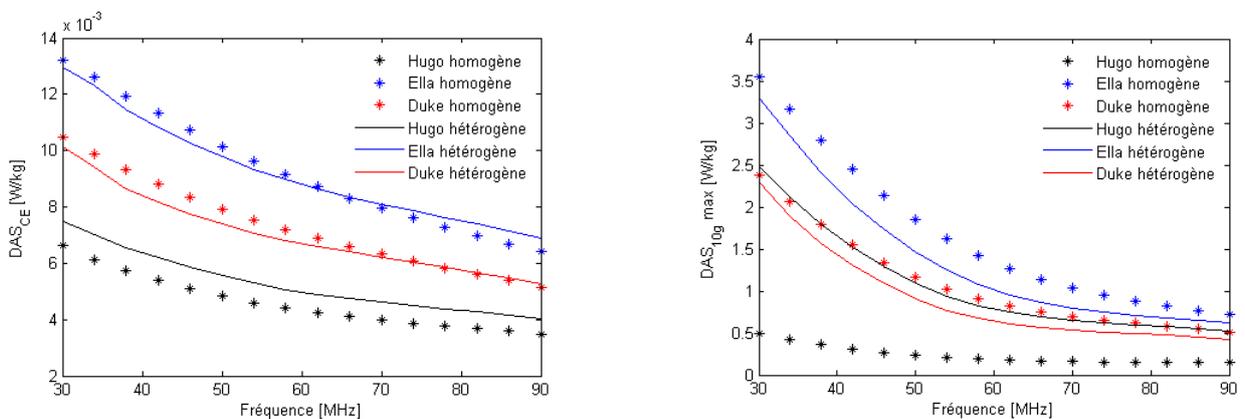


FIGURE 2.17 – DAS corps entier et 10 g max en exposition champ proche - VHF antenne de 50 cm

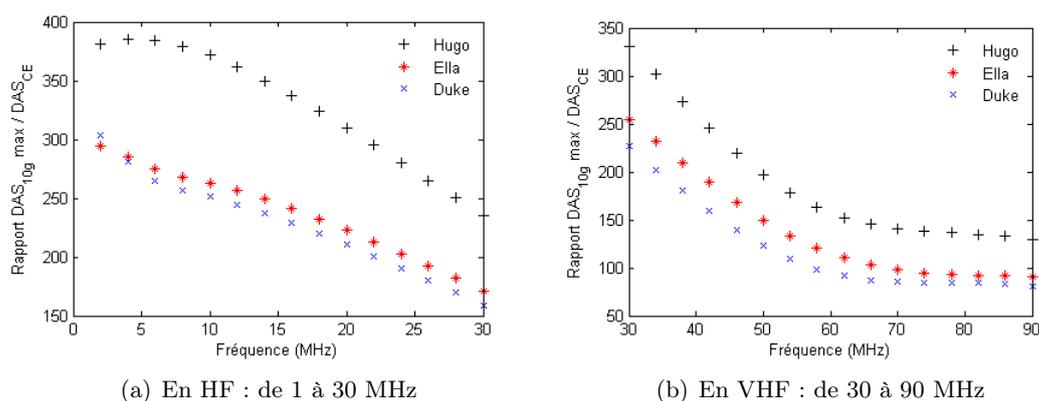


FIGURE 2.18 – Rapport entre le DAS 10 g max et le DAS corps entier pour la configuration champ proche

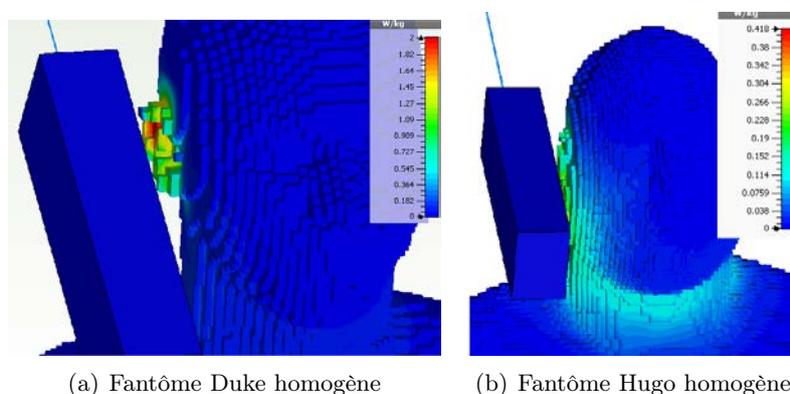


FIGURE 2.19 – Distribution surfacique du DAS 10 g, exemple à 34 MHz

Tout comme en onde plane, le fantôme Hugo se démarque des fantômes Duke et Ella. Les écarts d'homogénéisation sur le DAS 10 g restent élevés (supérieurs à 6 dB) et les valeurs de DAS 10 g sont éloignées de celles d'Ella et Duke. Cependant, dans cette exposition, les différences sur le DAS 10 g entre les fantômes ne s'expliquent pas que par la composition de la surface des fantômes. Nous constatons, en effet, sur la figure 2.19 que le DAS reste localisé sur l'oreille pour Duke alors que pour Hugo, cela s'étend sur tout le cou. Nous pouvons expliquer cette répartition par la morphologie des deux fantômes : le fantôme Hugo a ses oreilles, sa tête et son cou quasiment confondus en une seule partie du corps alors que pour le fantôme Duke, ces parties sont plus distinctes. C'est cette morphologie particulière de la tête qui explique les faibles valeurs de DAS 10 g pour le fantôme Hugo. Le fait que le DAS 10 g chez l'hétérogène rejoigne ceux de Duke et Ella est dû aux tissus en surface (cf partie suivante 2.3.1).

## 2.3 Influence des tissus en surface des fantômes

### 2.3.1 Influence de la graisse et de la peau

Nous avons vu dans la partie précédente que les trois fantômes ne sont pas constitués du même nombre de tissus, ni des mêmes tissus en surface : le fantôme Hugo n'a que de la graisse en surface contrairement aux fantômes Ella et Duke qui ont à la fois de la peau et de la graisse. Cela est dû au fait que ces fantômes ont une résolution de voxels de 4 mm ou 5 mm et que sur un être humain,

l'épaisseur de la peau n'excède pas 2 mm. Il n'est donc pas possible de modéliser distinctement sur 5 mm les véritables épaisseurs de peau et de graisse sous-cutanée, d'où le choix de mettre en surface pour le fantôme Hugo le tissu majoritaire ou pour les fantômes Duke et Ella de faire apparaître une alternance de voxels de peau et de voxels de graisse.

Une étude [67] a montré l'influence de certains tissus sur les valeurs de DAS 10 g, notamment entre des tissus à forte teneur en eau, comme la peau, et ceux à faible teneur en eau, comme la graisse. Les tissus à forte teneur en eau ont une conductivité plus forte que les tissus pauvres en eau :  $\sigma_{graisse} \sim 0,03 S/m$  et  $\sigma_{peau} \sim 0,4 S/m$  en HF/VHF, ce qui limite l'absorption du champ dans ces tissus à plus forte conductivité.

Nous étudions dans cette partie l'influence des tissus en surface des fantômes Duke et Hugo sur les DAS 10 g max. Le fantôme Ella est mis de côté, car il présente les mêmes caractéristiques (mêmes tissus de surface) que le fantôme Duke. Les tissus constituant la surface ont été modifiés pour avoir trois surfaces différentes :

- surface composée uniquement de graisse ;
- surface composée uniquement de peau ;
- surface composée d'un mélange de graisse et de peau.

Ne pouvant pas modifier la géométrie (donc les voxels) des fantômes, le mélange de peau et de graisse dans le fantôme Duke est une alternance entre un voxel composé de graisse et un voxel composé de peau (fantôme d'origine), alors que pour le fantôme Hugo, les voxels en surface ont les propriétés ( $\sigma, \epsilon_r, \rho$ ) d'un mélange composé à 50% de graisse et 50% de peau.

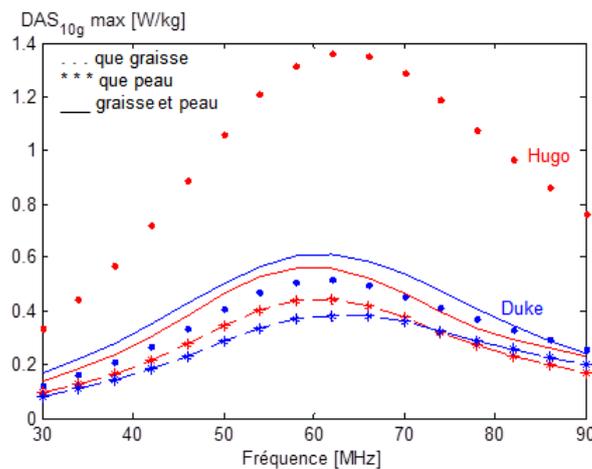


FIGURE 2.20 – DAS 10 g max dans les fantômes Duke et Hugo dont la première couche de tissus est composée soit de peau, soit de graisse, soit d'un mélange de peau et de graisse - Exposition en onde plane à 19,8 V/m entre 1 et 90 MHz

La présence de peau en surface d'Hugo (à la place de la graisse) fait diminuer les valeurs de DAS 10 g max, entraînant des DAS 10 g max proches de ceux de Duke n'ayant que de la peau en surface (figure 2.20). Nous constatons d'ailleurs en figure 2.21, qu'en présence de graisse, l'absorption est plus forte et plus profonde dans le fantôme Hugo qu'en présence de peau sur la surface. Les écarts entre le fantôme Hugo n'ayant que de la peau en surface et le fantôme Duke ayant de la peau et de la graisse sont inférieurs à 1,4 dB contre 4 dB précédemment (figure 2.20). Cela nous indique que les écarts de DAS 10 g entre Duke et Hugo sont bien dus à la surface entièrement grasseuse d'Hugo. De plus les écarts sur les DAS 10 g dus à l'homogénéisation d'Hugo sont maintenant du même ordre que les fantômes Ella et Duke (5 dB). De même que les valeurs de DAS 10 g sont plus élevées chez Duke pour une surface composée uniquement de graisse que pour une surface possédant que de la peau. Cependant il est difficile de quantifier cette différence car les écarts sont variables entre Hugo et Duke.

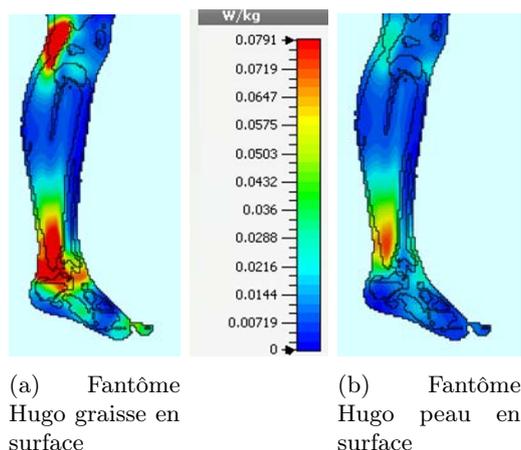


FIGURE 2.21 – Distribution surfacique du DAS 10 g à 28 MHz dans le fantôme Hugo hétérogène avec une surface composée soit de graisse, soit de peau

En prenant comme référence le cas d'une surface composée à la fois de peau et de graisse, que nous considérons comme les cas les plus réalistes pour des résolutions de voxels de 5 mm (Duke hétérogène avec une alternance peau/graisse en surface et Hugo hétérogène avec un mélange peau/graisse en surface), nous constatons en onde plane que l'omniprésence de graisse en surface de Duke entraîne une légère diminution de DAS 10 g ( $< 1,5$  dB), tandis que l'omniprésence de graisse en surface chez Hugo entraîne une augmentation importante de DAS 10 g (4 à 5 dB). L'omniprésence de peau en surface de Duke entraîne une diminution de DAS 10 g (1 à 3 dB) alors que pour Hugo, la diminution est inférieure à 1,5 dB. De plus, l'homogénéisation des fantômes entraîne une baisse des valeurs de DAS 10 g max inférieure à 4 dB pour Duke alors qu'elle est inférieure à 3 dB pour Hugo, si on considère les hétérogènes avec de la peau et de la graisse en surface.

Nous en concluons qu'une surface de fantôme composée uniquement de graisse peut engendrer une augmentation en DAS 10 g, contrairement à une surface composée uniquement de peau qui engendre une diminution en DAS 10 g. De plus, le tissu homogène utilisé entraîne une diminution des valeurs de DAS 10 g allant jusqu'à 5 dB. De plus, le fantôme Hugo en voxels de 4 mm donne des valeurs de DAS 10 g élevées par rapport aux fantômes Duke et Ella et à la littérature ([13], [52]), c'est pourquoi nous choisissons dans la suite des travaux de n'utiliser que les fantômes Duke et Ella.

### 2.3.2 Influence d'une couche d'eau

Dans le chapitre 1, nous avons vu que lors d'une exposition électromagnétique, le corps est capable de réguler sa température via la transpiration (cf section 1.3.2). Nous étudions dans cette partie, l'influence électromagnétique d'une couche d'eau sur la surface d'une sphère remplie de tissu homogène, le même que précédemment (figure 2.1). La sphère a un rayon de 5 cm et est exposée à une onde plane à 61 V/m. Elle est ensuite recouverte d'une autre couche sur une épaisseur de 2 mm. Les différents cas traités sont les suivants :

- sphère de rayon 5 cm remplie du liquide homogène : **cas de référence** ;
- sphère de rayon 5 cm remplie du liquide homogène et recouverte d'une couche de 2 mm d'eau ;
- sphère de rayon 5 cm remplie du liquide homogène et recouverte d'une couche de 2 mm de peau humide ;
- sphère de rayon 5 cm remplie du liquide homogène et recouverte d'une couche de 2 mm de peau sèche.

Les propriétés diélectriques en HF et VHF (1 à 90 MHz) des différents tissus sont données en figure 2.22. Nous remarquons que les conductivités des quatre matériaux sont très différentes à 1 MHz, mais

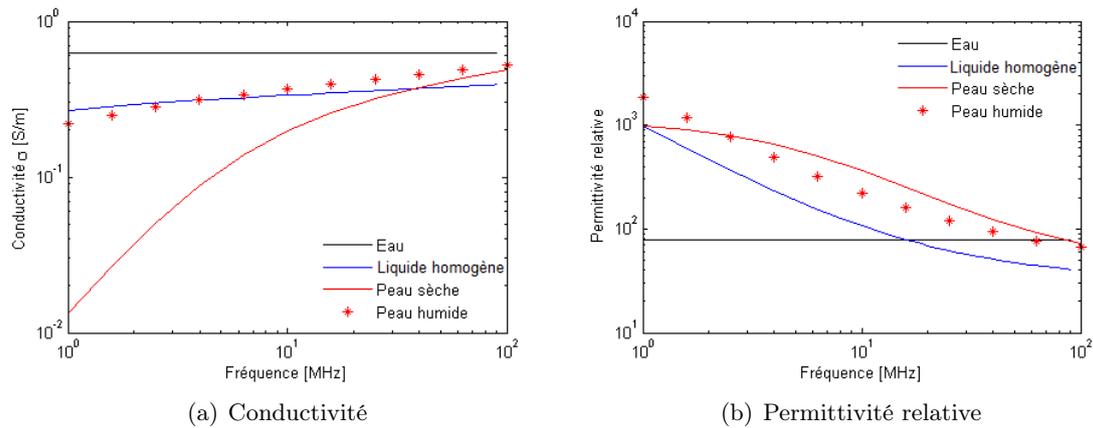


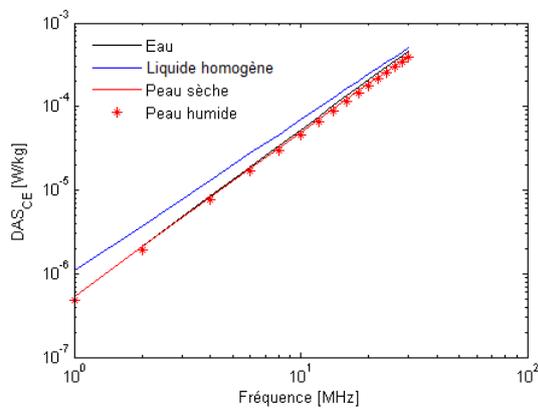
FIGURE 2.22 – Propriétés diélectriques des tissus eau, peau sèche, peau humide et liquide homogène entre 1 et 90 MHz

qu'elles tendent vers les mêmes valeurs ( $0,3 - 0,4$  S/m) quand la fréquence monte en VHF. Dès 10 MHz, les quatre matériaux sont quasi équivalents au niveau de la conductivité. Concernant la permittivité relative, l'eau a une permittivité constante entre 1 et 100 MHz alors que celle des trois autres tissus est 10 fois supérieure à 1 MHz et décroît jusqu'à atteindre le même ordre de grandeur que celle de l'eau à 90 MHz.

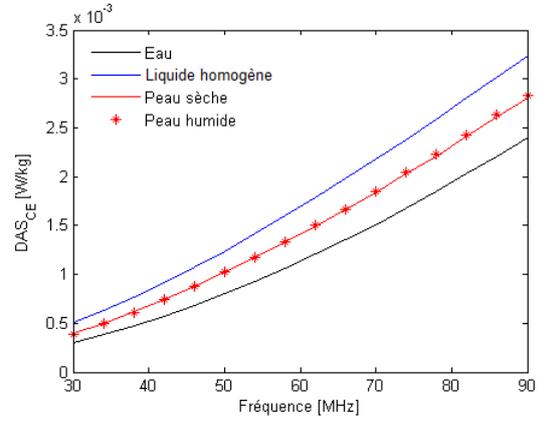
Nous constatons que c'est le cas de référence (aucune couche supplémentaire autour de la sphère de liquide homogène) qui présente les valeurs de  $DAS_{CE}$  les plus élevées (figure 2.23). Que la peau soit sèche ou humide, les valeurs de  $DAS_{CE}$  sont invariantes. Concernant le  $DAS$  10 g max, c'est également le cas de référence (aucune couche supplémentaire sur la sphère homogène) qui présente les valeurs les plus élevées. Le fait que la peau soit sèche ou humide a peu d'impact quand la fréquence est inférieure à 10 MHz, alors que pour une fréquence supérieure à 10 MHz, c'est avec la peau humide que les  $DAS$  10 g max sont les plus faibles (figure 2.24).

En comparaison des cas avec de la peau, la couche d'eau permet de réduire le  $DAS_{CE}$  et 10 g en VHF, alors qu'en HF, la couche d'eau donne des  $DAS$  identiques à ceux obtenus avec peau sèche.

Nous en concluons que la présence d'une couche d'eau sur le liquide homogène fait diminuer les  $DAS$  10 g et corps entier de la sphère homogène. Cela est dû à sa conductivité très supérieure à celle du tissu homogène surtout en HF. La présence de peau (sèche ou humide) permet également de faire diminuer les valeurs de  $DAS$  dans la sphère homogène.

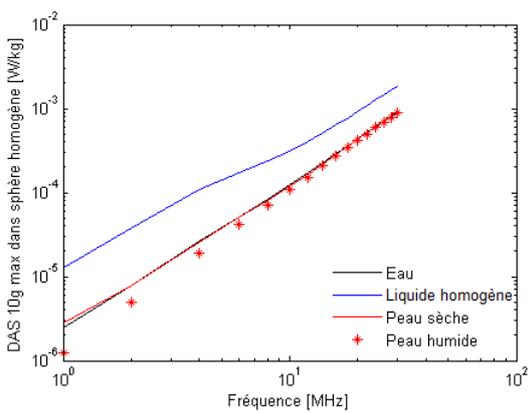


(a) de 1 MHz à 30 MHz

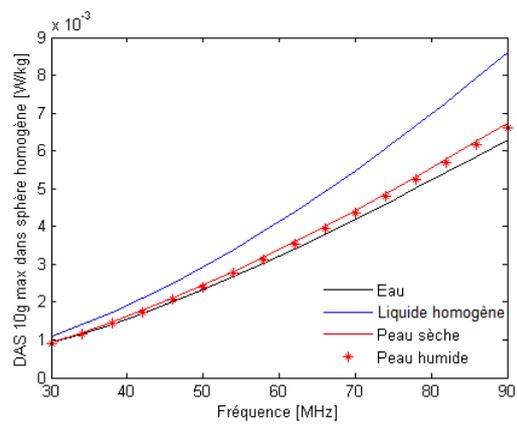


(b) de 30 MHz à 90 MHz

FIGURE 2.23 – DAS corps entier dans la sphère de liquide homogène de 1 à 90 MHz



(a) de 1 MHz à 30 MHz



(b) de 30 MHz à 90 MHz

FIGURE 2.24 – DAS 10 g max dans la sphère de liquide homogène de 1 à 90 MHz

### 2.3.3 Influence d'une couche de tissu/vêtement

Etant donné que dans la réalité, le corps est couvert par des vêtements, nous étudions dans cette dernière partie l'influence d'une couche de textile sur une sphère de rayon 5 cm remplie du tissu homogène. Le tissu homogène est toujours celui décrit en figure 2.1. La sphère est exposée à une onde plane à 61 V/m et est recouverte d'un textile.

Les textiles choisis sont :

- coton :  $\epsilon_r = 1,6$  ; couche de 0,2 mm
- feutre :  $\epsilon_r = 1,29$  ; couche de 2 mm

Les seules données trouvées pour ces textiles concernant la conductivité ou la tangente de perte sont à  $f > 1$  GHz, donc difficilement applicables entre 1 et 90 MHz. C'est pourquoi, nous choisissons une conductivité de  $10^{-8}$  S/m car les deux textiles sont isolants.

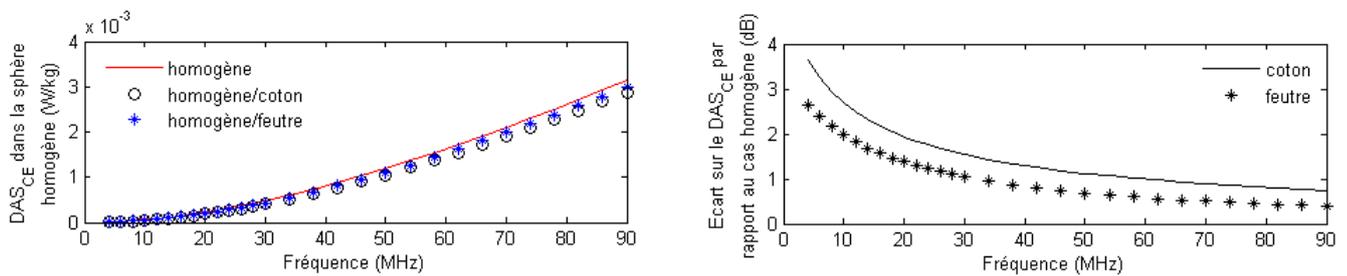


FIGURE 2.25 – Influence d'une couche de textile de coton ou de feutre autour d'une sphère homogène entre 2 et 90 MHz

Entre la sphère de liquide homogène et le feutre, nous étudions également l'influence d'une couche d'air de 1 ou 2 mm.

Nous constatons que la présence de textile sur la surface de la sphère homogène fait diminuer le  $DAS_{CE}$  de la sphère (figure 2.25). Les écarts sont compris entre 0,8 et 3,8 dB pour la présence de coton et entre 0,4 et 2,8 dB pour la présence de feutre.

Cependant, nous constatons que la présence d'air entre la sphère homogène et le feutre fait augmenter le  $DAS_{CE}$  de la sphère (figure 2.26). L'augmentation reste cependant inférieure à 1,75 dB, voire même inférieure à 0,5 dB au-delà de 30 MHz. Nous détectons une discontinuité sur les écarts en  $DAS_{CE}$  pour la couche d'air de 1 mm liée aux simulations (figure 2.26). Nous sommes obligés de faire deux simulations : l'une pour la bande 1 - 30 MHz et la seconde pour la bande 30 - 90 MHz. Lors de la résolution, le logiciel CST fait une approximation des propriétés des différents matériaux qui peut être différente selon la bande de fréquence. Nous n'avons donc pas exactement les mêmes propriétés de matériaux entre les deux simulations, ce qui explique la discontinuité sur les écarts (qui n'est cependant pas visible sur les valeurs de  $DAS_{CE}$ ).

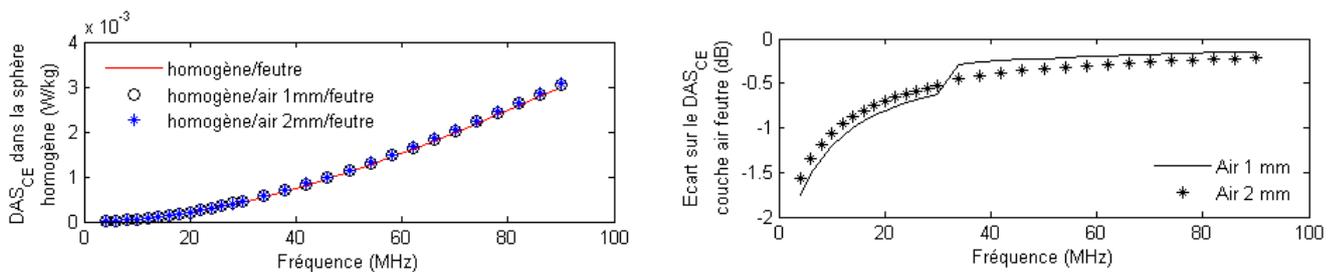


FIGURE 2.26 – Influence d'une couche d'air de 1 et 2 mm entre le textile feutre et une sphère homogène entre 2 et 90 MHz

## 2.4 Conclusion

Nous avons constaté que les fantômes de l'humain ne sont pas équivalents. En effet, la morphologie et la composition des fantômes influent sur l'absorption des ondes électromagnétiques. Des tissus ou matériaux à forte conductivité peuvent limiter l'absorption.

De plus, la présence de textile sur un fantôme permet également de limiter l'absorption mais cela reste cependant difficilement quantifiable puisque nous n'avons pas pu en étudier les effets sur un fantôme de morphologie humaine.

Pour la suite du mémoire, nous choisissons d'utiliser le fantôme Duke, car sa morphologie est moins particulière que celle d'Hugo et que sa composition, en termes de tissus, semble plus réaliste. Le fantôme Ella est également mis de côté, car il est équivalent au fantôme Duke, mis à part le fait que ce soit un fantôme féminin.



## Chapitre 3

# Caractérisation thermique d'une exposition en bandes HF et VHF

### Sommaire

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>3.1</b> | <b>Introduction</b> . . . . .  | <b>52</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Modélisation de la température dans le corps et de la thermorégulation lors d'une exposition RF</b> . . . . . | <b>52</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Etude de l'influence de paramètres extérieurs : température ambiante et durée d'exposition</b> . . . . .      | <b>55</b> |
| 3.3.1      | Influence de la température ambiante . . . . .   | 55        |
| 3.3.2      | Influence de la durée d'exposition . . . . .   | 56        |
| <b>3.4</b> | <b>Evolution de la température locale lors d'une exposition</b> . . . . .  | <b>57</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Caractérisation de la température du corps entier par rapport au DAS corps entier</b> . . . . .               | <b>61</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Fantôme homogène et simulation thermique</b> . . . . .  | <b>61</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Conclusion</b> . . . . .  | <b>65</b> |

---

### 3.1 Introduction

Les chapitres précédents nous ont permis de sélectionner un fantôme et de constater qu'en HF et VHF, les effets thermiques sont prépondérants. Dans ce chapitre, nous étudions donc le comportement thermique du fantôme Duke [3] lors d'une exposition électromagnétique. Nous nous intéressons particulièrement aux facteurs pouvant influencer la température locale ou globale du corps durant l'exposition ainsi qu'à la corrélation entre le DAS et l'augmentation de température.

Tous les résultats présentés dans ce chapitre ont été calculés par simulation avec le logiciel Sim4Life. Ce logiciel utilise un solveur FDTD (Finite Difference Time Domain [68]) et l'équation de bio-chaleur (equation 3.1) pour les calculs thermiques dans le corps. Les conditions limites choisies sont celles de Fourier pour les interfaces tissu-tissu et tissu-air. L'exposition électromagnétique servant de source aux calculs thermiques est une onde plane polarisée verticalement de face en espace libre aux limites de champ électrique de l'ICNIRP [7] : 305 V/m à 2 MHz et 61 V/m entre 30 MHz et 200 MHz.

### 3.2 Modélisation de la température dans le corps et de la thermorégulation lors d'une exposition RF

L'évolution de la température dans la plupart des études et des logiciels de calculs thermiques est calculée grâce à l'équation de bio-chaleur, proposée pour la première fois par Pennes en 1948 [69]. L'équation locale est la suivante :

$$C \rho \frac{\partial T(t)}{\partial t} = \operatorname{div}(k \overrightarrow{\operatorname{grad}} T(t)) + \rho \operatorname{DAS}(t) + A - B(T(t) - T_b(t)) \quad (3.1)$$

avec

- C capacité calorifique du tissu J/(kg.K) ;
- $\rho$  masse volumique du tissu kg/m<sup>3</sup> ;
- T température du tissu K ;
- DAS débit d'absorption spécifique W/kg ;
- k conductivité thermique du tissu W/(m.K) ;
- A chaleur métabolique W/m<sup>3</sup> ;
- B échange de chaleur via le flux sanguin W/(K.m<sup>3</sup>) ;
- T<sub>b</sub> température du sang K.

Dans cette équation (eq 3.1), la température du sang peut être constante dans le temps ou variable, cela dépend de la complexité du modèle choisi. Dans nos simulations, avec le logiciel Sim4Life, la température du sang est variable dans le temps.

Cette équation a été modifiée pour développer des formules plus adaptées à certaines parties du corps [70] ou pour prendre en compte des modèles de thermorégulation du corps plus complexes [71].

Un article de Fiala *et al* [72] indique que les échanges de chaleur ayant lieu à la surface du corps sont de différentes natures :

- échange par convection avec l'air ambiant ;
- échange par radiation avec les surfaces environnantes ;
- échange par irradiation de sources à forte température ;
- échange par évaporation sur la peau.

Cet article a notamment modélisé ces phénomènes pour montrer l'intérêt de modéliser ces échanges pour bien prendre en compte le système de thermorégulation du corps.

Un article de 2003 de Bernardi *et al* [73] propose un modèle thermique de l'être humain prenant en compte la thermorégulation et le phénomène de transpiration permettant de calculer les variations en température dues à une exposition RF entre 10 et 900 MHz. Les auteurs partent de l'équation de bio-chaleur développée par Pennes et la complètent avec des conditions aux limites imposant la

continuité du flux thermique selon un vecteur normal à la surface du corps. C'est cette condition aux limites qui modélise les pertes de chaleurs dues à la transpiration.

De plus, les auteurs calculent les valeurs de A et B (chaleur métabolique et échange de chaleur dû au flux sanguin dans l'équation 3.1) en fonction de la température du sang, de la peau et de l'hypothalamus variables dans le temps lors du calcul thermique. Cela permet d'ajuster en temps réel les différents paramètres thermiques du corps intervenant dans l'équation de bio-chaleur. Lors de cette étude, les résultats thermiques sont comparés à des résultats expérimentaux, cela a permis de valider le modèle thermique proposé.

L'importance de la modélisation de la thermorégulation a également été démontrée grâce à des comparaisons d'augmentation de température avec et sans thermorégulation : différence maximale de 0,3 °C pour une exposition en onde plane polarisée verticalement aux limites de l'ICNIRP [7] pour le public entre 10 et 900 MHz. Les auteurs (Bernardi *et al* [73]) ont également constaté que les variations de température avaient lieu sur tout le corps à cause du flux sanguin même si la puissance absorbée restait localisée sur une partie du corps (notamment sur les chevilles pour des fréquences inférieures à 100 MHz). En se plaçant aux limites de densité de puissance préconisées par l'ICNIRP et en utilisant leur modèle thermique ainsi qu'un fantôme d'être humain anatomique, Bernardi *et al* ont constaté que dans le pire cas (à 40 MHz, exposition de 45 min), l'élévation en température montait à 0,7 °C dans les muscles de la cheville. Sans la thermorégulation, la température monte à 1 °C pour les mêmes conditions.

Le modèle ainsi développé a montré une élévation de température du corps de 0,2 °C pour une exposition à 450 MHz avec une densité de puissance de 24 mW/cm<sup>2</sup>; les mesures de température étant réalisées sur l'œsophage, le dos et la poitrine. Pour une exposition entre 10 et 300 MHz, la densité de puissance est de 0,2 mW/cm<sup>2</sup> et les auteurs constatent une augmentation maximale de température locale de 0,7 °C tandis que la température du sang reste constante. Les auteurs considèrent la température du sang équivalente à la température du corps pour les calculs alors qu'en mesure, ils prennent la température de l'œsophage et/ou dos et/ou poitrine pour estimer la température du corps. Cet article a montré également le rôle de *transporteur de chaleur* du sang, car même si une exposition est localisée (par exemple aux chevilles à 40 MHz), le sang transporte la chaleur créée dans les chevilles à travers tout le corps et des augmentations de température sont relevées sur tout le corps. Ce rôle a pu être mis en avant en supprimant la thermorégulation. Le corps fait en sorte de se maintenir à une température constante donc des mécanismes de refroidissement (comme la transpiration) se mettent en route afin que la température du corps reste constante malgré la chaleur transportée par le sang.

Avec le même modèle thermique, Hirata *et al* ont montré dans un article de 2008 [74] que la répartition des DAS sur le corps était différente selon la fréquence d'exposition, car l'absorption de puissance à 2 GHz reste localisée à la surface contrairement à 70 MHz, alors que la température augmente à la fois en surface et à l'intérieur du corps à 2 GHz. Cela s'explique par la circulation sanguine qui transporte la chaleur dans tout le corps. Ils en ont déduit que le DAS corps entier influe sur la température du corps entier quelle que soit la fréquence ou la distribution de DAS sur le corps. Avec leur modèle thermique, ils ont noté qu'il fallait un DAS corps entier de 6 W/kg dans un fantôme adulte féminin pour avoir une augmentation de 1 °C de la température du sang.

Un autre article de Hirata *et al* de 2009 propose une formule permettant de calculer l'élévation de température du corps [75]. Les auteurs sont repartis de l'équation de bio-chaleur de Pennes 3.1 et des conditions aux limites proposées par [73] en supposant que la chaleur stockée dans le corps était le résultat de l'énergie thermique apportée par le métabolisme et par l'exposition RF en enlevant la chaleur cédée à l'extérieur :

$$Chaleur_{corps} = Chaleur_{métabolisme} + Chaleur_{RF} - Chaleur_{cédée \text{ à la surface}} \quad (3.2)$$

A partir de cet équilibre, ils ont proposé une formule pour calculer l'évolution de la température sur tout le corps en fonction du DAS corps entier pouvant être utilisée pour plusieurs modèles anatomiques

d'êtres humains. L'évolution de la température sur tout le corps s'écrit alors :

$$T(t) \cong T_0 + \frac{W DAS_{CE}}{S (H_{eff} + sw(t))} (1 - \exp(-\frac{S (H_{eff} + sw(t))}{W C_{CE}})) \quad (3.3)$$

avec

- T(t) température du corps ° C ;
- T<sub>0</sub> température initiale du corps ° C ;
- W masse du modèle kg ;
- DAS<sub>CE</sub> DAS corps entier du modèle W/kg ;
- S surface/aire du modèle m<sup>2</sup> ;
- H<sub>eff</sub> coefficient de transfert de chaleur effectif W/m<sup>2</sup> / ° C ;
- sw(t) taux de transpiration W/m<sup>2</sup> / ° C ;
- C<sub>CE</sub> valeur moyenne de la capacité calorifique du modèle J/kg/ ° C.

La formule 3.3 proposée par les auteurs donne de bonnes estimations de la température du corps, car la différence avec les résultats thermiques via la FDTD est d'environ 10% (dans le pire cas, la différence est de 30% ), et permet de calculer la température du corps assez rapidement par rapport à une simulation thermique par la FDTD.

En 2012, Laakso et Akimasa ont proposé un modèle pour modéliser le DAS et les réponses de thermorégulation du corps durant une exposition RF en champ lointain [76]. Dans cette étude, ils ont modélisé les phénomènes suivants :

- **équation de bio-chaleur** du modèle de Pennes [69] ;
- **transfert de chaleur sur la peau** : lié aux mouvements de l'air ambiant et des vêtements ;
- **flux sanguin sur la peau** : dépend des mécanismes du système nerveux central et de mécanismes locaux liés à la température locale, basé sur le modèle de Stolwijk [77] ;
- **flux sanguin dans les autres tissus** : les auteurs supposent que cela a le même comportement que le flux sanguin sur la peau mais sans la dépendance du système nerveux central ;
- **transpiration** : similaire en comportement à la vasodilatation dans la peau ;
- **contrôle central de la vasodilatation et transpiration** : dépend de la température de la tête, notamment de l'hypothalamus, et de la température moyenne de la peau, mais pour des questions de simplicité, les auteurs ont utilisé la température du sang au lieu de la température de l'hypothalamus ;
- **génération de chaleur métabolique et vasoconstriction** : les auteurs supposent que la chaleur métabolique est constante et indépendante des augmentations de température comme le modèle de Stolwijk [77] ; les frissons et la vasoconstriction ne sont pas pris en compte ;
- **modèle morphologique et propriétés des tissus** : utilisation du fantôme japonais Taro [52] en résolution de 2 mm<sup>3</sup>, la dépendance en température des propriétés diélectriques des tissus est négligée ; adaptation des valeurs de perfusion sanguine et de flux sanguin en fonction de paramètres en sortie du cœur ;
- **variations locales des propriétés de la peau** : le corps est divisé en six parties qui présentent des propriétés différentes pour la peau, flux sanguin différent et densité de thermorécepteurs différente.

Les auteurs exposent leur fantôme à une onde plane polarisée verticalement à 39 MHz, 800 MHz et 2400 MHz de façon à obtenir des DAS corps entier de 0,4 W/kg, 1 W/kg et 4 W/kg. Ils ont observé que l'élévation de la température du corps est très faible par rapport aux élévations locales de température. Donc si la température du corps s'élève fortement, il y a déjà eu des dommages sévères au niveau local. Donc l'utilisation du DAS corps entier dans les normes est peut-être à revoir, voire à enlever. De plus, l'équation de bio-chaleur sans thermorégulation est une bonne approximation pour le modèle complet quand les DAS locaux sont inférieurs à 10 W/kg. Quand le DAS corps entier et les DAS locaux restent inférieurs aux restrictions de base, le facteur dominant sur les élévations de température locales est le flux sanguin sur la peau qui est constant. Enfin quand le DAS 10 g est supérieur aux restrictions de base (10 W/kg ou 20 W/kg selon la zone exposée pour un travailleur), le facteur dominant est le flux

sanguin dans tous les tissus et celui-ci n'est plus une constante (il dépend dans ce cas des températures de la peau).

Concernant les yeux, une étude de De Santis et Feliziani [78] indiquent que l'œil est thermorégulé par le battement des cils, l'évaporation des larmes ainsi que le flux sanguin. La vascularisation dans l'œil ne joue pas un rôle très important dans la thermorégulation contrairement aux battements de cils et la sécrétion de larmes. Il est donc nécessaire de modéliser ces deux mécanismes de façon la plus réaliste possible. Les auteurs proposent donc dans cet article une thermorégulation de l'œil grâce à une évaporation moyenne des larmes, une fréquence de battement de cils dépendant du temps  $t$ , et des phénomènes de convection dépendant de la vitesse du vent de l'air ambiant. Avec leur modèle, ils n'observent pas de grande différence sur l'élévation de température sur la lentille avec et sans thermorégulation de l'œil pour une exposition RF. En prenant en compte la thermorégulation et en se plaçant aux limites travailleurs de l'ICNIRP [7], la température s'élève de  $1,5^\circ\text{C}$ , alors qu'elle ne devrait monter que de  $0,8^\circ\text{C}$  si on veut garder une marge de précaution suffisante. Les auteurs en concluent que soit le modèle n'est pas valide, soit il faudrait revoir les limites de l'ICNIRP pour l'œil pour en limiter son augmentation de température.

Nous constatons dans cet état de l'art que de nombreuses études se sont intéressées à la modélisation de la température du corps lors d'une exposition électromagnétique. Ces études essaient de prendre en compte tous les phénomènes biologiques intervenant lors de la régulation thermique du corps (notamment pour la régulation particulière de l'œil) et de quantifier les différentes sensations de chaleur lors de l'exposition.

Dans le chapitre précédent (chapitre 2), nous avons constaté que l'absorption de puissance lors d'une exposition entre 1 et 90 MHz n'est pas répartie de manière homogène sur le corps. Or, nous n'avons pas trouvé d'études traitant d'effets locaux thermiques pour ces fréquences. Dans la suite de chapitre, nous étudions donc les élévations locales de température selon plusieurs paramètres (température ambiante, durée d'exposition, DAS corps entier et DAS 10 g max).

### 3.3 Etude de l'influence de paramètres extérieurs : température ambiante et durée d'exposition

#### 3.3.1 Influence de la température ambiante

Le DAS 10 g maximal apparaît à la surface du corps en HF et VHF, nous nous intéressons donc dans cette partie à l'influence de la température ambiante sur la surface du corps, car c'est également en surface que l'élévation maximale de température apparaît<sup>23</sup>. Nous avons choisi plusieurs températures ambiantes ( $0^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $28^\circ\text{C}$  et  $35^\circ\text{C}$ ) autour du fantôme Duke [3] qui est exposé de face, en espace libre, à une onde plane polarisée verticalement à  $61\text{ V/m}$  entre 30 et 90 MHz. Les résultats présentés ci-dessous (figure 3.1) comparent l'évolution et l'élévation de température à 60 MHz au point de DAS 10 g maximal ( $DAS_{10gmax} = 5\text{W/kg}$ ), i.e. à la surface de la cheville du fantôme. La température initiale de l'ensemble du corps est fixée à  $37^\circ\text{C}$  à  $t = 0\text{ s}$ . Nous devons donc calculer la distribution initiale de température sur le corps, c'est pourquoi l'exposition n'intervient qu'entre  $t = 3600\text{ s}$  et  $7200\text{ s}$ , afin de laisser le temps au logiciel de calculer la température initiale de l'ensemble du corps selon la température extérieure.

Les élévations de température constatées sont les suivantes :

- $0,84^\circ\text{C}$  pour une température ambiante de  $0^\circ\text{C}$  ;
- $0,85^\circ\text{C}$  pour une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  ;
- $0,86^\circ\text{C}$  pour une température ambiante de  $28^\circ\text{C}$  et de  $35^\circ\text{C}$ .

Nous constatons que les différences entre les élévations de température sont faibles (inférieures à  $0,5\text{ dB}$ ), donc nous pouvons considérer que la température extérieure n'a pas d'influence significative

---

<sup>23</sup>. Pour des fréquences entre 1 et 90 MHz, nous avons pu observer en simulation que c'était toujours à la surface du corps que l'élévation de température est maximale.

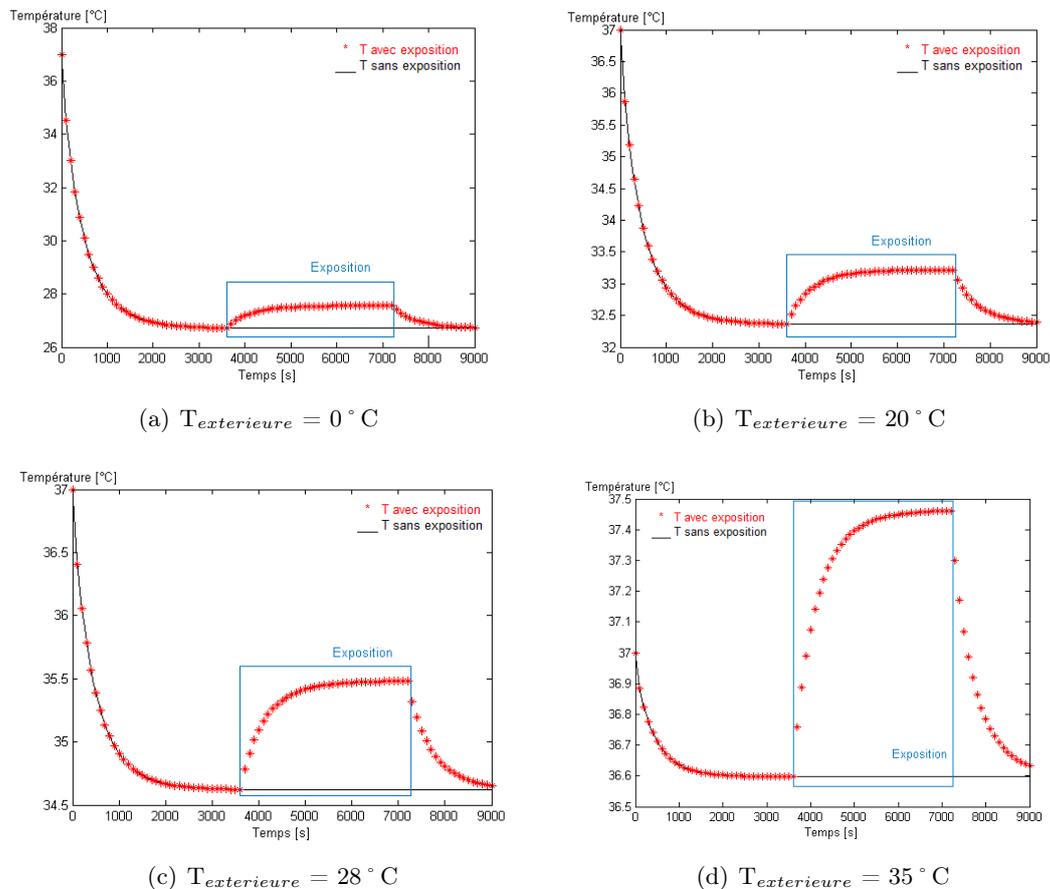


FIGURE 3.1 – Evolution de la température en fonction de la fréquence au point de DAS 10 g max (5 W/kg) suite à une exposition en onde plane à 60 MHz

sur l'élévation de température lors d'une exposition RF. Pour la suite du chapitre, nous choisissons donc une température extérieure de  $28^{\circ}\text{C}$ , car elle nous donne des élévations maximales, et est très utilisée dans la littérature<sup>24</sup>.

### 3.3.2 Influence de la durée d'exposition

Certaines normes indiquent que la température du corps augmenterait de  $1^{\circ}\text{C}$  pour une exposition à 4 W/kg corps entier pendant 30 min, alors que d'autres indiquent que c'est pour une heure d'exposition. Avant d'étudier le DAS et les variations de température au niveau corps entier, nous comparons les élévations de température locales au point de DAS 10 g max pour des expositions de 30 min ou 1h.

Quatre cas sont présentés :

- **(30 min ; 30 min)** : Adaptation à la température ambiante pendant 30 min puis exposition de 30 min ;
- **(30 min ; 1h)** : Adaptation à la température ambiante pendant 30 min puis exposition de 1h ;
- **(1h ; 30 min)** : Adaptation à la température ambiante pendant 1h puis exposition de 30 min ;
- **(1h ; 1h)** : Adaptation à la température ambiante pendant 1h puis exposition de 1h.

La figure 3.2 présente l'évolution de la température au point de DAS 10 g maximal à 60 MHz pour plusieurs durées d'exposition et d'adaptation lors d'une exposition en onde plane de face polarisée verticalement à 61 V/m. Les tableaux 3.1 et 3.2 donnent l'élévation de température au point de DAS

24. Cette valeur de température est également la valeur moyenne des cas opérationnels chez Thales

10 g max et l'élévation moyenne de température dans le sang et dans les chevilles obtenues pour les quatre cas, ainsi que les écarts<sup>25</sup> avec le cas (1h ; 1h). Nous constatons un écart maximal de 0,5 dB sur l'élévation de température maximale entre les deux cas extrêmes. L'écart pour le sang est de 0,7 dB au maximum tandis que sur les deux chevilles, il est de 1,7 dB. Nous n'avons pas constaté de différence pour l'hypothalamus. Etant donné que nous nous intéressons principalement au pire cas, donc à l'élévation maximale de température, nous considérons qu'une exposition de 30 min donne suffisamment d'information sur la température. Cela permet de gagner du temps de simulation.

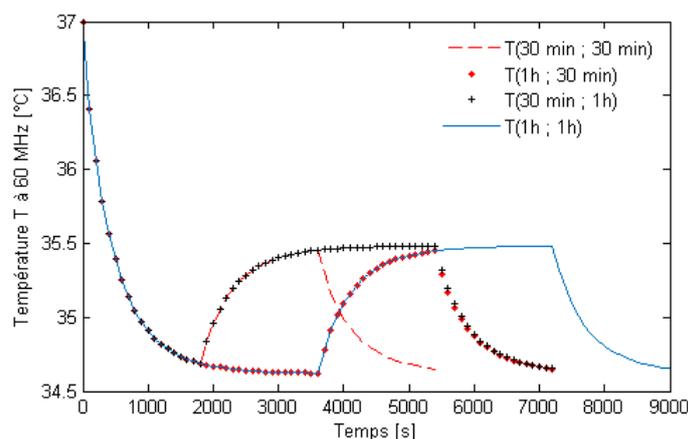


FIGURE 3.2 – Influence de la durée d'exposition et d'adaptation à l'air environnant en exposition onde plane à 60 MHz pour  $T_{ext} = 28^{\circ}\text{C}$ , au point de DAS 10 g max (5 W/kg)

|                   | Élévation de T [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Ecart par rapport au cas (1h ; 1h) |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| (30 min ; 30 min) | 0,764                                 | -0,51 dB                           |
| (1h ; 30 min)     | 0,827                                 | -0,17 dB                           |
| (30 min ; 1 h)    | 0,793                                 | -0,35 dB                           |
| (1h ; 1h)         | 0,860                                 | 0 dB                               |

TABLE 3.1 – Élévation de température au point de DAS 10 g max et écarts par rapport au cas (1h ; 1h)

### 3.4 Evolution de la température locale lors d'une exposition

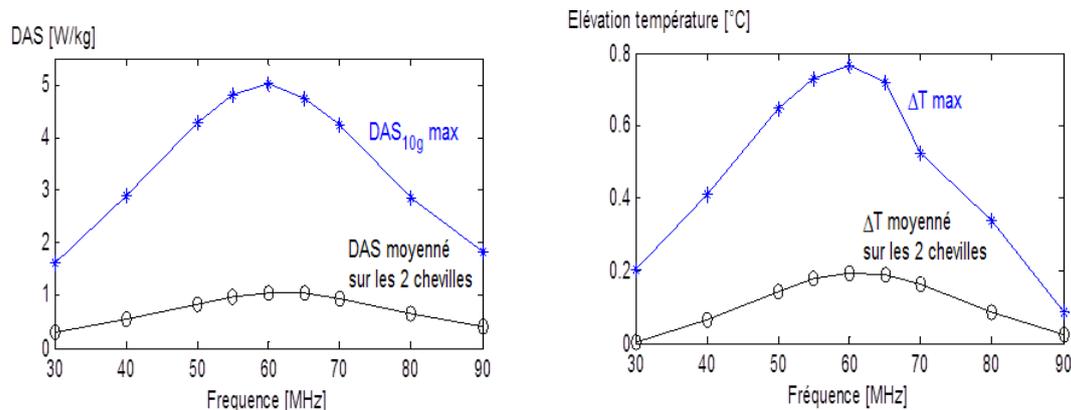
La répartition en DAS étant différente selon la fréquence, il convient donc d'étudier la répartition en température selon la fréquence. La figure 3.3 présente les valeurs de DAS 10 g max et de DAS moyenné dans les chevilles, ainsi que les élévations de température correspondante. Nous constatons que l'élévation de température est maximale à 60 MHz tout comme le DAS. L'élévation de température à 60 MHz est de  $0,76^{\circ}\text{C}$  pour le point de DAS 10 g max et de  $0,2^{\circ}\text{C}$  en moyenne sur les deux chevilles. Cela reste bien inférieur aux  $8^{\circ}\text{C}$  d'élévation de température en surface de la peau, qui provoquent une sensation de brûlure sur la peau [28].

Les figures 3.4 et 3.5 présentent la distribution en DAS 10 g le long du corps pour une exposition en onde plane afin de visualiser les zones à fort ou faible DAS. Les champs appliqués sont ceux donnés en limite dans l'ICNIRP [7] : 305 V/m à 2 MHz et 61 V/m à 90 et 200 MHz. La figure 3.6 présente

25. Dans ce chapitre, les écarts en température sont calculés par la formule  $10.\log(x/y)$

|                   | Elévation de T dans le sang [ ° C]       | Ecart par rapport au cas (1h ; 1h) |
|-------------------|--|------------------------------------|
| (30 min ; 30 min) | 0,0017                                   | -0,7 dB                            |
| (1h ; 1h)         | 0,002                                    | 0 dB                               |
|                   | Elévation de T dans les chevilles [ ° C] | Ecart par rapport au cas (1h ; 1h) |
| (30 min ; 30 min) | 0,193                                    | -1,7 dB                            |
| (1h ; 1h)         | 0,285                                    | 0 dB                               |

TABLE 3.2 – Elévation de température dans le sang et les chevilles et écarts par rapport au cas (1h ; 1h)



(a) DAS 10 g maximum dans les deux chevilles et DAS moyenné sur les deux chevilles (b) Température au point de DAS 10 g max dans la cheville et température moyenne des chevilles

FIGURE 3.3 – Evolution en fonction de la fréquence du DAS et de la température dans les chevilles suite à une exposition en onde plane

les zones d'échauffement lors de ces expositions en appliquant un DAS corps entier de 0,4 W/kg après 30 min d'exposition. Nous pouvons constater qu'au niveau des DAS, nous restons toujours inférieurs aux limites *travailleurs* de l'ICNIRP. De même pour la température où l'élévation maximale reste inférieure à la sensation de brûlure de 8 °C (3 °C d'élévation sur la cheville à 2 MHz, tableau 3.3). Nous remarquons également que la température se répartit de manière plus homogène sur le corps que le DAS 10 g. A 2 MHz et 200 MHz, nous constatons une température plus élevée aux chevilles (2 MHz) et au cou (200 MHz), alors qu'à 90 MHz, aucune zone ne se démarque en température. Les chevilles, poignets et coudes présentent pourtant un DAS plus élevé à 90 MHz que le reste du corps.

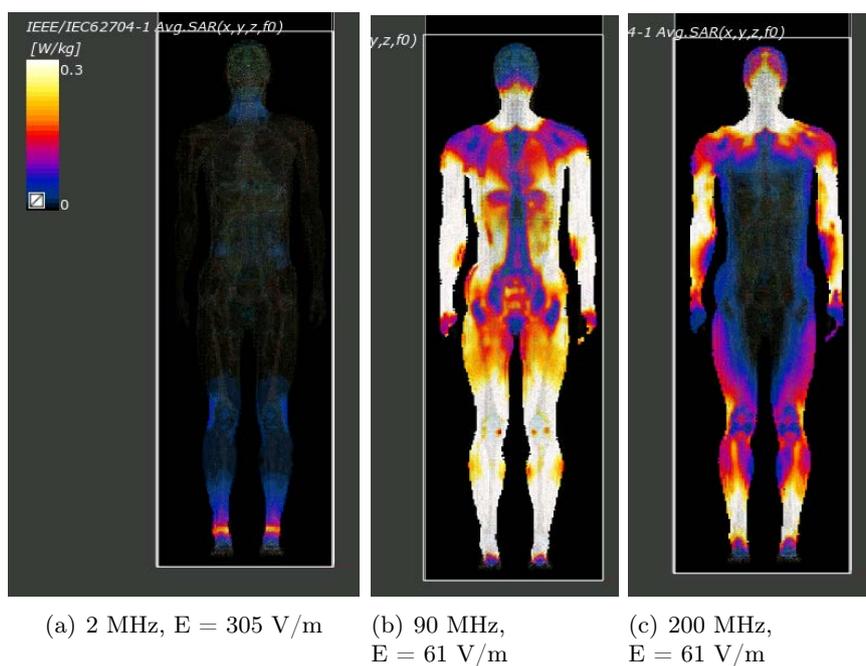


FIGURE 3.4 – Distribution en DAS 10 g sur le fantôme Duke hétérogène en onde plane - coupe en  $y = 0,1$  m - échelle de 0 à 0,3 W/kg

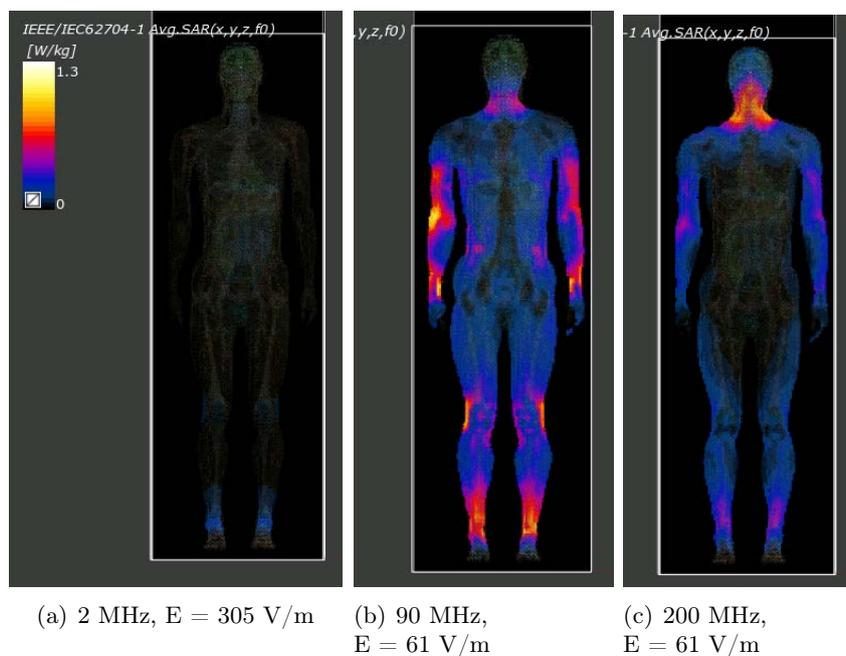


FIGURE 3.5 – Distribution en DAS 10 g sur le fantôme Duke hétérogène - coupe en  $y = 0,1$  m - échelle de 0 à 1,3 W/kg

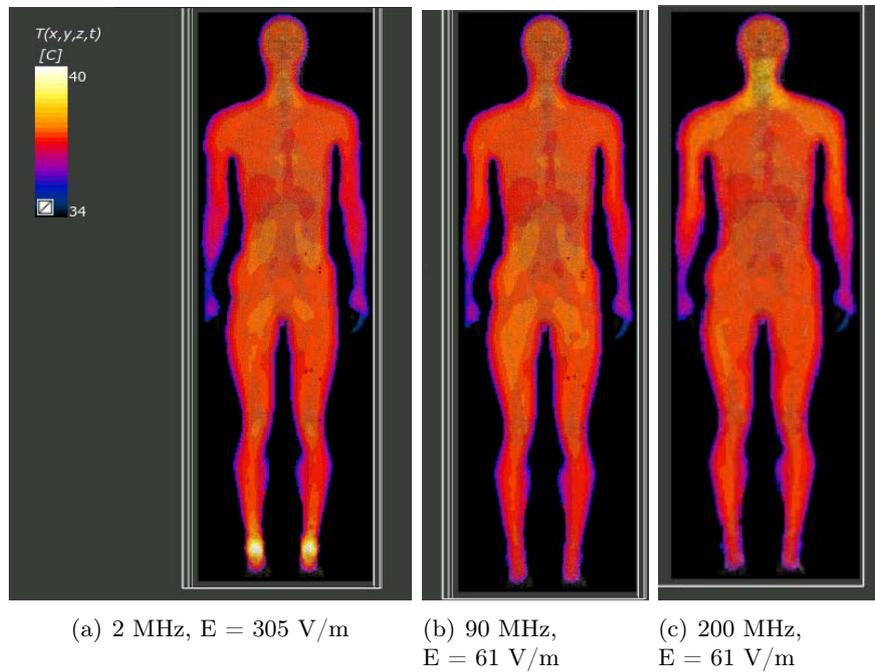


FIGURE 3.6 – Distribution en température sur le fantôme Duke hétérogène après 30 min d'exposition - coupe en  $y = 0,1 \text{ m}$

| Freq. [MHz]   | $DAS_{CE}$ | DAS 10 g max | DAS chevilles | DAS hypothalamus | $\Delta T \text{ max}$ | $\Delta T \text{ chevilles}$ | $\Delta T \text{ hypothalamus}$ | $\Delta T \text{ sang}$ |
|---|------------|--------------|---------------|------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| <i>Exposition limite ICNIRP (305 V/m à 2 MHz et 61 V/m à 90 et 200 MHz)</i> |            |              |               |                  |                        |                              |                                 |                         |
| <b>2 MHz</b>  | 0,007      | 0,311        | 0,048         | 0,004            | 0,047                  | 0                            | 0                               | 0                       |
| <b>90 MHz</b>   | 0,204      | 1,833        | 0,4           | 0,082            | 0,083                  | 0,024                        | 0,003                           | 0,001                   |
| <b>200 MHz</b>  | 0,084      | 1,262        | 0,174         | 0,142            | 0,223                  | 0                            | 0,007                           | 0                       |
| <i><math>DAS_{CE}</math> imposé à 0,4 W/kg</i>                              |            |              |               |                  |                        |                              |                                 |                         |
| <b>2 MHz</b>  | 0,403      | 17,089       | 2,651         | 0,215            | 2,917                  | 0,764                        | 0,008                           | 0,002                   |
| <b>90 MHz</b>   | 0,408      | 3,666        | 0,800         | 0,165            | 0,130                  | 0,122                        | 0,007                           | 0,002                   |
| <b>200 MHz</b>  | 0,402      | 6,058        | 0,834         | 0,683            | 0,988                  | 0,123                        | 0,032                           | 0,002                   |

TABLE 3.3 – Principales caractéristiques du fantôme Duke hétérogène pour une exposition onde plane à 2 MHz, 90 MHz et 200 MHz selon le champ ou DAS corps entier appliqué

### 3.5 Caractérisation de la température du corps entier par rapport au DAS corps entier

Dans cette section, nous comparons les températures dans l'hypothalamus et dans le sang afin de proposer une caractérisation de la température du corps entier. Nous constatons que pour un même DAS corps entier l'élévation de température dans l'hypothalamus varie, alors que dans le sang elle reste constante (table 3.3). En effet, l'hypothalamus étant dans la tête, il est sensible à la fréquence de résonance de la tête, tandis que le sang en étant présent sur tout le corps est peu sensible aux phénomènes de résonance. Sur la figure 3.7, nous constatons qu'entre 30 et 90 MHz, le rapport  $DAS_{CE}/\Delta T$  du sang est quasi constant, car il est compris entre 94 et 60 W/kg/°C, alors que celui de l'hypothalamus est variable (compris entre 474 et 173 W/kg/°C).

Cela nous permet de considérer la température du sang équivalente à celle du corps entier.

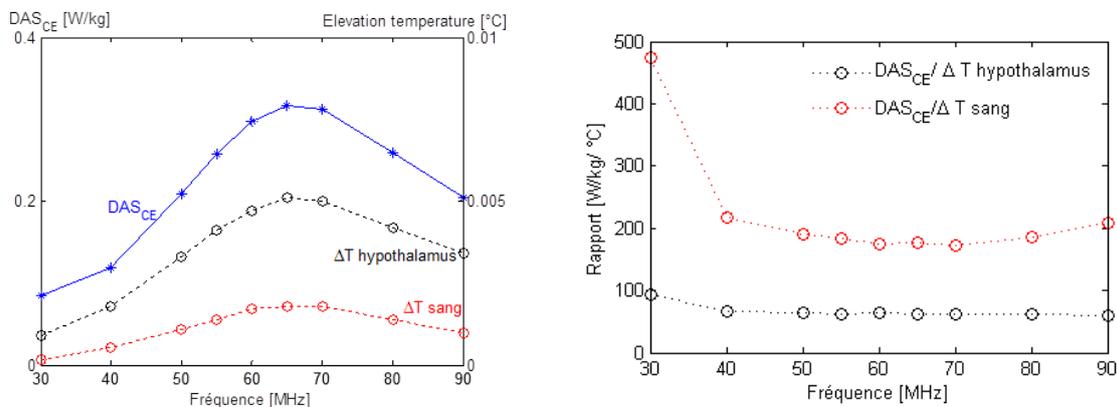


FIGURE 3.7 – DAS corps entier et température du sang et de l'hypothalamus en VHF

### 3.6 Fantôme homogène et simulation thermique

Dans cette dernière partie, nous comparons les résultats thermiques calculés avec un fantôme hétérogène ou homogène. Cela nous permet d'évaluer les effets d'homogénéisation sur la température du corps lors d'une exposition électromagnétique en onde plane. Les propriétés thermiques (capacité calorifique et conductivité thermique) étant moins disparates entre les tissus que les propriétés diélectriques, nous voulons montrer que les élévations de température sont moins sensibles à la nature des tissus que le DAS 10 g. Trois cas sont étudiés :

- **100 % hétérogène** : fantôme hétérogène en électromagnétique et en thermique ;
- **Semi-homogène** : fantôme homogène en électromagnétique et fantôme hétérogène en thermique ;
- **100 % homogène** : fantôme homogène en électromagnétique et homogène avec du sang et un hypothalamus en thermique.

Le cas 100 % homogène n'a aucun tissu différencié à part le sang et l'hypothalamus pour les calculs thermiques, cela permet de prendre en compte la thermorégulation du corps, car la chaleur métabolique ou le transfert de chaleur sont importants dans ces deux tissus par rapport aux autres tissus.

Le fantôme homogène a les propriétés diélectriques décrites dans le chapitre 2 (figure 2.1) et ses propriétés thermiques sont déterminées de la même manière, c'est-à-dire moyenne pondérée des tissus majoritaires en volume (tableau 3.4).

Les figures 3.8 et 3.9 présentent la distribution en DAS 10 g dans le corps du fantôme Duke à 60 MHz lors d'une exposition de face, en espace libre, à une onde plane à 61 V/m polarisée verticalement. Comme cela a déjà été constaté, les DAS sont particulièrement élevés au niveau des chevilles, des genoux

|                | Masse volumique<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Capa. calorifique<br>[J/kg/°C] | Cond. thermique<br>[W/m/°C] | Transfert chaleur<br>[mL/-min/kg] | Chaleur métabolique<br>[W/kg] |
|----------------|--|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Tissu homogène | 1029   | 2964                           | 0,37                        | 67                                | 1,13                          |
| Sang           | 1050   | 3617                           | 0,52                        | 10000                             | 0                             |
| Hypothalamus   | 1053   | 3687                           | 0,51                        | 885                               | 18,01                         |

TABLE 3.4 – Propriétés thermiques du tissu homogène, du sang et de l'hypothalamus

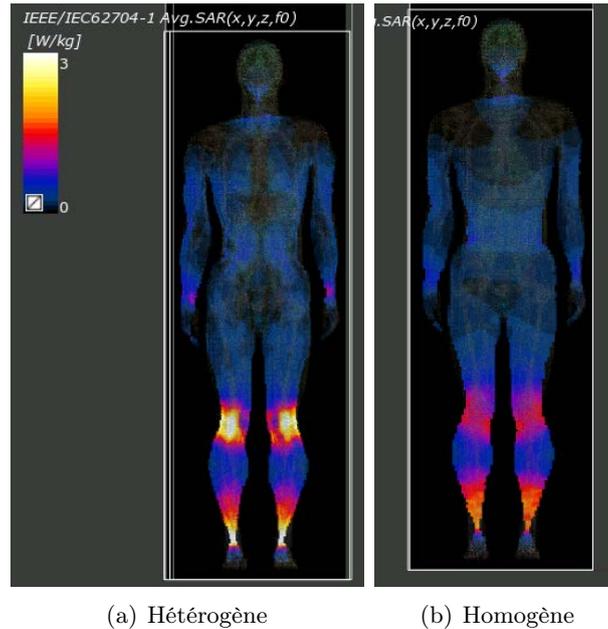


FIGURE 3.8 – Distribution en DAS 10 g à 60 MHz sur le fantôme Duke - coupe en  $y = 0,07$  m

et du cou, alors que sur les figures 3.10 et 3.11, nous constatons que la température se répartit sur le corps sans présenter de *zones chaudes*. Nous remarquons également que la distribution en température varie peu quelle que soit la nature des tissus (hétérogène ou homogène) : la température moyenne du corps pour les trois cas reste en effet la même, mais au niveau local, il y a des différences. Certains organes, comme le cœur, les poumons ou le cerveau ne sont plus visibles dans le cas 100% homogène, alors que dans les cas où le fantôme reste hétérogène pour la simulation thermique, ils sont visibles par la différence de température avec les tissus environnants (différence de 1 °C, figure 3.12).

Les principales caractéristiques (DAS et élévation de température  $\Delta T$ ) de ces trois cas sont données dans le tableau 3.5. Nous constatons que les écarts sur les DAS entre un fantôme hétérogène et homogène sont différents de ceux en température : le rapport  $DAS/\Delta T$  pour le volume de 10 g présentant le DAS 10 g max est de 6,6 W/kg/°C dans le cas 100 % hétérogène, alors qu'il est de 7,0 W/kg/°C pour le cas semi-homogène et de 8,2 W/kg/°C pour le cas 100 % homogène. De plus, pour l'hypothalamus, ce rapport est de 26 W/kg/°C pour le 100 % hétérogène, de 43 W/kg/°C pour le semi-homogène, alors qu'il est de 7 W/kg/°C pour le 100 % homogène. Cependant au niveau de l'élévation en température du sang, il n'y a qu'un écart de 2 dB entre le cas 100 % hétérogène et le 100 % homogène. Donc comme dans le chapitre 2, les écarts entre un fantôme hétérogène et un fantôme homogène sont plus faibles sur tout le corps que ceux sur des volumes particuliers, mais il est tout à fait envisageable d'utiliser des fantômes homogènes pour l'évaluation dosimétrique lors d'une exposition électromagnétique.

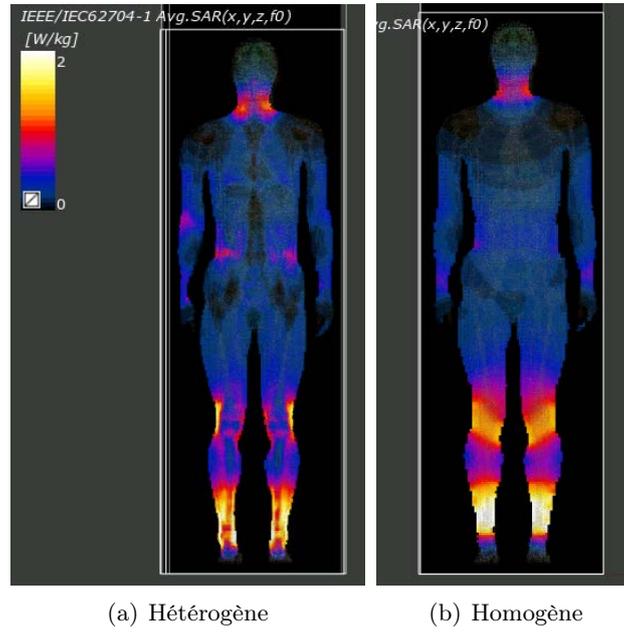


FIGURE 3.9 – Distribution en DAS 10 g à 60 MHz sur le fantôme Duke - coupe en  $y = 0,1$  m

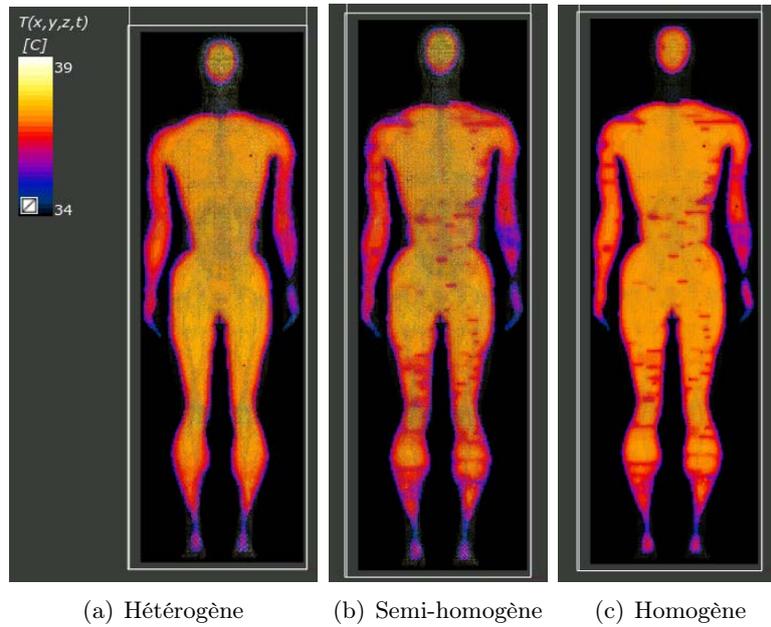


FIGURE 3.10 – Distribution en température à 60 MHz sur les trois cas d'études du fantôme Duke après 30 min d'exposition - coupe en  $y = 0,07$  m

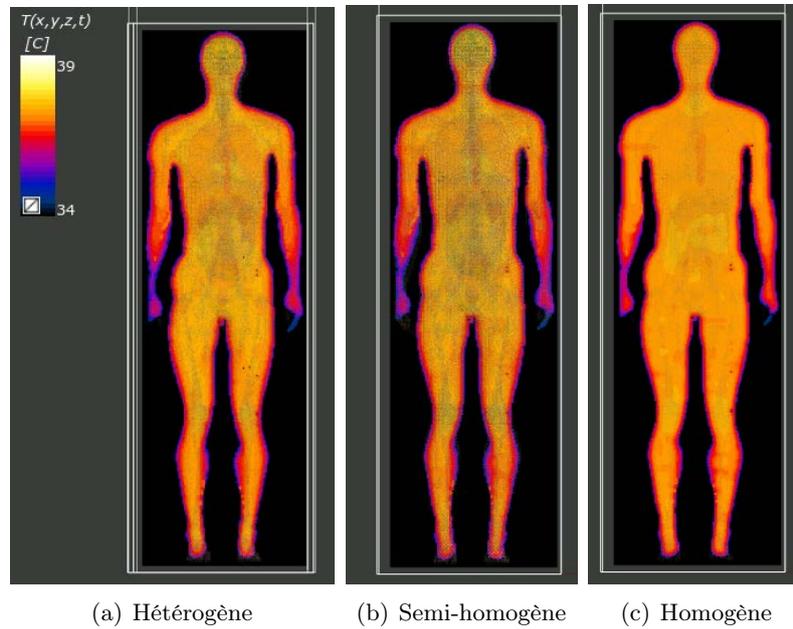


FIGURE 3.11 – Distribution en température à 60 MHz sur les trois cas d'études du fantôme Duke après 30 min d'exposition - coupe en  $y = 0,1$  m

|                           | $DAS_{CE}$<br>[W/kg] | DAS<br>10 g<br>max<br>[W/kg] | DAS<br>che-<br>villes<br>[W/kg] | DAS<br>hypotha-<br>lamus<br>[W/kg] | $\Delta T$<br>max<br>[°C] | $\Delta T$ che-<br>villes<br>[°C] | $\Delta T$ hypo-<br>thalamus<br>[°C] | $\Delta T$<br>sang<br>[°C] |
|---------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Duke hé-<br>téro-<br>gène | 0,298                | 5                            | 1,06                            | 0,12                               | 0,76                      | 0,19                              | 0,0047                               | 0,0017                     |
| Duke<br>semi-<br>homogène | 0,296                | 2,4                          | 1,024                           | 0,078                              | 0,342                     | 0,126                             | 0,0018                               | 0,0013                     |
| Duke ho-<br>mogène        | 0,296                | 2,4                          | 1,024                           | 0,078                              | 0,294                     | 0,109                             | 0,0108                               | 0,0011                     |

TABLE 3.5 – DAS et élévations de température dans le fantôme Duke hétérogène, homogène et semi-homogène à 60 MHz après 30 d'exposition

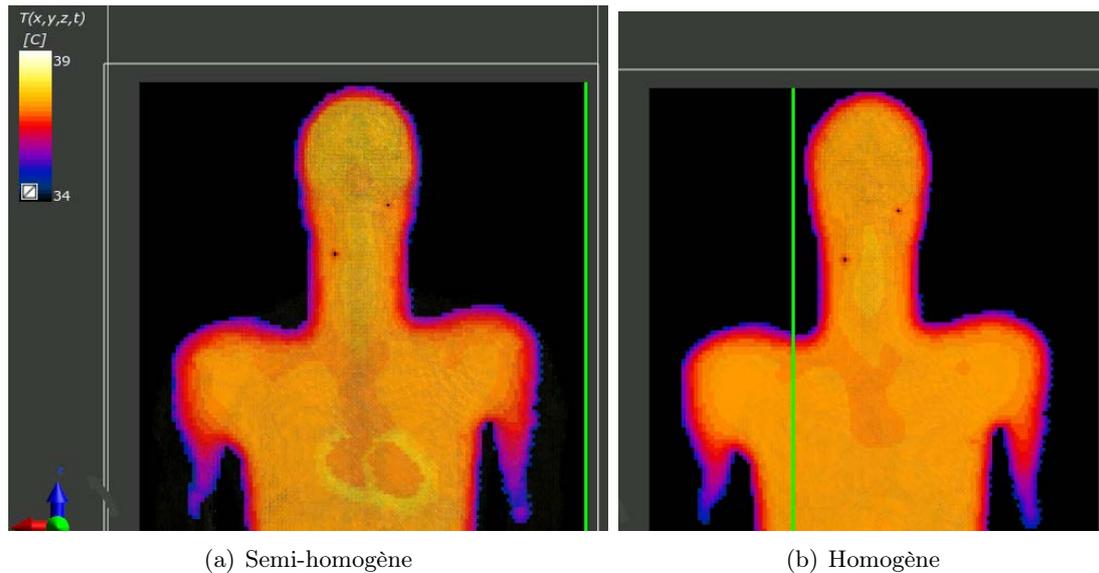


FIGURE 3.12 – Distribution en température à 60 MHz sur le fantôme Duke après 30 min d'exposition - coupe en  $y = 0,157$  m

### 3.7 Conclusion

De nombreuses études ont été réalisées pour proposer des méthodes de calcul de la température du corps ou des tissus du corps humain. Ces modèles sont capables de prendre en compte l'effet de l'air extérieur, la transpiration, le refroidissement des tissus grâce à la circulation sanguine ainsi que la présence de source de chaleur lors d'une exposition électromagnétique.

Il a été démontré dans ce chapitre que l'augmentation de température intervenait surtout au début de l'exposition, car la thermorégulation du corps est visible dès les premières minutes et donc la température du corps et des tissus se stabilise à une température limite dans les 30 premières minutes d'exposition. Cependant pour des expositions supérieures aux limites de champs, la température locale peut continuer d'augmenter même si la température moyenne du sang (donc du corps) est stabilisée après 30 min d'exposition. Lors de nos études, nous avons exposé le fantôme Duke à une onde plane polarisée verticalement à  $100 \text{ W/m}^2$  et nous avons constaté qu'après 30 min d'exposition, la température au point de DAS  $10 \text{ g max}$  avait augmenté de  $4^\circ \text{ C}$  et continuait d'augmenter alors que la température du corps entier s'était élevée de  $0,4^\circ \text{ C}$  et était stabilisée.

De plus l'impact de la température ambiante est quasi inexistant sur la variation interne de température. La température extérieure va influencer sur la température de la peau mais pas sur l'élévation de température due à l'exposition électromagnétique bien qu'elle puisse influencer sur certains mécanismes de thermorégulation. En effet, le taux de transpiration est plus élevé pour des températures extérieures supérieures à  $25^\circ \text{ C}$  que pour des températures extérieures inférieures à  $20^\circ \text{ C}$ . Cela permet à la température interne du corps de rester constante quelle que soit la température extérieure (le corps fait plus d'efforts pour se thermoréguler). Cependant, le modèle utilisé dans ce chapitre ne prend pas en compte la transpiration du corps, donc nous n'avons pas pu en étudier les effets.

La fréquence d'exposition influe sur les augmentations locales de température à cause notamment de la répartition des DAS et des phénomènes de résonance, alors qu'au niveau du corps entier, elle n'a pas d'influence.

Nous proposons d'utiliser la température moyenne du sang pour caractériser celle du corps entier, car elle est indépendante de la fréquence d'exposition, contrairement à celle de tissus *locaux*, comme l'hypothalamus.

Enfin, l'utilisation d'un fantôme homogène en simulation thermique et électromagnétique donne de bonnes estimations des élévations de températures locales et sur tout le corps, ce qui permet de valider l'utilisation de fantôme homogène pour des calculs dosimétriques dans ces fréquences (HF et VHF).

# Chapitre 4

## Etablissement de liens entre différentes grandeurs dosimétriques : champs externes, courant induit et DAS

### Sommaire

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>4.1</b> | <b>Introduction</b>  | <b>69</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Etat de l'art sur la modélisation du corps humain par des antennes et des circuits électriques</b>                    | <b>69</b> |
| 4.2.1      | Antenne équivalente à l'être humain  | 69        |
| 4.2.2      | Circuit équivalent à l'être humain   | 73        |
| <b>4.3</b> | <b>Influence de l'impédance d'onde sur les courants induits et le DAS</b>  | <b>74</b> |
| 4.3.1      | Présentation de l'étude  | 74        |
| 4.3.2      | Modélisation du corps par des circuits électriques pour l'évaluation du courant induit selon la posture du corps         | 75        |
| 4.3.2.1    | Fantôme isolé équivalent à une antenne électrique  | 75        |
| 4.3.2.2    | Fantôme en boucle équivalent à une antenne magnétique  | 76        |
| 4.3.3      | Résultats  | 77        |
| 4.3.3.1    | Exposition théorique en champ haute impédance  | 77        |
| 4.3.3.2    | Exposition théorique en champ basse impédance  | 79        |
| 4.3.3.3    | Exposition réaliste : champ rayonné par une antenne placée sur le toit d'un véhicule                                     | 80        |
| 4.3.4      | Conclusion   | 80        |
| <b>4.4</b> | <b>Influence du champ électrique externe sur les courants induits : Modélisation du corps par un circuit de Thévenin</b> | <b>81</b> |
| 4.4.1      | Modélisation de l'impédance du corps par un circuit de Thévenin  | 82        |
| 4.4.1.1    | Modèle électrique de la tension $V_{th}$   | 82        |
| 4.4.1.2    | Modèle électrique de l'impédance $Z_{th}$  | 83        |
| 4.4.1.3    | Validation du circuit de Thévenin  | 85        |
| 4.4.2      | Etude des limites actuelles : lien entre les courants induits et les champs électriques externes                         | 86        |
| 4.4.3      | Conclusion   | 86        |
| <b>4.5</b> | <b>Evaluation du DAS corps entier et 10 g dans un fantôme homogène à partir des courants induits</b>                     | <b>87</b> |
| 4.5.1      | Présentation   | 87        |
| 4.5.2      | Relation entre les courants induits et le DAS  | 87        |
| 4.5.3      | Résultats et validation des formules   | 90        |
| 4.5.3.1    | Fantôme simplifié équivalent au fantôme homogène Duke  | 90        |
| 4.5.3.2    | Exposition à une onde plane  | 91        |

## CHAPITRE 4. LIEN ENTRE DIFFÉRENTES GRANDEURS DOSIMÉTRIQUES

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4.5.3.3    | Exposition à un champ haute impédance . . . . .      | 92        |
| 4.5.3.4    | En champ basse impédance . . . . .                   | 92        |
| 4.5.3.5    | Champ rayonné par une antenne sur véhicule . . . . . | 92        |
| <b>4.6</b> | <b>Conclusion</b> . . . . .                          | <b>93</b> |

---

## 4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons constaté qu'il y avait différentes grandeurs utilisées dans les normes servant à quantifier ou mesurer les effets sur l'être humain lors d'une exposition électromagnétique. Nous avons également étudié l'impact d'une exposition sur le corps du point de vue électromagnétique et thermique selon la modélisation du corps.

Ce chapitre s'intéresse au couplage entre le corps et le champ électromagnétique appliqué. Nous présentons en premier lieu un état de l'art sur la modélisation du corps par des systèmes rayonnants (antennes) ou électriques. Puis grâce à l'analyse de cet état de l'art, nous étudions les relations entre les champs électromagnétiques externes, les courants induits et les DAS corps entier et 10 g en caractérisant le comportement antennaire du corps humain.

Cela nous permettra de présenter dans le dernier chapitre (chapitre 5) des moyens d'évaluation du DAS à partir des valeurs de champ appliqué et/ou des valeurs de courant induit le long du corps.

Les simulations faites avec des fantômes sont réalisées avec le logiciel CST Microwave avec la méthode FIT. Les fantômes ont un maillage de la même dimension que la taille de leurs voxels (cf. section 2.2).

## 4.2 Etat de l'art sur la modélisation du corps humain par des antennes et des circuits électriques

### 4.2.1 Antenne équivalente à l'être humain

En 1995, Gandhi *et al* ont déposé un brevet [79] sur une antenne équivalente à l'être humain pour des mesures de courant externe. Cette antenne permet la mesure du courant induit externe sur le corps lors d'une exposition RF, car son impédance est proche de celle du corps pour la bande de fréquence 1 - 110 MHz. Entre 7 et 110 MHz, il y a une différence de  $\pm 10\%$  entre le courant de l'antenne équivalente et le courant mesuré sur la cheville d'un homme. Cette antenne équivalente est posée sur une base métallique et une antenne secondaire est placée à côté afin d'améliorer la réponse de l'antenne équivalente aux fréquences élevées. L'objectif de ce brevet est de proposer une antenne pouvant remplacer le corps humain (donc l'homme) lors de mesures de courant externe induit dans le corps afin de limiter les risques d'exposition RF sur l'être humain.

En 1996, King et Sandler [80] ont proposé des formules pour calculer le courant induit dans le corps ainsi que les champs en modélisant le corps par une antenne. Les formules proposées sont valables entre 50 Hz et 30 kHz. Les champs électriques et magnétiques générés par les courants circulant dans les lignes de transmission sont déterminés grâce aux caractéristiques physiques et électriques de la structure ainsi qu'à des mesures directes expérimentales. Les formules sont développées en supposant que le corps est une antenne cylindrique. De plus l'effet de peau est négligé pour ces fréquences et la longueur du corps est supposée électriquement petite, ce qui permet de dire que le courant total induit dans le corps n'est que réactif, qu'il ne dépend quasiment que de la longueur du corps et est indépendant des variations de tissus biologiques dans le corps. Cela permet de proposer une formule donnant le champ électrique axial moyen en tout point du corps et dans n'importe quel tissu en fonction du champ électrique externe.

En 1999, King [81] a proposé des formules pour le calcul du courant axial total, de la densité de courant et du champ électrique axial induits lors d'une exposition aux champs électromagnétiques d'une antenne verticale proche sur un bateau entre 1 et 30 MHz. Pour l'établissement de ces formules, le corps a été assimilé à une antenne monopôle cylindrique. L'être humain est supposé debout à côté d'une antenne verticale sur un sol métallique et les grandeurs sont calculées dans n'importe quelle section du corps. En raison du très grand nombre de types d'antennes présentes sur les bateaux, ces formules ne donnent pas des valeurs exactes mais des estimations.

King a également proposé en 2000 un modèle d'antenne cylindrique [82] pour modéliser le corps et calculer le courant ainsi que la densité de courant induits dans le corps pour des fréquences proches

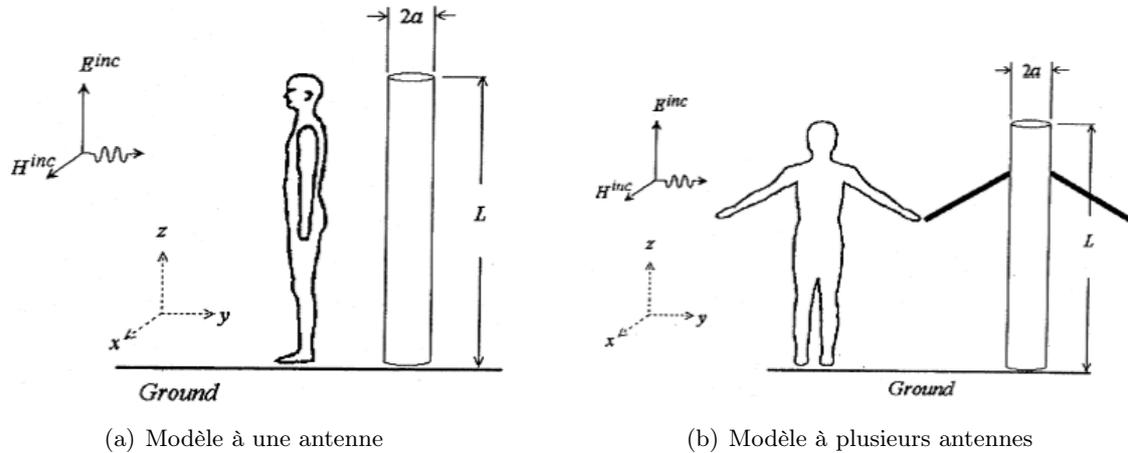


FIGURE 4.1 – Modèles d'antennes équivalentes à l'être humain [83]

de la résonance. Le corps est assimilé à une antenne monopôle « pas trop fine ». Cependant autour de la résonance (50 – 60 MHz) la distribution en courant est sinusoïdale, or un modèle elliptique (ou sphéroïde) est plus approprié pour modéliser cette répartition de courant sur le corps. Néanmoins les champs et la densité de courant ne sont pas calculables pour un modèle sphéroïde, de même que l'effet de peau qui ne peut pas être négligé dans cette bande de fréquence. C'est pourquoi King propose deux modèles d'antenne équivalente à l'être humain. La première est sphéroïde et permet de calculer le courant le long du corps. La seconde est cylindrique et permet de prendre en compte l'effet de peau et donc de calculer la densité de courant et le champ électrique induits dans le corps suite à une exposition RF autour de la fréquence de résonance (50 à 200 MHz).

En 2003, Poljak *et al* [83] ont utilisé l'approximation des antennes minces pour proposer un moyen de calcul du courant induit dans le corps via une antenne équivalente à l'être humain. La figure 4.1 représente les deux modèles d'antennes utilisés pour l'établissement des moyens de calcul. Grâce à ces antennes, le courant axial est connu et il est possible de calculer le champ électrique, la densité de puissance puis le DAS induit dans le corps entre 50 Hz et 110 MHz. Cependant l'objectif de cette étude était de comparer des résultats obtenus en domaine temporel avec plusieurs méthodes théoriques sachant que la modélisation de l'être humain par une antenne équivalente se fait en domaine fréquentiel.

En 2006, Bozzetti *et al* [84] ont proposé une modélisation du corps par une structure de plusieurs antennes connectées entre elles. Avant la fréquence de résonance, le corps est assimilé à une structure de plusieurs sphères de conducteurs parfaits connectées entre elles. Ces sphères ont des dimensions similaires à celles des différentes parties anatomiques du corps et la connexion se fait par des antennes non-perturbatrices. Les auteurs utilisent la méthode Diakoptics pour diviser la structure (l'ensemble des sphères) en plusieurs éléments résolus séparément puis rassemblés pour obtenir la solution exacte de toute la structure. Les courants sont calculés dans ces sphères puis regroupés en respectant la loi de Kirchhoff afin d'obtenir le courant parcourant tout le corps. Puis les densités de courant sont calculées en divisant les courants par les sections du corps. La figure 4.2 représente cette modélisation.

Après la fréquence de résonance, il n'est plus possible d'utiliser la méthode Diakoptics, le corps est alors assimilé à un ensemble d'antennes double-cônes non connectées entre elles et recouvertes d'un milieu biologique (figure 4.3). Le champ interne de chaque antenne est calculé grâce aux propriétés diélectriques du milieu biologique et au champ extérieur. Cela permet de calculer la tension dans chaque antenne ainsi que le courant et l'impédance. Grâce à cela, il est possible d'exprimer la puissance absorbée et donc d'évaluer le DAS local puisque la densité du milieu est connue.

La validation de ces deux structures est faite en comparant les DAS locaux obtenus par cette modélisation du corps humain et des résultats issus de la littérature.

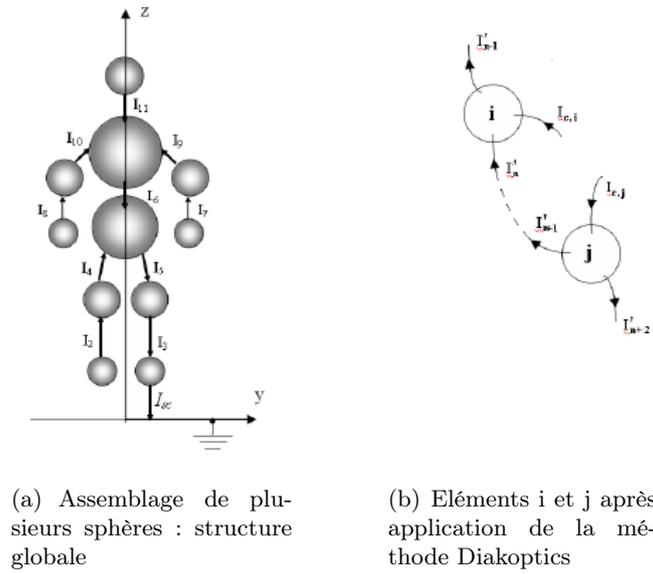


FIGURE 4.2 – Modélisation de l'être humain avant la résonance [84]

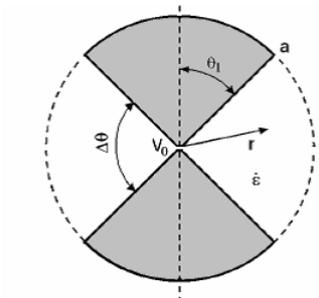


FIGURE 4.3 – Section d'une antenne double cône représentant une partie du corps humain [84]

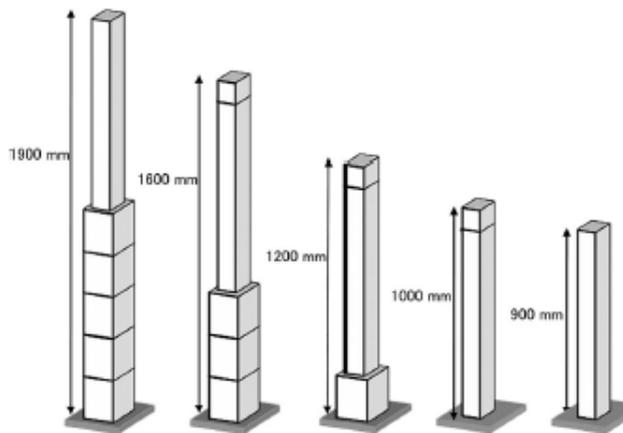


FIGURE 4.4 – Antenne équivalente à l'être humain contenant une solution de NaCl. De gauche à droite : antenne pour un adulte homme et femme, un enfant de 7 ans, 5 ans et 3 ans [85]

Deux équipes de chercheurs japonais [85] [86] ont proposé une antenne équivalente à l'être humain contenant un liquide équivalent. L'antenne est composée d'un élément rayonnant entouré d'une solution de NaCl (chlorure de sodium) possédant une conductivité proche de celle du muscle ( $\sigma_{NaCl} \sim \frac{2}{3}\sigma_{muscle}$ ) puis sa concentration est ajustée afin d'obtenir des courants externes induits égaux aux courants externes induits dans un fantôme homogène. Ces courants sont relevés aux chevilles du fantôme qui est placé sur un plan parfaitement conducteur. La hauteur de l'antenne varie afin de prendre en compte plusieurs tailles de fantômes et des éléments rayonnants peuvent être placés autour de l'antenne pour s'adapter à plusieurs morphologies. La figure 4.4 représente ces antennes équivalentes pour différentes morphologies. Cette antenne équivalente permet la mesure de courant induit dans la cheville entre 30 et 100 MHz. Elle a été validée pour une exposition en onde plane ainsi qu'une exposition à une antenne monopôle.

En 2010 Hirata *et al* [87] ont proposé une équation pour estimer le DAS corps entier ( $DAS_{CE}$ ) dans le corps pour une exposition de type onde plane à la fréquence de résonance. Des modèles sphéroïdes du corps (figure 4.5) sont utilisés pour exprimer le  $DAS_{CE}$ . Ces modèles peuvent varier pour s'adapter à différentes morphologies, notamment pour la variation de l'indice de masse corporelle (IMC) et du taux de graisse présente dans le corps. La longueur effective de l'antenne équivalente (sphéroïde) est calculée pour ensuite déterminer la tension induite dans l'antenne via le champ électrique ou la densité de puissance incidents. Cela permet d'exprimer la puissance absorbée ainsi que le  $DAS_{CE}$  en fonction des grandeurs incidentes (champ électrique et/ou densité de puissance). Les auteurs indiquent qu'en général le corps a un comportement dipolaire mais s'il est en contact avec un conducteur parfait, il se comporte comme un monopôle. Cependant ils ne proposent une formule de  $DAS_{CE}$  que pour le comportement dipolaire.

En 2015, Kibret *et al* ont publié deux études :

- l'une où ils appliquent la théorie des antennes cylindriques pour l'analyse du DAS corps entier [88] ;
- la seconde sur la caractérisation du corps humain par une antenne monopôle [89].

Pour la première étude, le DAS corps entier est analysé pour des expositions en champ lointain de 1 à 150 MHz et le corps est assimilé à une antenne cylindrique monopôle dont le schéma est donné en figure 4.6. Cet article définit les paramètres de l'antenne cylindrique (hauteur et rayon) permettant d'avoir des  $DAS_{CE}$  identiques entre le  $DAS_{CE}$  obtenu par la théorie des antennes et celui obtenu en simulation FDTD avec un fantôme de voxels. Les auteurs proposent donc une formule semi-analytique pour le  $DAS_{CE}$  utilisable pour des analyses dosimétriques qui prend en compte la morphologie et le rapport des volumes de graisse et de muscles des fantômes.

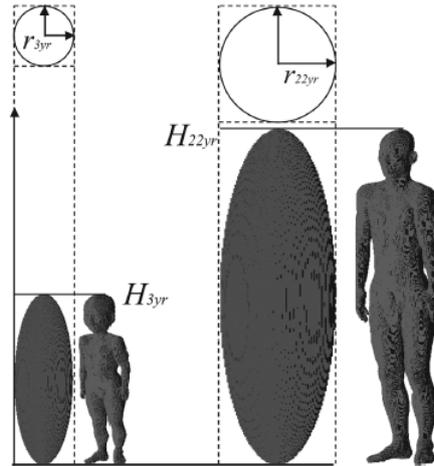


FIGURE 4.5 – Modélisation du corps par des sphéroïdes pour un homme adulte et un enfant de 3 ans [87]

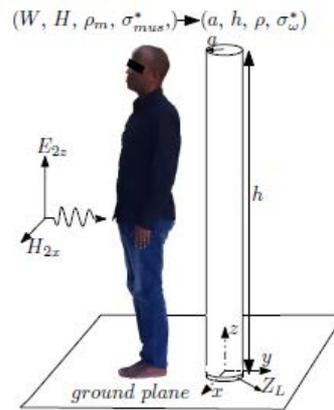


FIGURE 4.6 – Représentation d'une antenne cylindrique monopôle équivalente à l'être humain relié à la masse [88]

La seconde étude se limite à la bande de fréquence 10 – 110 MHz et comme la précédente assimile le corps à une antenne cylindrique monopôle. Les auteurs caractérisent l'antenne équivalente en donnant ses dimensions physiques, ses paramètres S, son impédance, son coefficient de réflexion ainsi que son efficacité grâce à des calculs d'antenne et des mesures expérimentales. Cependant l'article ne propose aucune formule de dosimétrie.

Le corps humain a plusieurs fois été modélisé par un système antennaire plus ou moins complexe permettant d'évaluer ou de mesurer les courants induits à la cheville. Ces systèmes antennaires permettent même dans certains cas d'évaluer des puissances absorbées ainsi que des  $DAS_{CE}$  et des  $DAS_{10g}$ . Il est important de noter que ce type de modélisation du corps est très utile dans ce chapitre pour calculer le courant induit le long du corps.

#### 4.2.2 Circuit équivalent à l'être humain

De Santis *et al* [90] ont proposé dans un article de 2011 un circuit modélisant le comportement électrique en impédance du corps humain en contact avec le sol, pour des fréquences entre 40 Hz et 110 MHz. Le circuit proposé a pour objectif de pouvoir évaluer les courant de contact dans le corps.

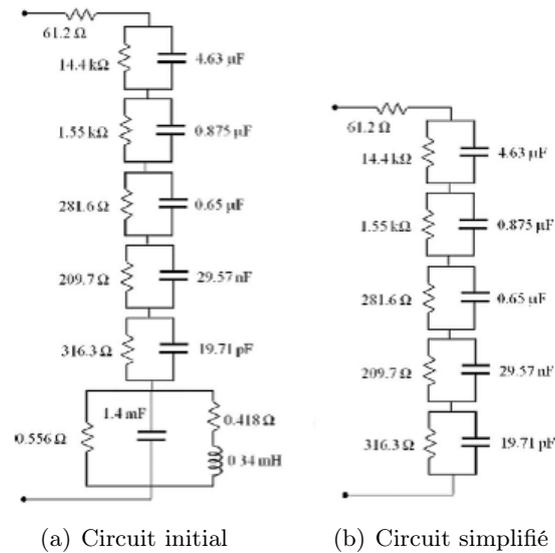


FIGURE 4.7 – Circuit équivalent au pire cas d’exposition aux courants de contact proposé par [90]

Les auteurs se sont donc placés dans un pire cas pour la conception de leur circuit équivalent (peau humide, pieds nus et contact de « prise ») qui donne la plus faible impédance possible du corps. Le circuit est présenté en figure 4.7. Pour la conception de ce circuit équivalent, des mesures d’impédance du corps ont été faites pour différents types de courant de contact, différents types d’exposition (avec ou sans chaussures, peau humide ou non) et différentes personnes (homme, femme, enfant).

En utilisant la modélisation du corps par une antenne cylindrique ainsi que les circuits proposés par De Santis [90], nous étudions dans ce chapitre le couplage entre le champ électrique appliqué et les courants induits dans le corps pour un fantôme hétérogène, ainsi que le couplage entre les courants induits et les DAS dans un fantôme homogène isolé.

## 4.3 Influence de l’impédance d’onde sur les courants induits et le DAS

### 4.3.1 Présentation de l’étude

Lors de mesures de champ électromagnétique et de calculs de DAS pour une étude d’intégration d’antennes sur des véhicules, Thales<sup>26</sup> a constaté qu’en HF, avec une antenne demi-boucle, les valeurs de champ magnétique H pouvaient dépasser les limites de 4 dB tout en ayant des valeurs de DAS conformes (16 dB en-dessous de la limite). Avec une antenne fouet (antenne électrique), les valeurs de champ électrique dépassaient la limite de seulement 1,5 dB alors que les valeurs de DAS, toujours conformes, étaient de 14 dB sous la limite. Donc les DAS étaient plus forts avec l’antenne électrique qu’avec l’antenne magnétique, bien que les niveaux de référence soient plus forts chez l’antenne magnétique. N’ayant trouvé aucune étude expliquant ce phénomène, nous étudions dans cette partie la relation entre les champs électrique et magnétique externes et le  $DAS_{CE}$  selon la posture d’une personne en bande HF, et plus particulièrement entre 1 et 10 MHz.

Pour cela, nous utilisons le fantôme Duke hétérogène ([3], Annexe B) exposé à des champs basse ou haute impédance théoriques puis réels. Le fantôme est placé dans deux postures : isolé et en boucle (figure 4.8). La boucle est formée par deux plaques de cuivre en contact avec les pieds du fantôme et avec un cylindre rempli de tissu *muscle*, représentant un bras car en contact avec le fantôme.

Grâce aux modélisations du corps par des circuits électriques, nous comparons et analysons les valeurs de  $DAS_{CE}$  et courant selon le champ appliqué, afin d’expliquer le phénomène observé.

26. Pour rappel, entreprise chez laquelle cette thèse CIFRE a été réalisée

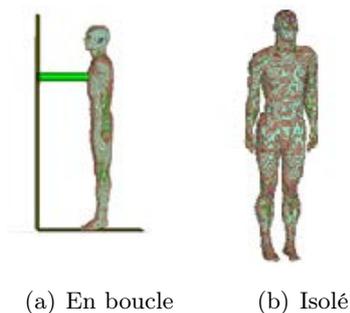


FIGURE 4.8 – Postures étudiées en champs basse et haute impédance

### 4.3.2 Modélisation du corps par des circuits électriques pour l'évaluation du courant induit selon la posture du corps

Les circuits électriques développés dans cette partie ont la même impédance que le corps humain et permettent de montrer de façon analytique que le courant induit dans un fantôme isolé dépend du champ électrique et que le courant induit dans un fantôme en boucle dépend du champ magnétique.

#### 4.3.2.1 Fantôme isolé équivalent à une antenne électrique

Entre 1 et 10 MHz, la conductivité moyenne  $\sigma$  des tissus composant le fantôme est du même ordre de grandeur que  $\omega\epsilon$  où  $\omega$  est la pulsation et  $\epsilon$  la permittivité moyenne des tissus (cf. Annexe B). Cela nous permet de supposer que le fantôme isolé est suffisamment conducteur pour le considérer équivalent à une antenne dipôle de hauteur  $h$  et de rayon  $r$  (figure 4.9) et d'exprimer le courant au milieu du fantôme par le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et la tension au milieu du fantôme par la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) de l'antenne dipôle.

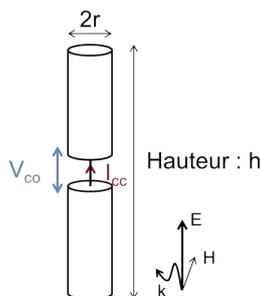


FIGURE 4.9 – Modélisation du fantôme isolé par une antenne électrique (dipôle épais)

En basse fréquence, ce dipôle équivaut à une capacité [91], dont l'expression est la suivante :

$$C_{BF} = \frac{h}{120 \ln(h/r) c} = 17,6 \text{ pF} \quad (4.1)$$

où

$$h = 1,7 \text{ m};$$

$$r = 0,1 \text{ m};$$

$c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

La tension du dipôle est liée au champ électrique externe ainsi qu'à sa hauteur effective. Pour des fréquences inférieures à sa fréquence de résonance (65 MHz), la hauteur effective est  $h/2$  et la tension

$V_{CO}$  s'exprime alors par :

$$V_{CO} = \frac{h}{2} E \quad (4.2)$$

où :

$h$  est la hauteur du dipôle (et du fantôme) ;

$E$  est le champ électrique appliqué.

Nous appliquons le théorème de Thévenin (figure 4.10) pour calculer le courant dans ce dipôle. L'impédance  $Z_{th}$  représente l'impédance de la capacité  $C_{BF}$ , et la charge représente l'impédance du corps. Dans l'article de De Santis [90], nous constatons qu'entre 1 et 10 MHz, l'impédance du corps est d'environ 400  $\Omega$  (figure 9 de l'article [90]), alors que l'impédance de la capacité  $C_{BF}$  est comprise entre 1000 et 10000  $\Omega$ . C'est pourquoi, nous considérons l'impédance du corps négligeable devant celle de la capacité et choisissons un court-circuit pour la charge.

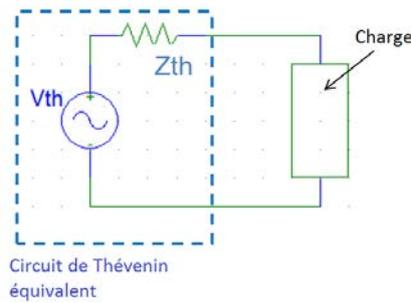


FIGURE 4.10 – Circuit de Thévenin permettant de calculer le courant dans le dipôle pour un fantôme isolé

Grâce aux équations 4.1 et 4.2, il est possible d'exprimer le courant de court-circuit  $I_{CC}$  de l'antenne :

$$I_{CC} = \frac{V_{CO}}{Z_{antenne}} = V_{CO} C_{BF} 2\pi f = hE\pi f \frac{h}{120 \ln(h/r) c} \quad (4.3)$$

Ce courant est le courant maximal dans le fantôme ou le dipôle correspondant au courant à mi-hauteur  $h/2$ .

#### 4.3.2.2 Fantôme en boucle équivalent à une antenne magnétique

Le fantôme en boucle (figure 4.8a) est supposé équivalent à une boucle de courant quasi-ouverte, car la conductivité du fantôme est très faible par rapport à celle des plaques  $\sigma_{fantome} \ll \sigma_{cuivre}$  (figure 4.11). Sa tension  $V_{CO}$  peut donc être calculée par la loi de Lenz.

La loi de Lenz appliquée au fantôme boucle nous donne :

$$V_{CO} = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| -\frac{d \int_S B dS}{dt} \right| = \left| -\int_S \frac{dB}{dt} dS \right| = \left| j\omega \int_S B dS \right| = \omega \int_S B dS = \mu_0 H 2\pi f h l \quad (4.4)$$

où :

$h$  est la hauteur du fantôme boucle ;

$H$  est le champ magnétique ;

$l$  est la longueur du fantôme boucle.

Comme précédemment, nous comparons l'impédance du corps à celle de l'antenne équivalente. Avec les données de De Santis [90], nous savons que l'impédance du corps est d'environ 400  $\Omega$  entre 1 et 10 MHz, alors que l'impédance de l'antenne boucle est inférieure à 100  $\Omega$  (inductance de la boucle calculée d'après [92]). C'est pourquoi, dans l'application du théorème de Thévenin (figure 4.10) nous considérons que l'impédance  $Z_{th}$  est négligeable devant celle du corps et donc que  $Z_{th} + Z_{charge} \approx Z_{charge} = Z_{corps}$ .

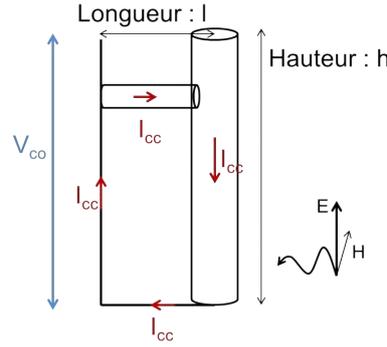
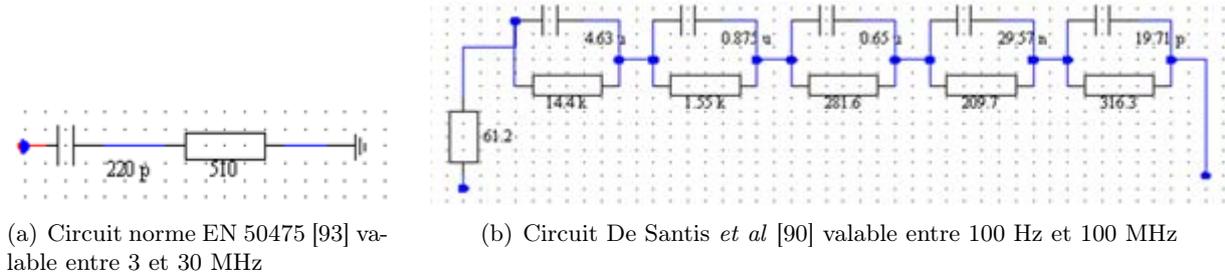


FIGURE 4.11 – Modélisation du fantôme en boucle par une antenne magnétique

Dans un premier temps,  $Z_{corps}$  sera égale à l'impédance du circuit d'impédance équivalente au corps donné par la norme EN 50475 [93] (figure 4.12a). Dans un second temps,  $Z_{corps}$  sera égale à l'impédance du circuit d'impédance équivalente au corps proposé par De Santis *et al* [90] (figure 4.12b).



(a) Circuit norme EN 50475 [93] valable entre 3 et 30 MHz

 (b) Circuit De Santis *et al* [90] valable entre 100 Hz et 100 MHz

FIGURE 4.12 – Schéma de circuit d'impédance équivalente à l'être humain

L'impédance du circuit de la norme EN 50475  $Z_{EN50475}$  (figure 4.12a) est donnée par l'équation 4.5 et celle du circuit de De Santis *et al*,  $Z_{Santis}$  (figure 4.12b) par l'équation 4.6 :

$$Z_{EN50475} = R + \frac{1}{jC\omega} = 510 + \frac{1}{j 220 \cdot 10^{-12} \omega} \quad (4.5)$$

$$Z_{Santis} = 612 + \frac{14,4 \cdot 10^3}{1 + j 0,0667 \omega} + \frac{1,55 \cdot 10^3}{1 + j 0,00136 \omega} + \frac{281,6}{1 + j 1,83 \cdot 10^{-4} \omega} + \frac{209,7}{1 + j 6,20 \cdot 10^{-6} \omega} + \frac{316,3}{1 + j 6,23 \cdot 10^{-9} \omega} \quad (4.6)$$

Le courant induit dans le fantôme en boucle s'écrit alors :

$$I_{boucle} = \frac{V_{CO}}{Z_{corps}} = \frac{\mu_0 H 2\pi f h l}{Z_{corps}} \quad (4.7)$$

où  $Z_{corps}$  est l'impédance du corps humain et vaut  $Z_{EN50475}$  ou  $Z_{Santis}$ .

Le courant induit dépend donc soit du champ électrique E, soit du champ magnétique H selon la posture. Ces courants calculés par les équations 4.3 et 4.7 sont par la suite comparés aux courants induits calculés en simulation pour les mêmes fantômes en exposition champ haute et basse impédance.

### 4.3.3 Résultats

#### 4.3.3.1 Exposition théorique en champ haute impédance

Le champ haute impédance ( $E/H \gg 377 \Omega$ ) est modélisé par deux plaques conductrices parallèles de type condensateur électrique alimentées sur le côté par une source de tension (figure 4.13a). A 1 MHz,

l'impédance d'onde est supérieure à  $4000 \Omega$ , le champ électrique est de  $5,5 \text{ V/m}$  et le champ magnétique de  $1,2 \text{ mA/m}$ . Le fantôme est soit isolé, soit en boucle, et nous avons vérifié que la présence du fantôme ne perturbe pas l'impédance générée par les plaques.

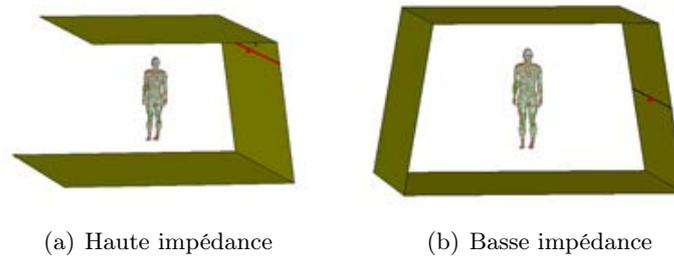


FIGURE 4.13 – Modélisation des expositions haute impédance et basse impédance pour un fantôme isolé

Nous constatons que les valeurs de courant induit calculées en simulation et par les équations 4.3 et 4.7 sont plus élevées dans le cas du fantôme isolé que du fantôme en boucle (figure 4.14a). De plus les courants induits calculés par l'équation 4.3 sont légèrement supérieurs aux courants induits calculés en simulation pour le fantôme isolé, alors que les courants induits calculés par l'équation 4.7 sont inférieurs à ceux calculés en simulation. Nous constatons que le circuit proposé par De Santis *et al* nous permet d'obtenir des courants induits plus proches de la simulation que les courants induits calculés par le circuit de la norme EN 50475.

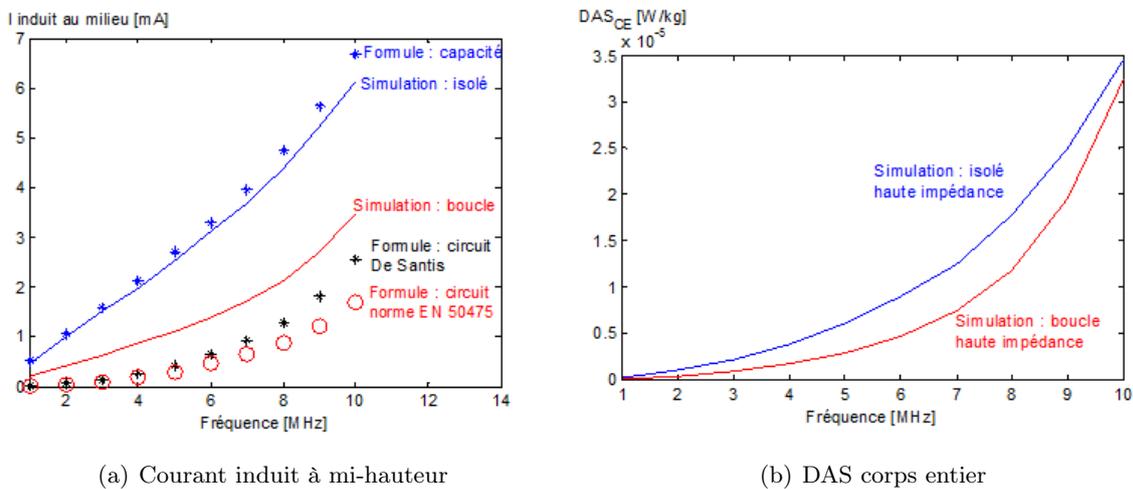


FIGURE 4.14 – Comparaison des courants induits et  $DAS_{CE}$  dans les fantômes isolé et en boucle pour un champ haute impédance

Bien qu'elles n'aient pas vocation à remplacer la simulation, les formules proposées (équations 4.3 et 4.7) donnent de bonnes estimations des valeurs et des variations des courants induits dans les deux fantômes. Cela nous montre que les courants induits dans un fantôme isolé dépendent principalement des valeurs de champ électrique et que les courants induits dans un fantôme en boucle dépendent principalement des valeurs de champ magnétique. Nous notons également que les valeurs de  $DAS_{CE}$  sont plus élevées pour le fantôme isolé que pour le fantôme en boucle (figure 4.14b).

### 4.3.3.2 Exposition théorique en champ basse impédance

Le champ basse impédance ( $E/H \ll 377 \Omega$ ) est modélisé par quatre plaques conductrices formant une boucle de courant alimentée sur le côté par une source de tension (figure 4.13b). Cette structure est similaire à une large spire magnétique ou inductance. A 1 MHz, l'impédance d'onde est de  $27 \Omega$ , le champ électrique de  $1,24 \text{ V/m}$  et le champ magnétique de  $46 \text{ mA/m}$ . Le fantôme est soit isolé, soit en boucle et comme pour le champ haute impédance, il a été vérifié que la présence du fantôme ne perturbe pas le champ.

Nous constatons que pour des fréquences inférieures à 6 MHz, c'est le fantôme en boucle qui présente les valeurs de courants calculées en simulation les plus élevées (figure 4.15a). En ne prenant en compte que les courants issus du circuit de De Santis *et al* et des équations 4.3 et 4.7, les courants du fantôme boucle sont supérieurs à ceux du fantôme isolé mais seulement jusqu'à 5 MHz.

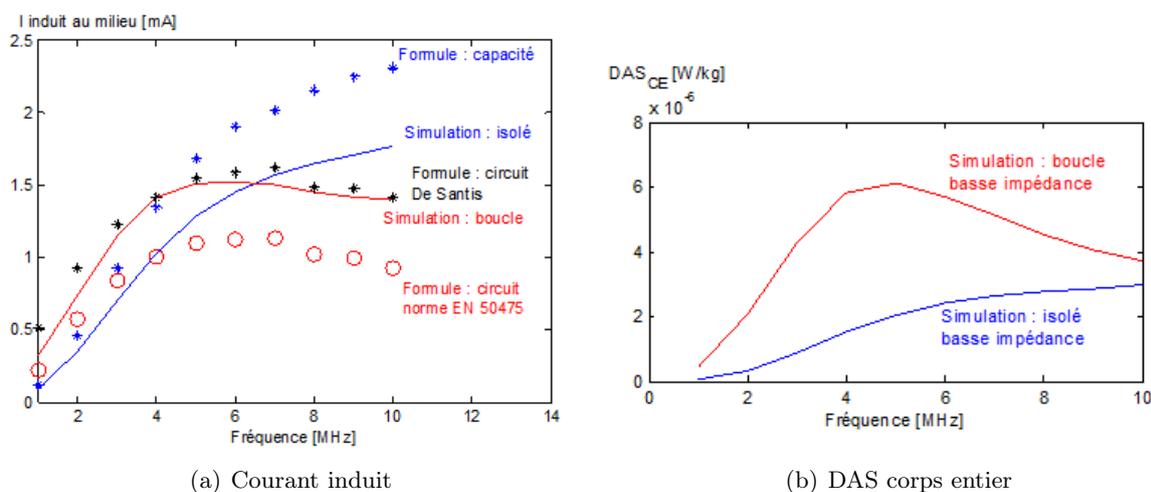


FIGURE 4.15 – Comparaison des courants induits et  $DAS_{CE}$  dans les fantômes isolé et en boucle pour un champ basse impédance

Les courants induits calculés par l'équation 4.3 pour le fantôme isolé sont proches des courants induits calculés en simulation et suivent les mêmes variations. Les courants induits calculés pour le fantôme en boucle par l'équation 4.7 et le circuit équivalent de la norme EN 50475 donnent des valeurs proches des courants induits calculés en simulation. Cependant, les courants induits calculés par l'équation 4.7 et le circuit proposé par De Santis *et al* se superposent aux courants induits calculés en simulation.

Comme dans l'exposition en champ haute impédance, les courants induits calculés par les équations 4.3 et 4.7 donnent des valeurs et des variations de courants induits très proches de ceux calculés en simulation.

Nos résultats montrent que les courants induits dans un fantôme isolé dépendent principalement de la partie électrique du champ appliqué et que les courants induits dans un fantôme en boucle dépendent principalement de la partie magnétique du champ appliqué au fantôme.

Nous constatons également que les valeurs de  $DAS_{CE}$  sont plus élevées dans le fantôme en boucle que dans le fantôme isolé pour cette exposition (figure 4.15b). Grâce aux relations établies dans [94] et développées dans 4.5, nous pouvons donc en conclure que le  $DAS_{CE}$  d'un fantôme isolé dépend de la partie électrique du champ électromagnétique appliqué alors que le  $DAS_{CE}$  d'un fantôme en boucle dépend de la partie magnétique du champ appliqué.

### 4.3.3.3 Exposition réaliste : champ rayonné par une antenne placée sur le toit d'un véhicule

Cette dernière exposition représente un cas réaliste, car le fantôme est isolé et placé à 20 cm d'un véhicule muni d'une antenne (figure 4.16). Il est d'abord exposé au champ rayonné par une antenne électrique (antenne fouet de 1 m, figure 4.16a) puis au champ rayonné par une antenne magnétique (antenne demi-boucle, figure 4.16b). La puissance fournie à ces deux antennes est de 0,5 W. Entre 1 et 10 MHz, l'antenne fouet produit majoritairement du champ électrique (car impédance  $> 377 \Omega$ ) et l'antenne demi-boucle majoritairement du champ magnétique (car impédance  $< 377 \Omega$ ).

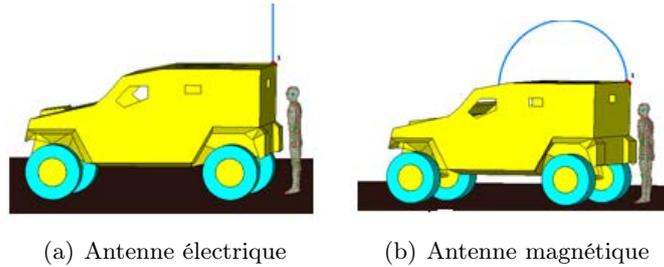


FIGURE 4.16 – Modélisation d'une exposition réaliste : champ rayonné par une antenne placée sur le toit d'un véhicule

Nous constatons que pour le fantôme isolé, les valeurs de courant induit à mi-hauteur sont plus élevées en présence de l'antenne électrique (figure 4.17), ce qui est en accord avec les résultats précédents. En effet le fantôme isolé est supposé sensible au champ électrique et c'est bien en présence de l'antenne électrique qu'il présente les valeurs de courant induit les plus élevées.

Nous constatons également que les valeurs de  $DAS_{CE}$  dans le fantôme isolé sont plus élevées en présence de l'antenne fouet (figure 4.17).

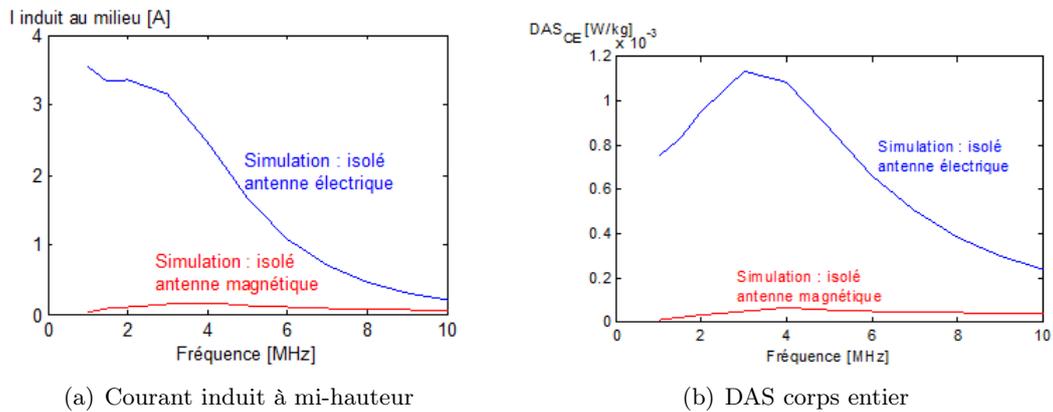


FIGURE 4.17 – Courant induit et  $DAS_{CE}$  dans un fantôme isolé à proximité d'une antenne électrique ou magnétique placée sur le toit d'un véhicule

### 4.3.4 Conclusion

Nous avons montré dans cette partie que la posture du fantôme (donc du corps) influe sur l'absorption du corps. Quelle que soit l'impédance d'onde (donc le type d'antenne), une personne isolée sera sensible à la partie électrique du champ électromagnétique appliqué, donc les courants induits dans cette personne dépendront du champ électrique. Tandis qu'une personne en contact avec des surfaces métalliques et créant ainsi une boucle de courant sera sensible à la partie magnétique du champ.

Ces constatations nous permettent de comprendre les valeurs de champs mesurées et les calculs de DAS présentés au début de cette section (section 4.3.1) et de définir les pires cas d'exposition sur les personnes selon le type d'exposition (électrique ou magnétique).

#### 4.4 Influence du champ électrique externe sur les courants induits : Modélisation du corps par un circuit de Thévenin

Dans la quasi-totalité des cas d'exposition électromagnétique, des personnes sont en configuration isolée, nous nous concentrons donc dans cette partie sur la modélisation d'une personne isolée.

Cette modélisation, qui permet d'approximer l'impédance du corps, se veut plus précise que celle proposée dans la section 4.3.2.1, car elle est valable sur une plus grande bande de fréquence et permet de calculer les courants induits à mi-hauteur et le long du corps du fantôme.

Pour cela, nous considérons le corps suffisamment conducteur (car  $\sigma > \omega\epsilon_0\epsilon_r$  dans la bande de fréquence considérée) pour être équivalent à un dipôle épais entre 1 et 90 MHz. Nous utilisons un dipôle épais à cause des dimensions du fantôme, car la hauteur du fantôme Duke (1,75 m) est du même ordre de grandeur que son rayon moyen (0,12 m). Le couplage entre l'antenne et le champ électrique est modélisé par un circuit de Thévenin équivalent, composé d'une source de tension  $V_{th}$  et d'une impédance  $Z_{th}$  (figure 4.18).

Afin de valider le circuit de Thévenin (proposé dans la section suivante 4.4.1), nous utilisons le fantôme Duke [3] hétérogène et homogénéisé par le tissu homogène dont les propriétés sont rappelées en figure 4.19. La tension et l'impédance de Thévenin (tension de circuit ouvert et courant de court-circuit) dans le fantôme Duke sont calculées par simulation, en coupant le fantôme Duke en deux parties et en reliant ces deux parties par un fil avec une charge de  $1000 \Omega$  ou de  $0,01 \Omega$ .

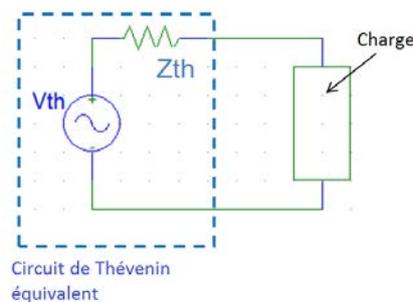


FIGURE 4.18 – Circuit de Thévenin équivalent modélisant la tension et l'impédance à mi-hauteur du fantôme homogène Duke

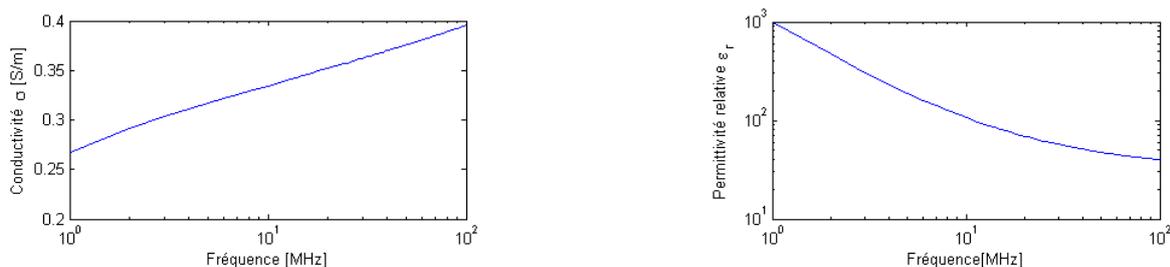


FIGURE 4.19 – Propriétés diélectriques du tissu équivalent servant à homogénéiser les fantômes entre 1 et 100 MHz

#### 4.4.1 Modélisation de l'impédance du corps par un circuit de Thévenin

Le circuit de Thévenin proposé modélise l'impédance du corps pour une exposition en onde plane polarisée verticalement entre 1 et 90 MHz en espace libre. Ce circuit, composé d'une tension  $V_{th}$  et d'une impédance  $Z_{th}$ , prend en compte la tension à mi-hauteur du fantôme équivalente au couplage avec le champ externe et l'impédance d'antenne du corps. La charge représentée en figure 4.18 représente un court-circuit.

##### 4.4.1.1 Modèle électrique de la tension $V_{th}$

La tension à mi-hauteur dans le dipôle dépend de sa hauteur effective qu'il faut donc déterminer. Celle-ci dépend des paramètres physiques du dipôle (donc du fantôme) ainsi que de la fréquence d'exposition :

- Pour des fréquences inférieures à la fréquence de résonance du fantôme ( $f < 65$  MHz), la hauteur effective est  $H/2$  où  $H$  est la hauteur du fantôme et du dipôle. La tension  $V_{th}$  avant la résonance est définie par

$$V_{th} = \frac{H}{2} E_{ext} \quad (4.8)$$

- A la résonance, la hauteur effective est supposée égale à  $\lambda/2$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde dans le vide. La tension  $V_{th}$  à la résonance est définie par

$$V_{th} = \frac{\lambda}{2} E_{ext} \quad (4.9)$$

- Entre 65 MHz et 200 MHz, nous supposons que la hauteur effective diminue avec une pente de -40 dB par décade. La tension dans le dipôle peut donc être décrite par un filtre passe-bas du second ordre, dont l'expression est la suivante :

$$V_{th} = \frac{E_{ext}}{1 + 2jm \frac{\omega}{\omega_0} - (\frac{\omega}{\omega_0})^2} = \frac{E_{ext}}{1 + jR_1C_1\omega - L_1C_1\omega^2} \quad (4.10)$$

où :

$E_{ext}$  est le champ électrique externe en RMS (V/m) ;

$\omega = 2\pi f$  est la pulsation (rad/s) ;

$\omega_0$  est la pulsation à la résonance (rad/s) ;

$m$  est le facteur d'amortissement ;

$R_1, C_1, L_1$  sont respectivement la résistance, la capacité et l'inductance représentant les composants formant le modèle électrique de la tension  $V_{th}$ .

Comme le dipôle est épais, un facteur correctif de 0,74 est introduit pour prendre en compte l'épaisseur du dipôle [95]. La tension à mi-hauteur du fantôme s'exprime donc par :

$$V_{th} = \frac{0,74 E_{ext}}{1 + jR_1C_1\omega - L_1C_1\omega^2} \quad (4.11)$$

Après avoir simulé la tension de Thévenin équivalente de Duke entre 1 et 300 MHz (figure 4.20), nous relevons la tension dans le fantôme à la résonance pour calculer le facteur d'amortissement  $m$ . Cela nous permet d'écrire que :

$$V_{th}(\omega = \omega_0) = \frac{0,74 E_{ext}}{2m} \Rightarrow m = 0,35 \quad (4.12)$$

La résistance  $R_1$  est choisie telle que  $R_1 = 100 \Omega$ . Comme la fréquence de résonance apparaît pour  $H \sim \frac{\lambda}{2}$ , les valeurs de  $L_1$  et  $C_1$  sont déduites des deux équations suivantes :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} \quad (4.13)$$

#### 4.4. INFLUENCE DU CHAMP ÉLECTRIQUE EXTERNE SUR LES COURANTS INDUITS : MODÉLISATION DU CORPS PAR UN CIRCUIT DE THÉVENIN

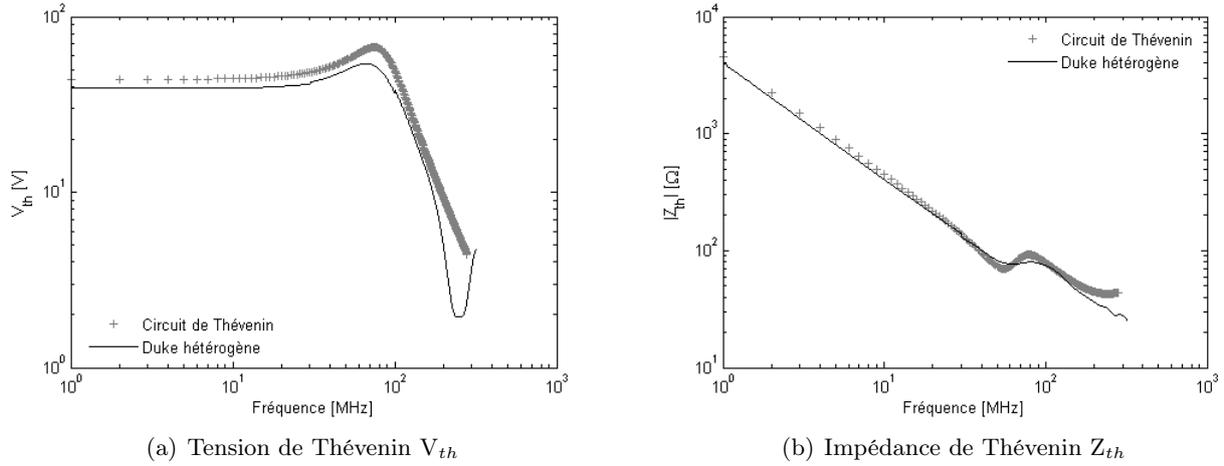


FIGURE 4.20 – Caractéristiques du fantôme hétérogène Duke et du circuit de Thévenin équivalent

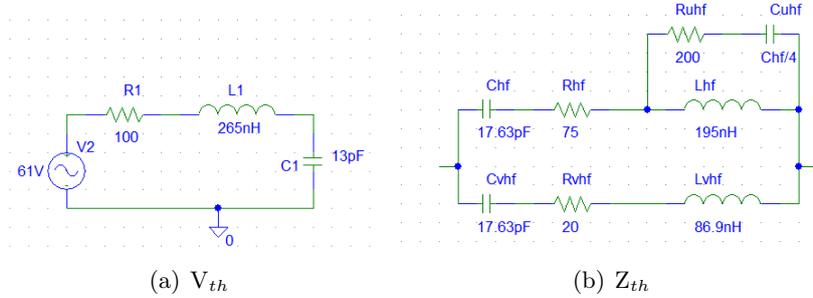


FIGURE 4.21 – Modèle électrique des composants  $V_{th}$  et  $Z_{th}$  du circuit de Thévenin équivalent

$$m = \frac{R_1 \sqrt{C_1}}{2\sqrt{L_1}} \quad (4.14)$$

Le modèle électrique de  $V_{th}$  est décrit en figure 4.21a où  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $L_1 = 265 \text{ nH}$ ,  $C_1 = 13 \text{ pF}$  et  $V_2$  est le champ électrique externe  $E_{ext}$  de l'onde plane.

##### 4.4.1.2 Modèle électrique de l'impédance $Z_{th}$

Afin de déterminer le modèle électrique de l'impédance de Thévenin (équivalente à l'impédance d'antenne du corps humain), l'impédance de Thévenin du fantôme Duke a été simulée entre 1 et 300 MHz (figure 4.20b).

- Avant la résonance, en se basant sur la théorie des lignes de transmission et des dipôles épais [91], nous savons que l'on peut modéliser l'impédance par une capacité dont la formule est :

$$C = \frac{H}{120 c \ln(H/r)} \quad (4.15)$$

où  $H$  est la hauteur de Duke,  $r$  son rayon moyen et  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide

- A la résonance ( $H \sim \lambda/2$ ), on doit introduire une inductance  $L$  pour créer cette résonance. Connaissant  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , on peut calculer  $L$  dont la formule est :

$$L = \frac{120 H \ln(H/r)}{\pi^2 c} \quad (4.16)$$

Le problème de ce circuit RC série est qu'à la résonance, son impédance est plus faible que celle du fantôme, on rajoute donc une résistance  $R$  en série de  $75 \Omega$  pour avoir la même impédance à la résonance que le fantôme hétérogène Duke.

- Pour les fréquences supérieures à la résonance, nous rajoutons des composants au circuit RLC série précédent pour s'approcher de l'impédance du fantôme. En fréquences VHF supérieures à la fréquence de résonance, nous ajoutons un circuit RLC en parallèle du circuit précédent et pour des fréquences UHF, nous ajoutons un circuit RC en parallèle de l'inductance du circuit basses fréquences (fréquences inférieures à la résonance).

Le modèle électrique de l'impédance d'antenne  $Z_{th}$  est présenté en figure 4.21b et les valeurs des différents composants sont les suivantes :

Pour des fréquences inférieures à la résonance  $f < f_{resonance}$  :

$$C_{hf} = \frac{H}{120 c \ln(H/r)} = 17,64 \text{ pF} \quad (4.17)$$

$$R_{hf} = 75 \Omega \quad (4.18)$$

$$L_{hf} = \frac{(2H)^2}{C_{hf} (2\pi c)^2} = 196 \text{ nH} \quad (4.19)$$

Mais pour mieux s'approcher des valeurs d'impédance du fantôme, on prend  $L_{hf} = 288 \text{ nH}$ .

Pour des fréquences proches de la résonance  $f \sim f_{resonance}$  :

$$C_{vhf} = C_{hf} \quad (4.20)$$

$$R_{vhf} = 50 \Omega \quad (4.21)$$

$$L_{vhf} = \frac{4}{9} L_{hf} = 86,9 \text{ nH} \quad (4.22)$$

Pour des fréquences supérieures à la résonance  $f > f_{resonance}$  :

$$C_{uhf} = \frac{C_{hf}}{2} = 8,8 \text{ pF} \quad (4.23)$$

$$R_{uhf} = 200 \Omega \quad (4.24)$$

où :

- H est la hauteur du fantôme Duke ;
- r est le rayon moyen du fantôme ;
- c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Les composants  $C_{hf}$ ,  $R_{hf}$  et  $L_{hf}$  sont utilisés pour les fréquences inférieures à la résonance ;  $C_{vhf}$ ,  $R_{vhf}$  et  $L_{vhf}$  sont utilisés à la résonance et  $C_{uhf}$  et  $R_{uhf}$  représentent l'impédance au-dessus de la résonance.

L'impédance  $Z_{th}$  du circuit de Thévenin est présentée en figure 4.20b et est comparée à celle du fantôme Duke hétérogène. Les résultats de  $V_{th}$  et  $Z_{th}$  calculés avec le circuit de Thévenin proposé sont en adéquation avec ceux calculés sur le fantôme Duke hétérogène, ce qui permet de valider les deux modèles électriques représentant  $V_{th}$  et  $Z_{th}$ . Le courant induit à mi-hauteur dans le dipôle épais (et dans le fantôme) est donc calculé par le rapport  $\frac{V_{th}}{Z_{th}}$ , qui est le courant de court-circuit de Thévenin.

Dans [96], les auteurs ont étudié les courants induits dans le corps humain pour une exposition en onde plane entre 20 et 100 MHz pour un corps en contact avec le sol par les pieds et un corps isolé du sol (cas correspondant à notre étude). Dans le cas isolé, le courant induit a une répartition sinusoïdale le long du corps.

Dans [82], King a développé des formules analytiques pour calculer le courant électrique ainsi que le champ électrique dans le corps en utilisant un modèle cylindrique. Grâce à celles-ci, nous constatons

que les courants induits autour de la résonance ont également une variation sinusoïdale le long du corps. Nous supposons donc pour la suite que le courant induit le long du corps isolé en espace libre entre 1 et 100 MHz a une variation sinusoïdale et s'exprime par l'équation suivante :

$$I(z) = I_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} z + 0,26\right) \quad (4.25)$$

où :

- $I_{max}$  est le courant induit à mi-hauteur dans le fantôme (A), calculé par le circuit de Thévenin ;
- $z$  est la coordonnée le long du fantôme (m) ;
- 0,26 est un facteur correctif, car le corps n'est pas une antenne parfaite, donc le courant induit est non-nul aux extrémités. Ce facteur est déterminé grâce au courant induit calculé en simulation.

#### 4.4.1.3 Validation du circuit de Thévenin

Pour valider le circuit de Thévenin équivalent, les courants induits dans le fantôme Duke hétérogène ou homogène sont comparés à ceux du circuit lors d'une exposition en onde plane polarisée verticalement à 61 V/m entre 1 et 100 MHz. Nous constatons que les courants induits à mi-hauteur dans le fantôme Duke hétérogène et homogène sont quasi-identiques, légèrement plus élevés pour l'hétérogène avec une différence maximale de 3 dB (figure 4.22).

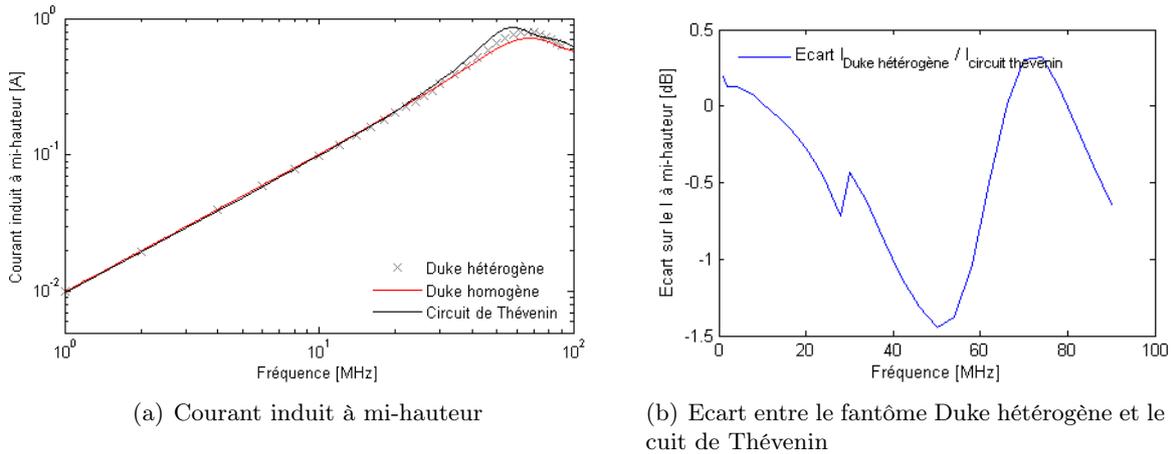


FIGURE 4.22 – Courant induit à mi-hauteur dans le fantôme Duke hétérogène ou homogène et dans le circuit de Thévenin équivalent entre 1 et 100 MHz

Les courants induits le long du corps entre les deux fantômes sont quasi identiques, car la différence maximale est inférieure à 1 dB (figure 4.23). Cela justifie notre choix d'utiliser une antenne homogène pour représenter les courants induits dans un fantôme hétérogène puisque les différences entre un hétérogène et un homogène sont très faibles.

Les courants induits à mi-hauteur calculés par le circuit de Thévenin sont proches de ceux du fantôme Duke : écart maximal de 1,5 dB (figure 4.22). De plus les courants le long du corps du fantôme calculés en simulation et avec l'équation 4.25 sont quasi-identiques : différence maximale de 1,5 dB entre les pieds et le torse (figure 4.23). Nous observons une différence s'élevant jusqu'à 8 dB mais elle intervient pour des courants induits au-dessus du torse, or dans les normes, les courants induits sont mesurés au niveau des extrémités (pieds et chevilles), donc nous ne tenons pas compte de cela. Nous pouvons donc considérer notre modèle (modèle électrique des éléments du circuit de Thévenin et distribution sinusoïdale des courants le long du corps) valide et particulièrement approprié pour évaluer les courants induits le long d'un fantôme (entre les pieds et le torse) en exposition en onde plane entre 1 et 90 MHz. Notre modèle nous permet alors d'exprimer les courants induits comme une

fonction du champ électrique externe, et d'étudier ainsi la relation entre les limites en champ électrique externe et celles en courant induit entre 1 et 90 MHz proposées par les normes.

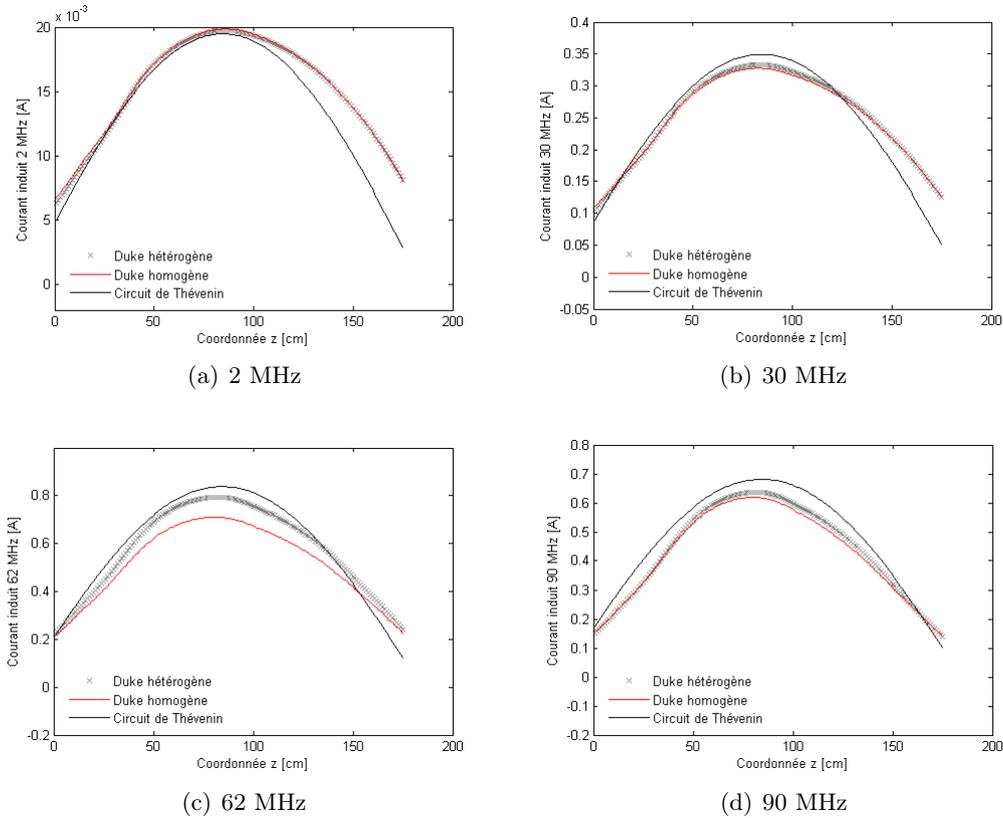


FIGURE 4.23 – Distribution du courant induit le long du corps : courants calculés sur le fantôme homogène et hétérogène Duke par l'équation 4.25, et par le circuit de Thévenin équivalent au corps

#### 4.4.2 Etude des limites actuelles : lien entre les courants induits et les champs électriques externes

Les limites en courant induit sont définies pour des courants induits à travers les pieds donc nous considérons que ces courants peuvent être mesurés à la cheville ( $z = 10$  cm). Entre 1 et 90 MHz, nous rappelons que pour un environnement contrôlé (ou travailleurs), la limite à travers un pied est de 100 mA.

Grâce au modèle développé (circuit et répartition), nous pouvons tracer le courant induit en fonction du champ  $E$  externe (figure 4.24) :

- Pour respecter la limite actuelle en champ à 10 MHz (184 V/m [6]), le courant induit dans le pied doit être inférieur à 80 mA ;
- Entre 30 et 90 MHz, la limite en  $E$  externe étant de 61 V/m [6] [7], le courant induit doit être inférieur à 95 mA à 30 MHz et inférieur à 180 mA aux autres fréquences pour respecter cette limite de champ.

Les limites actuelles en courant induit sont donc plus restrictives que celles en champ électrique externe pour des fréquences supérieures à 40 MHz en exposition onde plane.

#### 4.4.3 Conclusion

Nous avons pu modéliser l'impédance du corps humain par un circuit de Thévenin équivalent pour une exposition en onde plane polarisée verticalement entre 1 et 90 MHz. Ce circuit permet ainsi

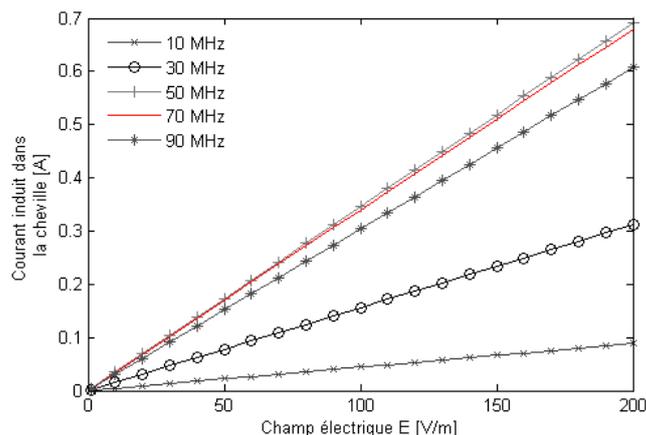


FIGURE 4.24 – Courant induit dans la cheville en fonction du champ électrique externe à 10 MHz, 30 MHz, 50 MHz, 70 MHz et 90 MHz

d'évaluer le courant induit à mi-hauteur dans un fantôme hétérogène. De par sa variation sinusoïdale le long du corps, nous avons également pu calculer les courants induits dans la cheville d'un fantôme hétérogène et homogène.

Grâce à cela, les courants induits ont été évalués en fonction du champ électrique appliqué et ainsi nous avons constaté que les limites en courant pouvaient être plus restrictives que celles en champ électrique et inversement selon la fréquence. Ces constatations pourraient alors être utilisées pour mettre à jour les niveaux de référence indiqués dans l'IEEE [6] et l'ICNIRP [7].

## 4.5 Evaluation du DAS corps entier et 10 g dans un fantôme homogène à partir des courants induits

### 4.5.1 Présentation

Les parties précédentes ont montré que les courants et les DAS dépendent de la partie électrique du champ appliqué si la personne est isolée. Il est également possible de calculer les courants induits dans le corps selon le champ électrique appliqué en modélisant le corps par un circuit de Thévenin équivalent. Dans cette dernière partie, nous proposons donc d'évaluer le DAS corps entier et le DAS 10 g max dans un fantôme homogène à partir des valeurs de courant induits le long du corps. Nous développons donc des formules analytiques liant les courants et les DAS ainsi qu'un fantôme simplifié équivalent à la morphologie de Duke [3] pour l'application de ces formules.

### 4.5.2 Relation entre les courants induits et le DAS

La source électromagnétique est considérée uniforme selon l'angle d'incidence, cela permet d'avoir une densité de courant invariante selon  $\theta$  en se plaçant en coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$  (système de coordonnées visible en figure 4.25). La densité de charges électriques dans le fantôme est considérée nulle ; les équations de Maxwell s'écrivent alors :

$$\vec{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.26)$$

$$\vec{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.27)$$

$$div \vec{E} = 0 \quad (4.28)$$

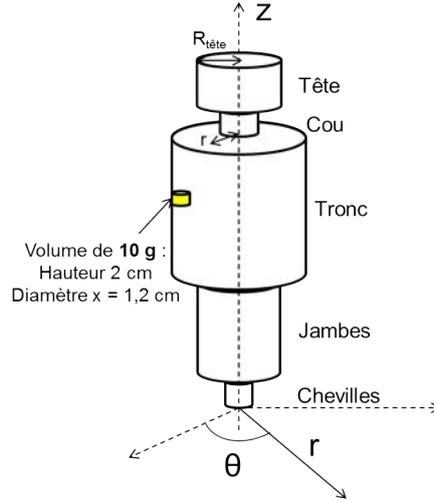


FIGURE 4.25 – Fantôme simplifié de morphologie équivalente à celle du fantôme Duke

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4.29)$$

En appliquant le rotationnel à l'équation 4.27, nous pouvons exprimer la densité de courant dans le fantôme par l'équation aux dérivées partielles :

$$\vec{\Delta} \vec{J} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{J}}{\partial t^2} = 0 \quad (4.30)$$

En supposant que la dérivée de  $J$  par rapport à  $z$  sur une portion de cylindre de 1 cm de hauteur est négligeable par rapport aux autres dérivées. Cela permet d'écrire [97] que la densité de courant  $J$  à une hauteur  $z$  s'exprime par :

$$J_z(r) = J_{cte(z)} J_0(\tau r) \quad (4.31)$$

où :

$J_0(\tau r)$  est la fonction de Bessel de 1<sup>ère</sup> espèce et d'ordre 0 ;

$J_{cte(z)}$  est une constante dépendant de la hauteur  $z$ , directement liée au courant induit sur une section du fantôme ;

$\tau$  est une constante dépendant de la fréquence  $\tau = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \omega^2 - j\omega \sigma \mu_0}$  ;

$r$  est le rayon variable à une hauteur  $z$ .

L'expression du courant induit, connu sur une section  $z$ , permet de calculer la constante  $J_{cte(z)}$  grâce à l'intégrale de la densité de courant sur une surface :

$$I_z = 2\pi J_{cte(z)} \frac{R}{\tau} J_1(\tau R) \quad (4.32)$$

où :

$R$  est le rayon d'une section du fantôme à une hauteur  $z$  ;

$J_1(\tau R)$  est la fonction de Bessel de 1<sup>ère</sup> espèce et d'ordre 1.

La densité de courant à une hauteur  $z$  s'écrit donc :

$$J_z(r) = \frac{I_z \tau}{2\pi R} \frac{J_0(\tau r)}{J_1(\tau R)} \quad (4.33)$$

Nous exprimons ensuite les puissances absorbées sur le corps entier et sur des volumes de 10 g afin de calculer les DAS. Le corps de hauteur  $H$  est divisé en  $N = 175$  petites parties de hauteur  $\Delta z = 1 \text{ cm}$ , car le courant le long du corps sera calculé tous les  $\Delta z$ , la variation du courant  $I_z$  sur 1 cm

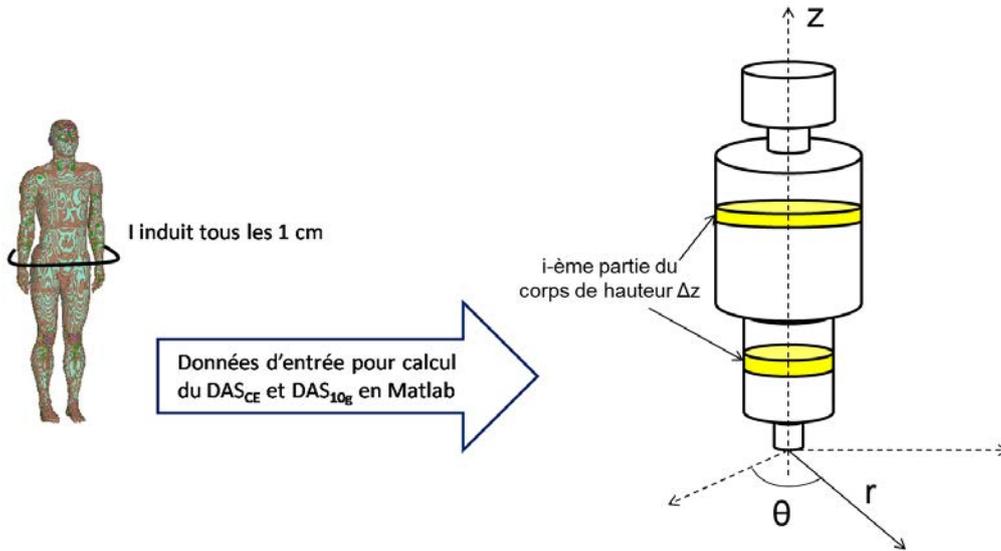


FIGURE 4.26 – Schéma de calcul de la puissance absorbée sur tout le corps avec le fantôme simplifié

étant considérée négligeable. Nous calculons d'abord la puissance absorbée par chaque petite partie du corps  $P_i$  de hauteur  $\Delta z$  (figure 4.26) :

$$P_i = \int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{\Delta z} \frac{|J_i|^2}{2\sigma} r dr d\theta dz = \frac{2\pi \Delta z}{2\sigma} \int_{r=0}^R |J_i|^2 r dr \quad (4.34)$$

où  $J_i$  est la densité de courant  $J_z$  sur la  $i$ -ème partie du corps de hauteur  $\Delta z$ . Il faut ensuite sommer toutes les petites puissances  $P_i$  pour obtenir la puissance totale absorbée par le corps  $P_{CE}$  :

$$P_{CE} = \sum_{i=0}^N P_i \quad (4.35)$$

Le DAS corps entier a pour expression :

$$DAS_{CE} = \frac{P_{CE}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^N \left( \frac{\pi}{\sigma} \Delta z |J_{cte(i)}|^2 \int_{r=0}^R |J_0(\tau r)|^2 r dr \right) \quad (4.36)$$

où :

$M$  est la masse du corps entier ;

$J_{cte(i)}$  est la constante  $J_{cte(z)}$  de l'équation 4.31 pour  $z = i$ .

Comme nous ne souhaitons calculer que les DAS 10 g maximaux, le DAS 10 g n'est calculé qu'à la surface du fantôme où l'on trouve les DAS 10 g les plus élevés (figures 4.27 et 4.25). Nous calculons d'abord les puissances absorbées sur 10 g de tissus dans la couronne en surface du fantôme (figure 4.27). L'anneau a une hauteur de  $\delta z = 2 \text{ cm}$  et un diamètre de  $2x$ . Comme  $x$  représente l'épaisseur et  $\delta z$  la hauteur du volume de 10 g servant au DAS 10 g, le volume de 10 g s'exprime par :  $V = \frac{m}{\rho} = \pi x^2 \delta z$ . Le volume de l'anneau s'exprime donc par :  $V_{anneau} = \delta z \pi 4x(R - x)$ .

Dans cet anneau, on a alors  $\frac{4(R-x)}{x}$  volumes de 10 g. Comme, la fonction de Bessel  $J_0$  ne dépend pas de l'angle  $\theta$ , on peut écrire que la puissance absorbée par un volume de 10 g est :

$$P_{10g} = \frac{P_{anneau}}{\text{Nombre de } V_{10g} \text{ dans anneau}} \quad (4.37)$$

$$P_{10g}(z = i) = \frac{x}{4(R-x)} \int_{r=R-2x}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{z=i}^{i+\delta z} \frac{|J_z(r)|^2}{2\sigma} r dr d\theta dz \quad (4.38)$$

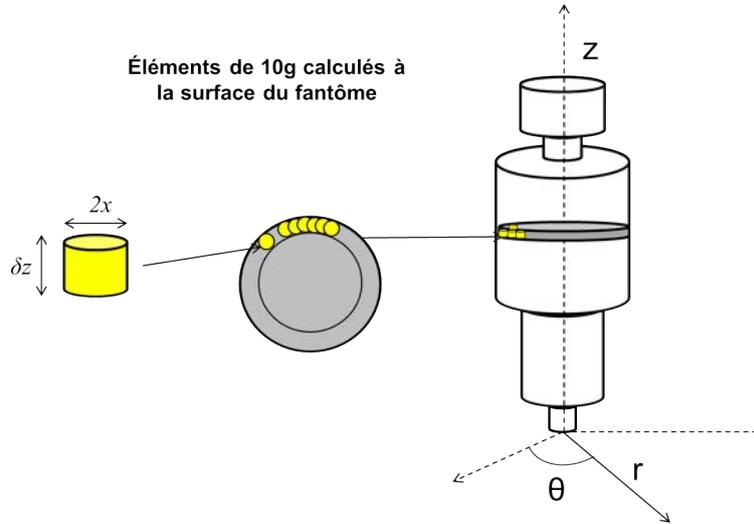


FIGURE 4.27 – Schéma de calcul des puissances absorbées sur un volume de 10 g à la surface du fantôme simplifié

où  $P_{10g}(z = i)$  représente la puissance absorbée par le  $i$ -ème volume de 10 g selon l'axe  $z$ .

Le DAS 10 g s'exprime alors par :

$$DAS_{10g}(z = i) = \frac{P_{10g}}{0,01} = \frac{x\pi}{4(R-x)0,01\sigma} \int_{z=i}^{i+\delta z} |J_{cte(z)}|^2 dz \int_{r=R-2x}^R |J_0(\tau r)|^2 r dr \quad (4.39)$$

où :

$x$  représente l'épaisseur du volume de 10 g ( $x = 1,2 \text{ cm}$ );

$\delta z$  représente la hauteur du volume de 10 g ( $\delta z = 2 \text{ cm}$ ).

Ces formules sont ensuite implémentées dans un logiciel de calculs (Matlab dans notre cas) en fournissant en entrée les courants induits le long du fantôme homogène avec un pas de 1 cm selon l'axe  $z$ . L'application des formules est faite sur un fantôme homogène simple équivalent à Duke (figure 4.25, fantôme présenté dans la section 4.5.3.1).

### 4.5.3 Résultats et validation des formules

#### 4.5.3.1 Fantôme simplifié équivalent au fantôme homogène Duke

L'application des formules analytiques 4.36 et 4.39 étant extrêmement complexe sur le fantôme Duke, nous proposons d'utiliser un fantôme simplifié (figure 4.25). Ce fantôme est rempli de tissu homogène (propriétés décrites en figure 4.19) et est composé de cinq cylindres. Ces cinq cylindres sont de dimensions équivalentes à respectivement, la tête, le cou, le tronc, les jambes et les chevilles de Duke (tableau 4.1).

|          | Rayon (m) | Hauteur (m) |
|----------|-----------|-------------|
| Tête     | 0,09      | 0,183       |
| Cou      | 0,0635    | 0,0526      |
| Tronc    | 0,232     | 0,650       |
| Jambe    | 0,105     | 0,678       |
| Cheville | 0,05      | 0,174       |

TABLE 4.1 – Dimensions du fantôme simplifié pour Duke

Ce fantôme simplifié est assez proche en  $DAS_{CE}$  et DAS 10 g max au fantôme Duke homogène : écart entre les deux inférieur à 3 dB (figure 4.28). Grâce à ce fantôme, nous avons appliqué nos formules pour différentes expositions et comparons leurs résultats à ceux obtenus en simulation avec le fantôme Duke homogène.

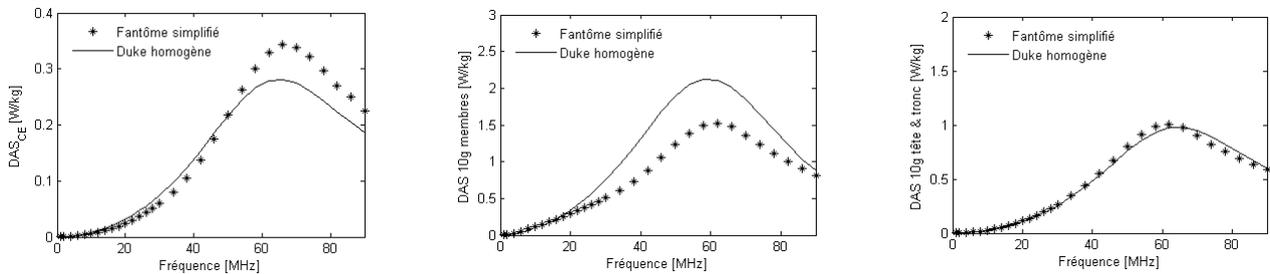


FIGURE 4.28 – Comparaison des DAS corps entier, des DAS 10 g max sur les membres et des DAS 10 g max sur tête & tronc pour le fantôme Duke et le fantôme simplifié homogènes

#### 4.5.3.2 Exposition à une onde plane

Le fantôme Duke homogène est exposé de face à une onde plane polarisée verticalement d'amplitude 61 V/m en espace libre entre 1 et 90 MHz<sup>27</sup>.

Les écarts sur les  $DAS_{CE}$  entre les formules et la simulation sont compris entre 0,2 et 1,2 dB, ceux sur le DAS 10 g membres sont de -1 à 1,5 dB et ceux sur le DAS 10 g tête & tronc sont de -1,5 à -0,8 dB (figure 4.29). La résonance du corps à 65 MHz pour le fantôme Duke est bien prise en compte par nos formules et les écarts sur les grandeurs sont acceptables puisqu'ils restent inférieurs à 3 dB.

Un fantôme simplifié correspondant à la morphologie du fantôme Ella [3] a été également traité pour tester les formules analytiques en onde plane. Les écarts obtenus entre la simulation avec le fantôme Ella homogène et les formules appliquées sur un fantôme simple d'Ella sont compris entre 0 et 2 dB pour le  $DAS_{CE}$ , entre -1,5 et 2,3 dB pour le DAS 10 g max dans les membres et entre -1 et 0,5 dB pour le DAS 10 g max dans la tête & tronc (cf. annexe C).

L'utilisation de ces formules pour évaluer les DAS est donc tout à fait envisageable pour une exposition en onde plane. Ces résultats montrent également que les phénomènes de couplage entre une onde plane et un fantôme homogène sont maîtrisés et prévisibles en termes de DAS corps entier et de DAS 10 g.

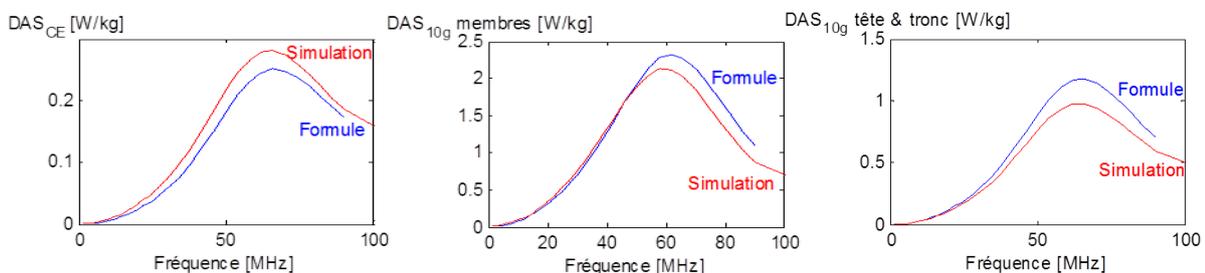


FIGURE 4.29 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans le fantôme homogène Duke calculés en simulation et par les formules proposées entre 1 et 90 MHz pour une exposition en onde plane

27. Nous rappelons que seuls les courants induits le long du fantôme Duke homogène sont calculés en simulation, et que ces courants induits servent de données d'entrée pour l'applications des formules 4.36 et 4.39.

### 4.5.3.3 Exposition à un champ haute impédance

Le champ haute impédance est créé par la même structure que dans la section 4.3.3.1. Comme précédemment, le fantôme Duke homogène est isolé du sol et que les courants induits le long de son corps calculés en simulation servent de données d'entrée aux formules 4.36 et 4.39.

Les écarts entre les formules et la simulation sont compris entre 0,2 et 2 dB pour le  $DAS_{CE}$ , entre -0,6 et 1,7 dB pour le DAS 10 g max dans les membres et entre -1,1 et 2,7 dB pour le DAS 10 g max tête & tronc (figure 4.30). Pour cette exposition en champ électromagnétique haute impédance, nous constatons que les formules proposées (4.36 et 4.39) donnent des résultats proches du comportement simulé.

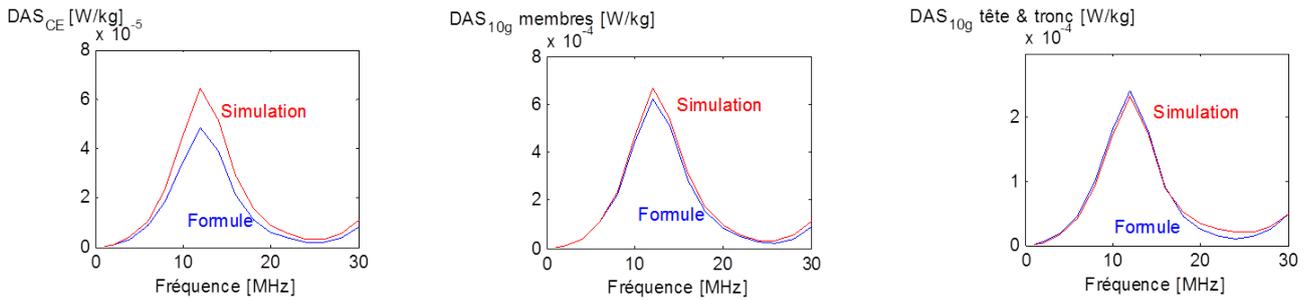


FIGURE 4.30 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans le fantôme homogène Duke calculés en simulation et par les formules proposées entre 1 et 30 MHz pour une exposition en champ haute impédance

### 4.5.3.4 En champ basse impédance

Dans cette section, le fantôme Duke homogène est exposé à un champ basse impédance. Le champ basse impédance est créé par la même structure que dans la section 4.3.3.2.

Nous obtenons des écarts de 1,2 à 3 dB sur le  $DAS_{CE}$  entre les formules et la simulation. Ils sont compris entre 0,5 et 1,5 dB pour le DAS 10 g membres et entre -0,2 et 4 dB pour le DAS 10 g tête & tronc (figure 4.31). Dans cette structure, nous remarquons une faible résonance vers 5 MHz qui est bien prise en compte par nos formules. Les résultats sont satisfaisants vis-à-vis de la simulation.

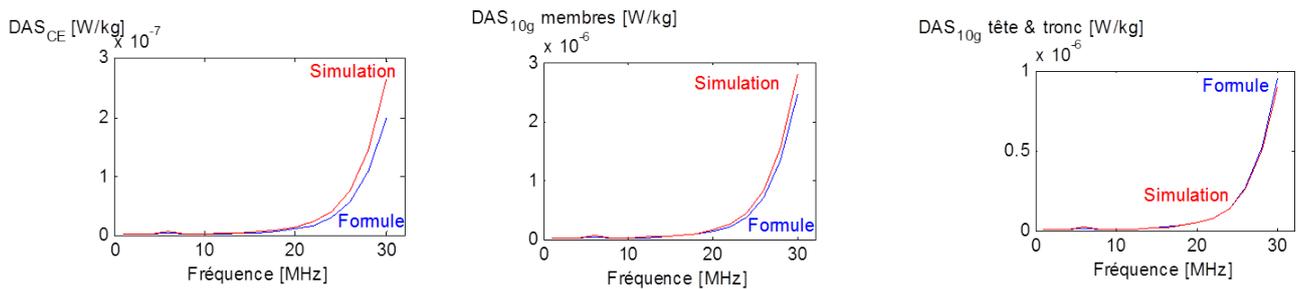


FIGURE 4.31 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans le fantôme homogène Duke calculés en simulation et par les formules proposées entre 1 et 30 MHz pour une exposition en champ basse impédance

### 4.5.3.5 Champ rayonné par une antenne sur véhicule

Nous avons voulu vérifier si nos formules proposées 4.36 et 4.39 étaient également applicables pour une exposition plus réaliste. Le fantôme Duke homogène est donc placé à 20 cm de l'arrière d'un véhicule. Le véhicule mesure 3,8 mètres de long, 1,7 m de large et 2,1 m de hauteur (figure 4.32). Une

antenne électrique de 5 m est placée sur le toit du véhicule à l'arrière droit. La puissance fournie à l'antenne est de 0,5 W.

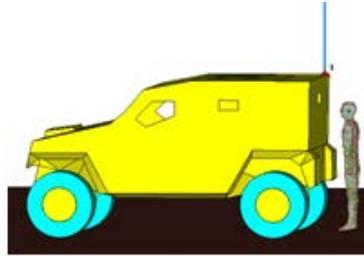


FIGURE 4.32 – Scenario d'exposition à un champ rayonné par une antenne placée sur le toit d'un véhicule, fantôme placé à proximité du véhicule

Les résultats montrent une bonne corrélation entre les DAS calculés en simulation sur le fantôme Duke et les DAS calculés avec les formules 4.36 et 4.39 sur le fantôme simple. La différence maximale est en effet de 1,5 dB sur le corps entier, 1 dB sur les membres et 0,9 dB sur la tête & tronc (figure 4.33).

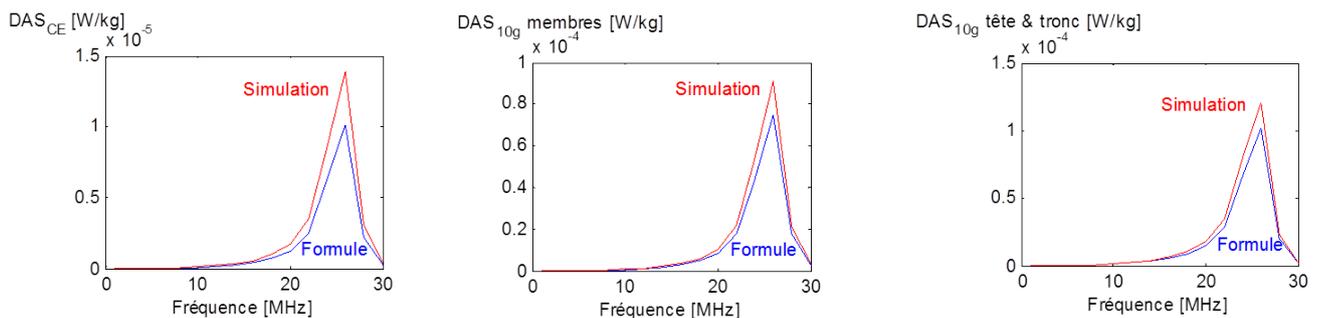


FIGURE 4.33 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans le fantôme homogène Duke calculés en simulation et par les formules proposées entre 1 et 30 MHz pour un champ rayonné par une antenne électrique placée sur le toit d'une véhicule

Avec ces différents cas d'exposition, nous avons montré que ces formules simples (équations 4.36 et 4.39) peuvent être utilisées en phase d'ingénierie pour évaluer en première approche les risques de surexposition et ainsi optimiser la validation en DAS. Cela montre la possibilité de valider indirectement les restrictions de base en DAS par des mesures ou des calculs de courants induits.

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de proposer une modélisation du corps par des circuits électriques ou par des fantômes simples basés sur des fantômes de la Virtual Family [3]. Grâce à ces modélisations, nous avons pu établir, de façon analytique, le couplage entre le corps et les champs électromagnétiques appliqués.

Nous avons ainsi proposé des formules analytiques permettant de calculer les courants induits dans le corps à partir du champ électrique externe en utilisant un circuit électrique de Thévenin. Nous avons proposé des formules de calcul du DAS corps entier et DAS 10 g max dans un fantôme homogène à partir des courants induits le long du corps. Nous avons également étudié les valeurs de courant induit et de DAS corps entier selon la posture du fantôme et l'impédance du champ électromagnétique appliqué.

Nous utilisons ces résultats dans le chapitre suivant pour proposer de nouvelles méthodes de validation de systèmes RF afin de simplifier les mesures dosimétriques.



## Chapitre 5

# Proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation dosimétrique

### Sommaire

---

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>5.1</b> | <b>Introduction</b>  | <b>96</b>  |
| <b>5.2</b> | <b>Evaluation des DAS à partir du champ électrique</b>               | <b>96</b>  |
| 5.2.1      | Application sur un fantôme simplifié homogène                        | 96         |
| 5.2.2      | Application sur le fantôme Duke homogène                             | 97         |
| 5.2.3      | Conclusion   | 97         |
| <b>5.3</b> | <b>Développement de tissus homogènes ou hétérogènes simples</b>      | <b>99</b>  |
| 5.3.1      | Tissu homogène   | 99         |
| 5.3.2      | Combinaison à 2 tissus   | 101        |
| 5.3.3      | Combinaison à 3 tissus   | 104        |
| 5.3.3.1    | Exposition à une onde plane  | 104        |
| 5.3.3.2    | Exposition à un champ haute impédance                                | 110        |
| 5.3.3.3    | Exposition à un champ rayonné par une antenne placée sur un véhicule | 111        |
| 5.3.3.4    | Evolution de l'hétérogène simple à 3 tissus                          | 116        |
| <b>5.4</b> | <b>Conclusion</b>  | <b>119</b> |

---

## 5.1 Introduction

Dans les chapitres 1 et 2, nous avons étudié différents fantômes et différents types d'exposition. Cela nous a permis de constater que le pire cas d'exposition est l'onde plane en polarisation verticale, pour un même champ électrique appliqué.

Grâce à ces constatations, nous avons développé dans le chapitre 4, des circuits électriques équivalents au corps humain permettant d'évaluer les courants induits dans le corps à partir du champ électrique appliqué pour une exposition en onde plane. De plus, nous avons proposé des formules de calcul permettant d'évaluer rapidement et assez précisément les DAS corps entier et DAS 10 g à partir de valeurs de courant induit.

Dans ce chapitre, désormais, nous utilisons ces résultats pour proposer une méthode d'évaluation des DAS à partir du champ électrique appliqué. Nous développons également dans ce chapitre, un nouveau type de fantôme. Celui-ci a la morphologie du fantôme Duke [3] et ne contient plus que trois tissus différents, tout en gardant le même comportement en DAS que le fantôme Duke hétérogène entre 1 et 90 MHz.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été calculés par le logiciel CST Microwave en résolution FIT avec un maillage de même dimension que les voxels du fantôme Duke.

## 5.2 Evaluation des DAS à partir du champ électrique

Dans cette partie, les résultats du chapitre 4 sont utilisés pour proposer une méthode de calcul des DAS corps entier et DAS 10 g à partir du champ électrique appliqué pour une exposition en onde plane polarisée verticalement entre 1 et 90 MHz. Le principe de cette méthode est présenté en figure 5.1. Le champ appliqué pour l'onde plane est de 61 V/m.

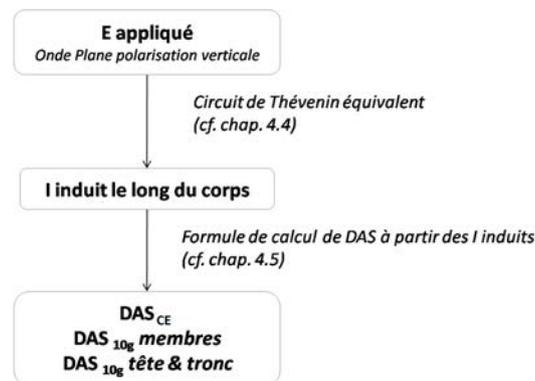


FIGURE 5.1 – Schéma de calcul des DAS à partir du champ E électrique appliqué

### 5.2.1 Application sur un fantôme simplifié homogène

La méthode est d'abord appliquée sur un fantôme simplifié homogène (fantôme présenté dans la section 4.5.3.1) et nous comparons chaque résultat d'étape intermédiaire aux différentes grandeurs calculées en simulation avec le logiciel CST Microwave. Le tissu homogène utilisé est celui utilisé dans les chapitres 2 et 4, dont les propriétés sont rappelées dans l'annexe B.

Le courant à mi-hauteur dans le fantôme est d'abord calculé en utilisant le circuit de Thévenin équivalent du chapitre 4 (cf section 4.4.1). Nous constatons que le courant obtenu donne une très bonne approximation du courant calculé en simulation (figure 5.2).

Ensuite, en utilisant la variation sinusoïdale du courant induit le long du corps proposée dans l'équation 4.25, nous pouvons calculer le courant induit le long du fantôme simplifié. Les courants obtenus

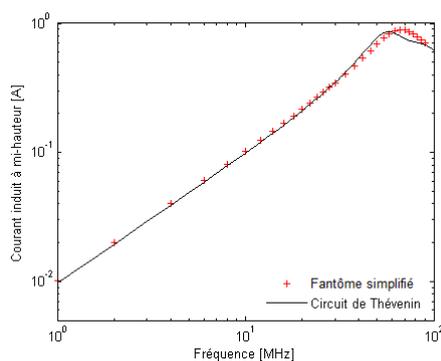


FIGURE 5.2 – Courant à mi-hauteur dans le fantôme simplifié homogène avec la méthode proposée (*Circuit de Thévenin*) et en simulation (*Fantôme simplifié*)

sont comparables à ceux calculés en simulation, notamment entre les pieds et le tronc (figure 5.3). Le courant obtenu avec notre méthode est cependant supérieur à la simulation sur le tronc (entre  $z = 85$  cm et  $z = 150$  cm).

A partir des courants induits le long du fantôme, les DAS corps entier et 10 g sont calculés (figure 5.4). Nous constatons que sur les membres, le circuit de Thévenin donne des DAS 10 g inférieurs à ceux de la simulation, alors que pour la zone tête & tronc, ils sont supérieurs à ceux de la simulation pour des fréquences supérieures à 40 MHz et en-dessous, ils sont quasiment égaux. Les écarts entre la simulation et le circuit de Thévenin sont de  $\pm 1,3$  dB pour le DAS 10 g tête & tronc, alors que pour le DAS 10 g membres, ils sont compris entre 10 et 0 dB et ne sont inférieurs à 3 dB que pour des fréquences supérieures à 38 MHz. Pour le  $DAS_{CE}$ , la fréquence de résonance intervient à 58 MHz pour le circuit de Thévenin, alors qu'elle intervient à 65 MHz pour la simulation. Cela nous donne des  $DAS_{CE}$  supérieurs à ceux de la simulation pour les fréquences 36 MHz à 62 MHz et inférieurs à ceux de la simulation au-delà. Pour les fréquences inférieures à 36 MHz, les valeurs de  $DAS_{CE}$  du circuit de Thévenin sont très proches de celles de la simulation (écart compris entre -0,3 dB et 0,8 dB). Au-dessus de 36 MHz, les écarts entre la simulation et le circuit de Thévenin sont de  $\pm 1$  dB.

### 5.2.2 Application sur le fantôme Duke homogène

Comme pour le fantôme simplifié, les DAS corps entier et 10 g sont calculés sur le fantôme Duke homogène grâce aux résultats du chapitre 4. Nous présentons dans cette section uniquement les résultats en DAS, car les résultats intermédiaires, courant induit à mi-hauteur et courant induit le long du corps sont présentés dans le chapitre 4 (cf section 4.4.1).

Nous constatons que le  $DAS_{CE}$  calculé avec le circuit de Thévenin est inférieur à celui calculé en simulation (de 0 à 2 dB d'écart) entre 1 et 40 MHz (figure 5.5). Au-delà de 40 MHz, il est supérieur à la simulation avec des écarts de 0 à 1,2 dB. Le DAS 10 g membres est toujours inférieur à la simulation pour ces fréquences, et les écarts varient entre 0,3 et 8,8 dB (écarts inférieurs à 3 dB pour des fréquences supérieures à 52 MHz). Le DAS 10 g tête & tronc est proche de la simulation (écarts inférieurs à 1,6 dB), mais il est inférieur à la simulation entre 1 et 38 MHz et supérieur à la simulation entre 38 et 90 MHz.

### 5.2.3 Conclusion

Dans cette partie, nous avons pu évaluer les DAS corps entier et 10 g à partir du champ électrique appliqué de l'onde plane. Les répartitions spatiale et fréquentielle des courants induits et du DAS sur le corps données par cette méthode et calculées en simulation avec le fantôme Duke homogène sont identiques. Néanmoins, les valeurs de DAS issues de cette méthode ne donnent pas toujours de bonnes estimations des DAS calculés en simulation. Des écarts bien supérieurs à 3 dB (jusqu'à 10 dB) ont été relevés sur le DAS 10 g membres pour des fréquences entre 1 et 50 MHz. Cependant pour des fréquences

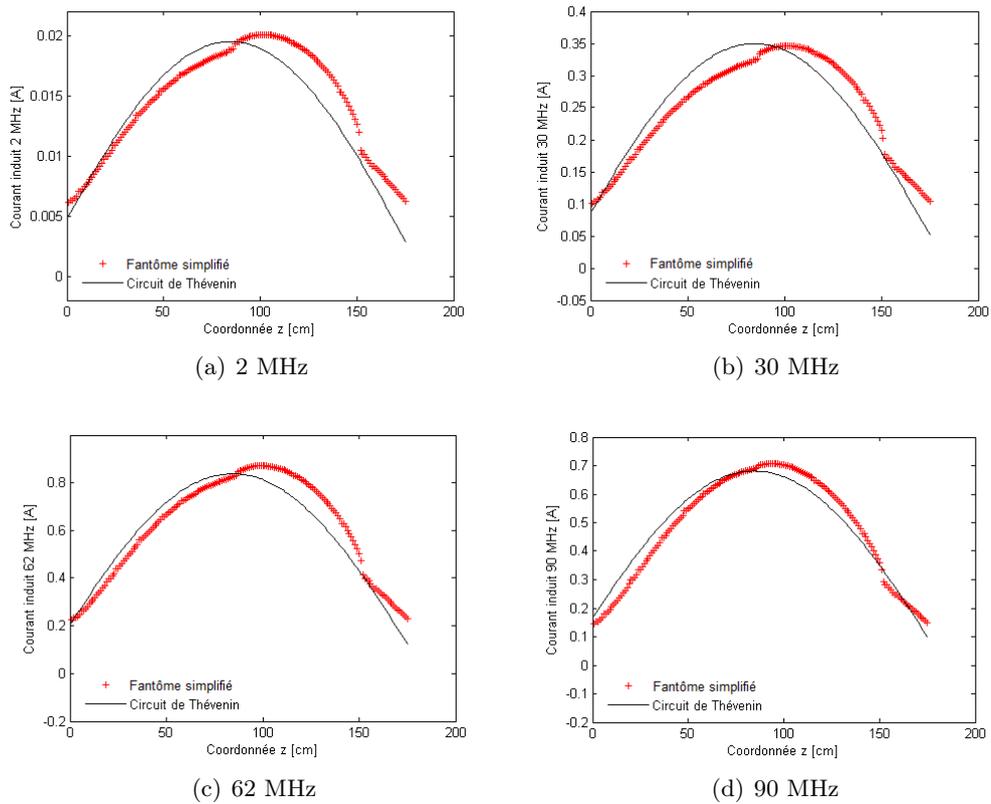


FIGURE 5.3 – Distribution du courant induit le long du corps : courants calculés sur le fantôme simplifié homogène avec la méthode proposée (*Circuit de Thévenin*) et en simulation (*Fantôme simplifié*)

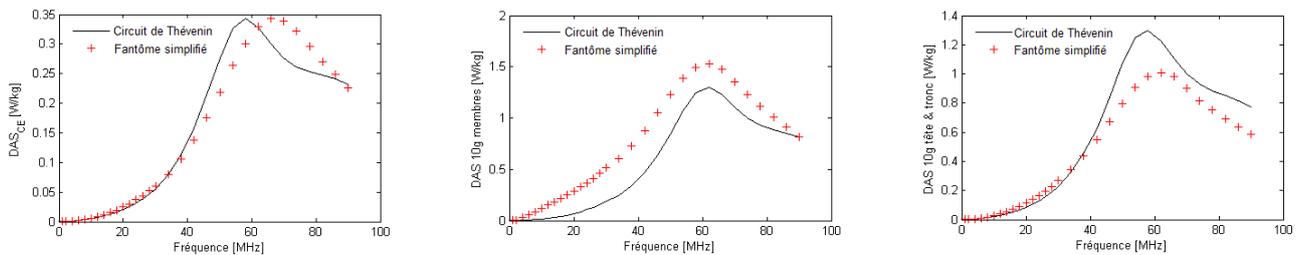


FIGURE 5.4 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans le fantôme simplifié homogène, calculés en simulation (*Fantôme simplifié*) et par notre méthode (*Circuit de Thévenin*)

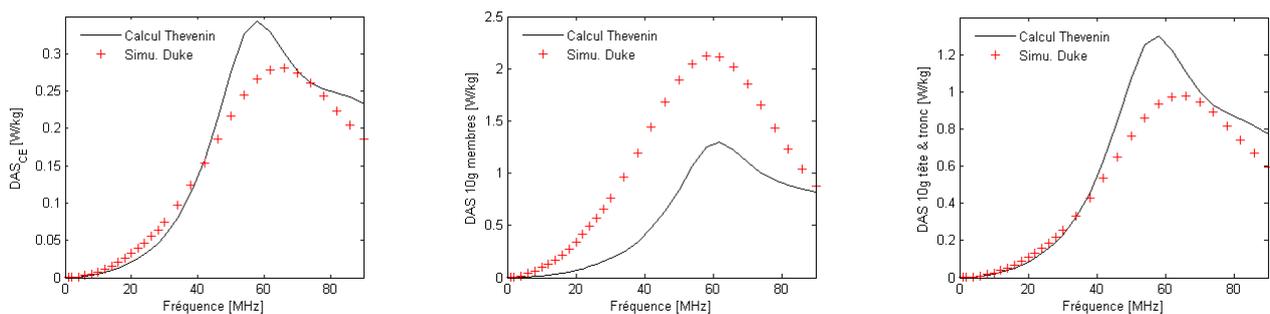


FIGURE 5.5 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans le fantôme homogène Duke, calculés en simulation et par les formules proposées dans le chapitre 4 en onde plane

supérieures à 50 MHz, les DAS 10 g calculés par cette méthode correspondent à de bonnes estimations des DAS issus de la simulation. De plus, pour les  $DAS_{CE}$  et DAS 10 g tête & tronc, les écarts restent inférieurs à 2 dB entre 1 et 90 MHz. Notre méthode reste donc utile pour estimer rapidement les risques DAS en exposition onde plane, particulièrement entre 50 et 90 MHz.

### 5.3 Développement de tissus homogènes ou hétérogènes simples

Durant ces travaux de thèse, nous avons du faire face à quelques problèmes lors de l'utilisation de fantôme hétérogène :

- les simulations comprenant un fantôme hétérogène et un système radioélectrique prennent énormément de temps (jusqu'à une semaine) ;
- le changement de posture pour un fantôme hétérogène est difficile à réaliser, car il faut veiller à la continuité des tissus et à leur localisation : par exemple, les os doivent rester à l'intérieur du corps et s'ils sont reliés entre eux en un point particulier dans la posture initiale, il faut que cela le reste dans la nouvelle posture ;
- le développement d'un fantôme physique pour des fréquences HF et VHF n'est pas réalisable si l'on souhaite un fantôme permettant à la fois de faire des mesures de DAS 10 g et de  $DAS_{CE}$ .

L'objectif de cette partie est de définir un tissu homogène ou une combinaison de 2 ou 3 tissus permettant de simplifier un modèle hétérogène. Cette combinaison de tissus ou ce tissu homogène doit permettre d'obtenir des valeurs de DAS corps entier et DAS 10 g proches de celles d'un hétérogène.

Dans cette partie, le fantôme Duke hétérogène [3] est utilisé comme référence. Sa morphologie sert également à étudier les propositions de tissus homogènes et de combinaisons de tissus. Le fantôme est exposé de face à une onde plane polarisée verticalement, en espace libre, à 61 V/m. Nous proposons d'abord un tissu homogène puis une combinaison de tissus pour des fréquences VHF (de 30 à 90 MHz), puis nous étudions la combinaison choisie pour d'autres fréquences (de 1 à 30 MHz) et d'autres expositions.

#### 5.3.1 Tissu homogène

Deux tissus homogènes sont étudiés. Le premier tissu homogène est celui décrit en annexe B et utilisé dans les chapitres précédents (chapitres 2 et 4). Le second *tissu homogène Duke* est spécifique au fantôme Duke hétérogène de voxels (5 mm)<sup>3</sup>. Il est développé de la même manière que le tissu homogène décrit dans l'annexe B. Nous avons identifié les 10 tissus les plus présents dans le fantôme Duke hétérogène et moyenné de manière pondérée leurs propriétés pour obtenir ce tissu. Les deux tissus homogènes sont décrits en figure 5.6.

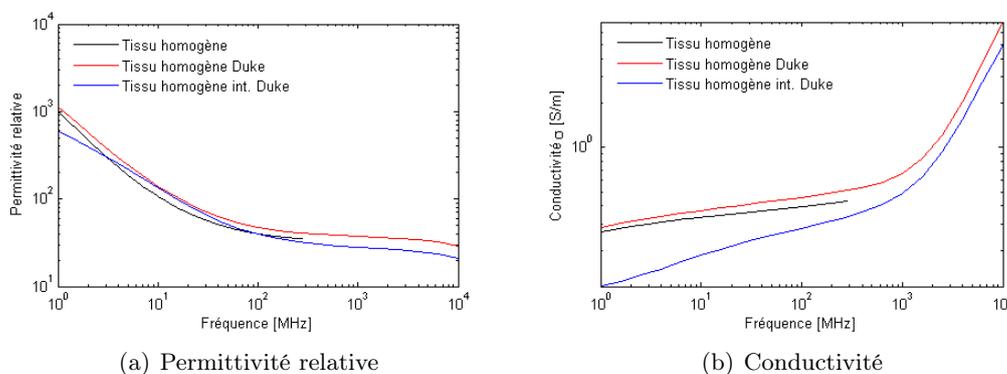


FIGURE 5.6 – Propriétés des tissus homogènes utilisés pour caractériser le fantôme Duke

Nous constatons qu'avec le premier tissu homogène, les valeurs de DAS sont supérieures à celles du tissu *homogène Duke* (figure 5.7). Cependant, ces valeurs restent bien inférieures à celles du fantôme hétérogène (facteur 2 pour le DAS 10 g). Cela s'explique par leur conductivité, en effet la conductivité du tissu *homogène Duke* est plus élevée que celle du tissu homogène, ce qui entraîne pour le tissu *homogène Duke* une absorption du champ électrique plus faible, et donc un DAS plus faible.

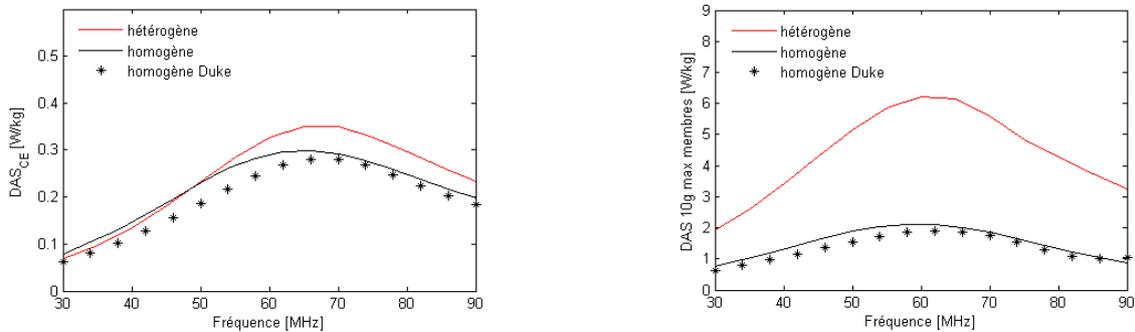


FIGURE 5.7 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour différents tissus homogènes dans le fantôme Duke en onde plane

La répartition en DAS 10 g est la même entre les deux fantômes homogènes (figures 5.8 et 5.9) et est quasi identique à celle de l'hétérogène. L'hétérogène présente deux zones à fort DAS : les chevilles (comme les deux homogènes) et l'arrière du genou (figure 5.9). Le DAS 10 g semble se focaliser à la surface du fantôme pour le cas *homogène Duke* contrairement aux autres fantômes, mais cela est dû aux valeurs de DAS élevées dans les deux autres cas. Avec ces résultats, nous décidons d'introduire un deuxième tissu car il semble impossible d'avoir un tissu homogène permettant à la fois de donner des DAS corps entier et des DAS 10 g proches de l'hétérogène.

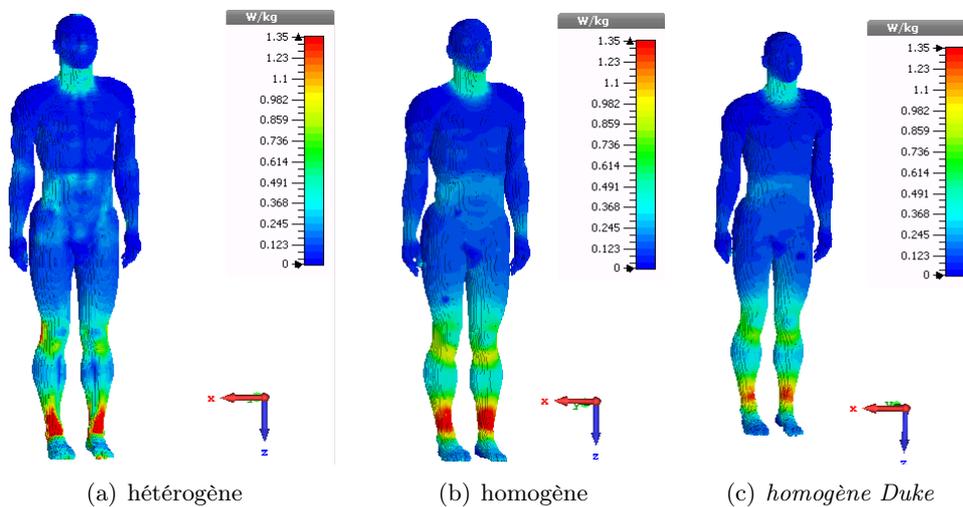
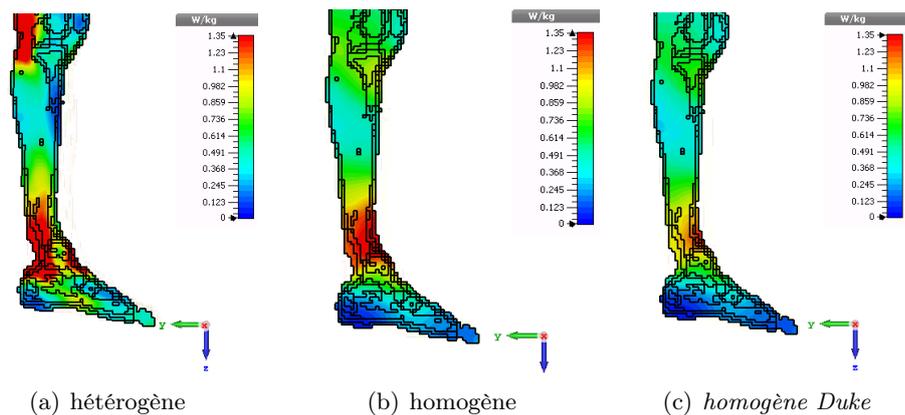


FIGURE 5.8 – Répartition en DAS 10 g sur le fantôme Duke à 46 MHz

FIGURE 5.9 – Répartition en DAS 10 g sur le fantôme Duke à 46 MHz - Coupe en  $x = 67,25$  cm

### 5.3.2 Combinaison à 2 tissus

Le deuxième tissu permet de modéliser la surface du fantôme et a donc une épaisseur comprise entre 5 mm et 1 cm, le reste du corps étant représenté par un tissu homogène. Dans cette section, deux tissus homogènes sont utilisés : celui développé dans l'annexe B et celui développé précédemment dans la section 5.3.1.

Nous avons constaté dans le chapitre 1 que la présence de graisse en surface des fantômes tendait à faire augmenter le DAS 10 g, c'est pourquoi nous étudions différentes combinaisons de tissus à la surface du fantôme à base de graisse. Les cas de fantôme à 2 tissus sont :

- **Cas A** : surface du fantôme composée d'un tissu ayant les propriétés de 50% graisse et 50% peau, puis le reste du corps est homogène avec le tissu de l'annexe B ;
- **Cas B** : surface du fantôme composée d'un tissu ayant les propriétés de 53% graisse et 47% peau (proportions dans Duke hétérogène de ces deux tissus), puis le reste du corps est homogène avec le tissu *homogène Duke* ;
- **Cas C** : surface du fantôme composée uniquement de graisse puis le reste du corps avec le tissu *homogène Duke* ;
- **Cas D** : surface du corps hétérogène (donc composée de voxels de graisse et de voxels de peau), puis le reste du corps est constitué du tissu *homogène Duke*.

Nous constatons que c'est avec une surface composée uniquement de graisse (cas C) que les valeurs de DAS 10 g se rapprochent le plus du cas hétérogène, mais pas de façon significative (figure 5.10). Sur la figure 5.11, nous remarquons que les DAS 10 g se répartissent de la même façon pour tous les cas, bien que l'hétérogène présente en plus une zone de fort DAS derrière le genou. En regardant la répartition en DAS 10 g sur une coupe au niveau de la cheville (figure 5.12), nous constatons qu'à l'intérieur du fantôme, le DAS 10 g se répartit de manière homogène entre les cas A, B, C et D, alors que pour l'hétérogène, il y a une zone à faible DAS à l'intérieur de la cheville.

Nous choisissons donc pour la suite de garder une couche de graisse en surface et d'ajouter un tissu intermédiaire entre la graisse et le tissu homogène d'une épaisseur de 5 mm à 1 cm. Par rapport aux résultats précédents (chapitre 1), nous savons qu'il faut mettre un tissu à faible conductivité à la surface du fantôme pour favoriser l'absorption de puissance. De plus pour que l'absorption reste au niveau de la surface, il faut ajouter après le tissu à faible conductivité (qui est la graisse), un tissu à forte conductivité pour diminuer fortement l'absorption dans ce tissu. Nous étudions dans la suite différentes combinaisons de trois tissus :

- 1<sup>er</sup> tissu à faible conductivité ;
- 2<sup>ème</sup> tissu à forte conductivité ;
- 3<sup>ème</sup> tissu représentant le reste du corps.

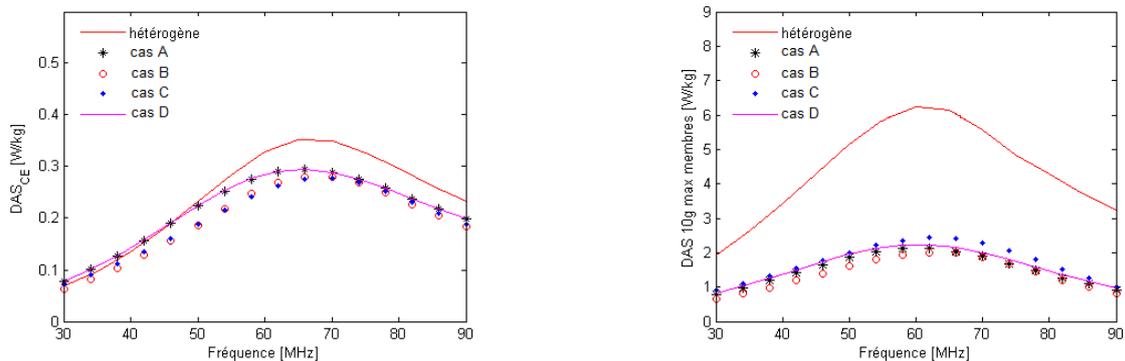


FIGURE 5.10 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour une combinaison de 2 tissus (peau et/ou graisse puis homogène) dans le fantôme Duke en onde plane

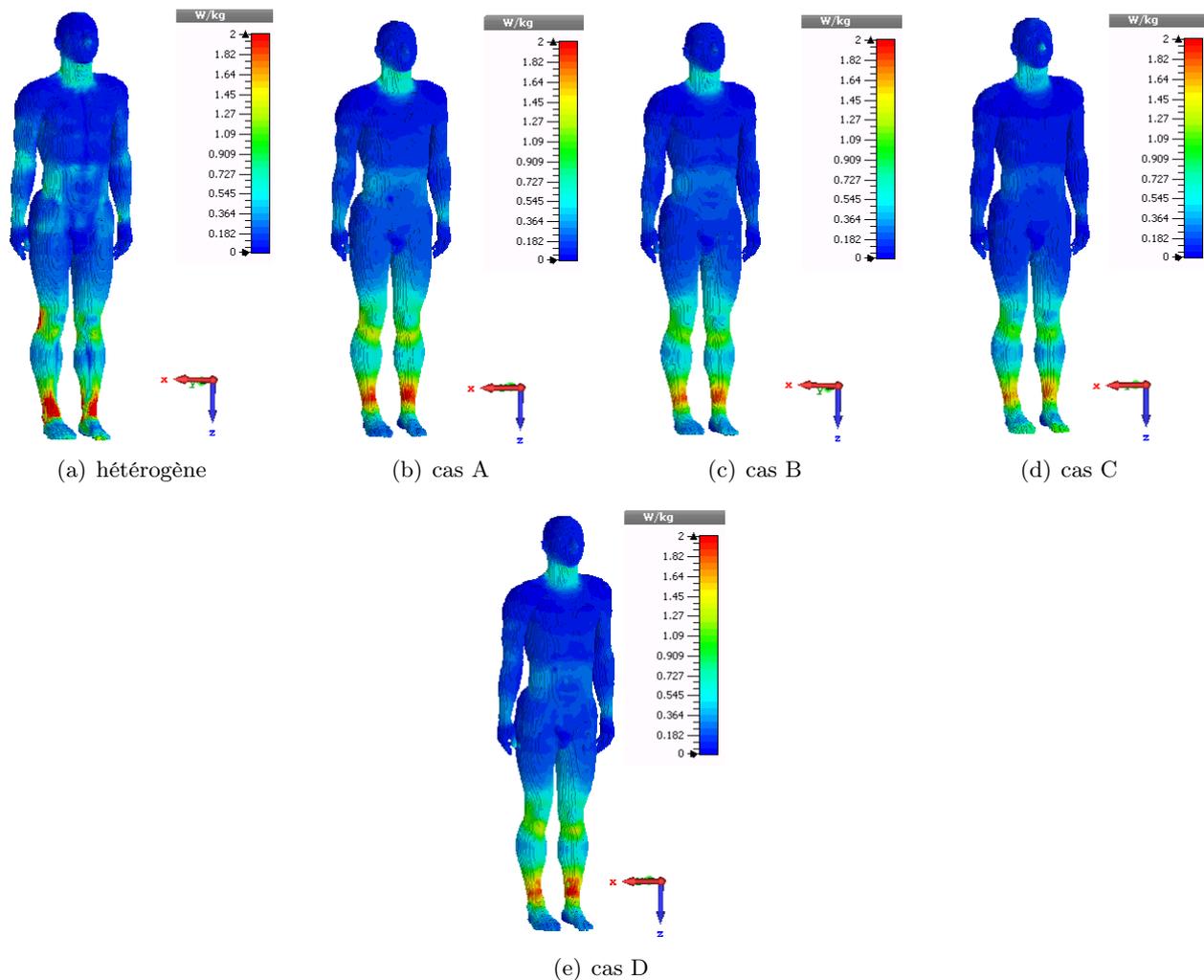


FIGURE 5.11 – Répartition en DAS 10 g sur le fantôme Duke à 62 MHz pour des combinaisons à 2 tissus

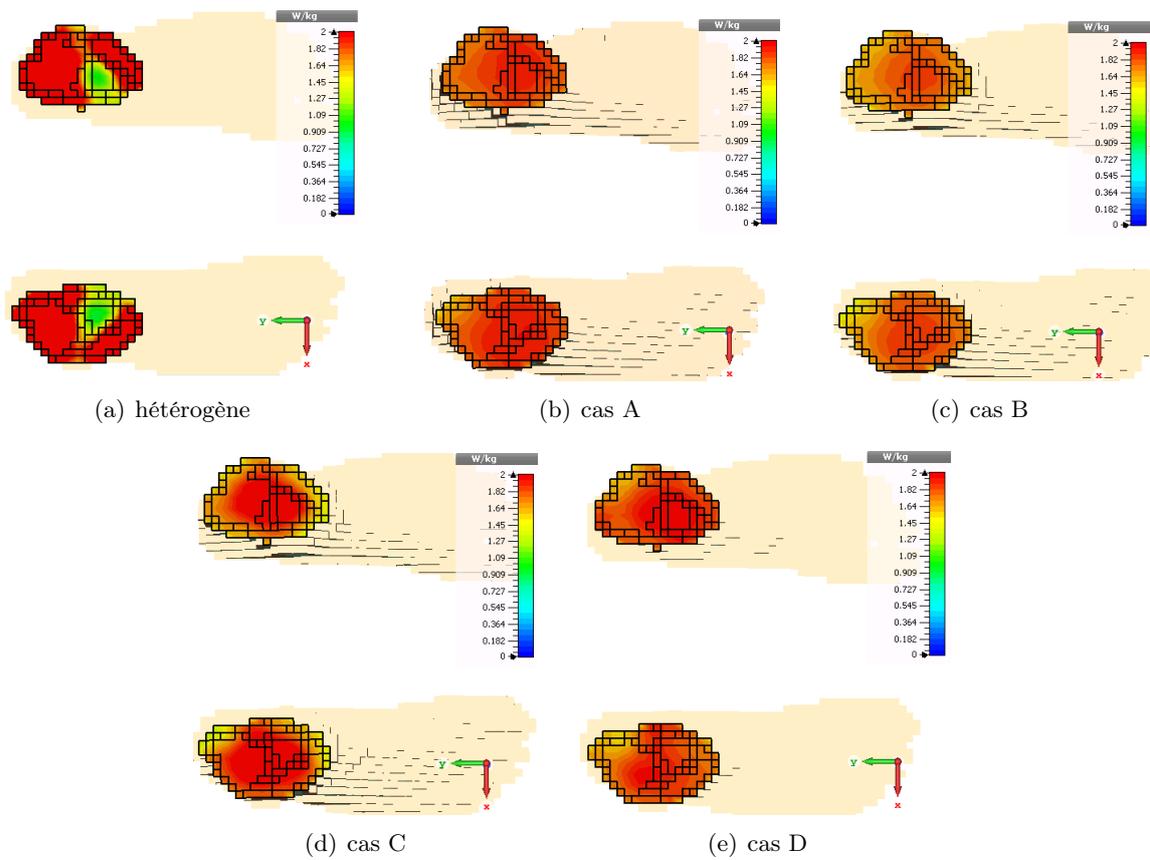


FIGURE 5.12 – Répartition en DAS 10 g sur le fantôme Duke à 62 MHz pour des combinaisons à 2 tissus - coupe au niveau de la cheville en  $z = 750$  mm

### 5.3.3 Combinaison à 3 tissus

En étudiant la conductivité des principaux tissus humains (annexe B en figure B.1), nous avons constaté que sur la bande 1-90 MHz, la graisse présente la plus faible conductivité alors que le sang et les muscles présentent les conductivités les plus fortes. Cela nous permet de choisir la graisse comme première couche de tissu. Pour la deuxième couche, nous étudions deux tissus : les muscles et le sang.

Enfin le dernier tissu représentant l'intérieur du corps humain est un tissu homogène dont les propriétés sont la moyenne pondérée des principaux tissus composant l'intérieur du fantôme Duke : cerveau, os, vertèbres, foie, poumons et graisse interne. Les propriétés de ce tissu *homogène intérieur* sont décrites en figure 5.13 et comparées aux autres tissus homogènes de ce chapitre en figure 5.6. Sur la figure 5.13, les tissus *muscle*  $\sigma * 2$ , *muscle*  $\sigma/2$  et *sang*  $\sigma * 2$  représentent les tissus muscle ou sang dont la conductivité est modifiée :

- pour le tissu *muscle*  $\sigma * 2$ , la conductivité du muscle est multipliée par 2 sur toute la bande de fréquence (de 1 MHz à 1000 MHz) ;
- pour le tissu *muscle*  $\sigma/2$ , la conductivité du muscle est divisée par 2 sur toute la bande de fréquence ;
- pour le tissu *sang*  $\sigma * 2$ , la conductivité du sang est multipliée par 2 sur toute la bande de fréquence.

Les conductivités ainsi modifiées sont tracées sur la figure 5.13 et comparées à celle des tissus originaux (sang ou muscle).

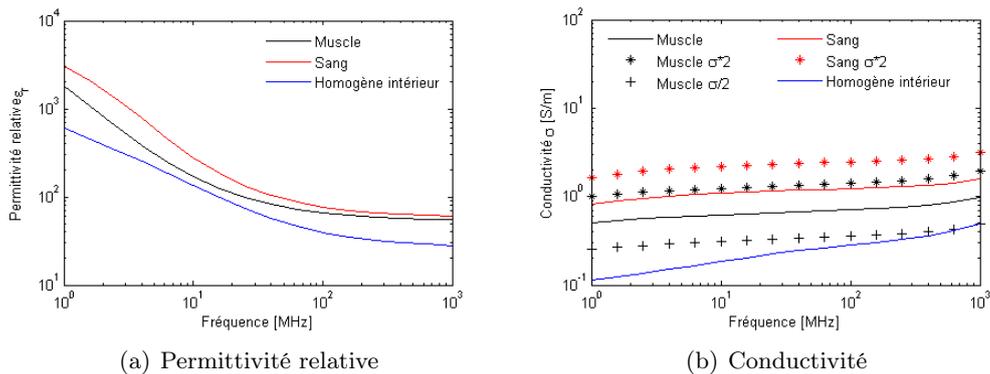


FIGURE 5.13 – Propriétés des différents tissus utilisés pour la combinaison de 3 tissus

#### 5.3.3.1 Exposition à une onde plane

Comme précédemment, le fantôme Duke est exposé à une onde plane polarisée verticalement à 61 V/m entre 30 MHz et 90 MHz. Différentes combinaisons de trois couches/tissus sont étudiées et présentées dans le tableau 5.1.

| Cas étudiés à 3 tissus | 1 <sup>ère</sup> couche | 2 <sup>ème</sup> couche           | 3 <sup>ème</sup> couche |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1                      | Graisse                 | Muscle                            | Homogène intérieur      |
| 2                      | Graisse                 | Muscle dont $\sigma_{muscle} * 2$ | Homogène intérieur      |
| 3                      | Graisse                 | Muscle dont $\sigma_{muscle}/2$   | Homogène intérieur      |
| 4                      | Graisse                 | Sang                              | Homogène intérieur      |
| 5                      | Graisse                 | Sang dont $\sigma_{sang} * 2$     | Homogène intérieur      |

TABLE 5.1 – Combinaisons à trois tissus étudiées dans le cas d'une exposition en onde plane

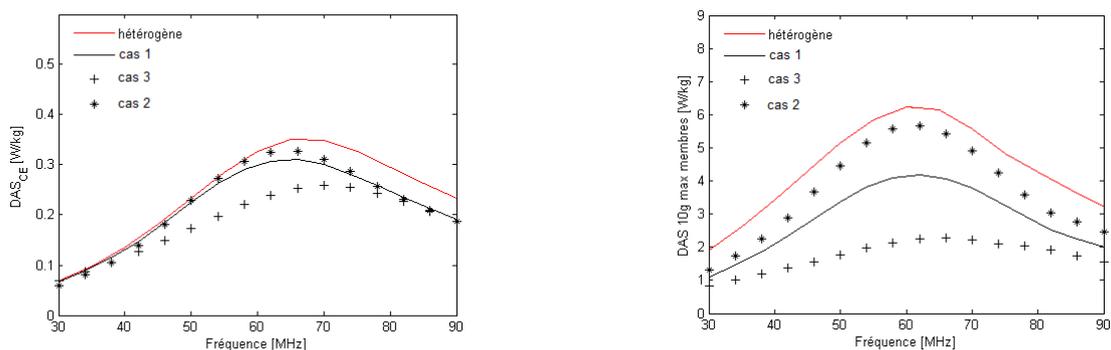


FIGURE 5.14 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour une combinaison de 3 tissus (graisse/muscle/homogène intérieur) dans le fantôme Duke en onde plane

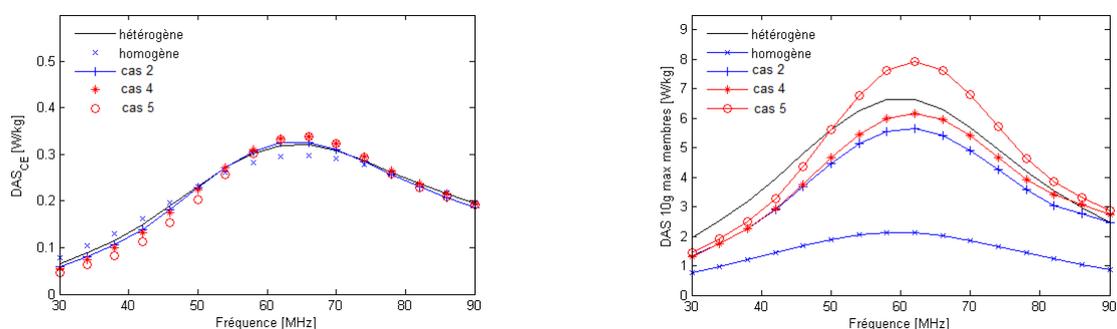


FIGURE 5.15 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour une combinaison de 3 tissus (graisse/sang/homogène intérieur) dans le fantôme Duke en onde plane<sup>28</sup>

Entre les cas 1, 2 et 3, nous constatons que les valeurs de DAS 10 g du cas 2 sont les plus proches de celles de l'hétérogène (figure 5.14). Les écarts sont compris entre 0 et 1,7 dB. Si on compare alors les cas 2, 4 et 5, nous constatons que les valeurs de DAS 10 g de ces cas sont très proches de celles de l'hétérogène (figures 5.15 et 5.16), les écarts entre ces cas et l'hétérogène sont de :

- -1,3 à 1 dB pour le cas 5 ;
- -1,7 à 0,5 dB pour le cas 4 ;
- -1,7 à 0 dB pour le cas 2.

Nous pouvons observer que la résonance intervient toujours à 60 - 65 MHz indépendamment de la composition des fantômes. Concernant le  $DAS_{CE}$ , les écarts sont compris entre :

- -1,6 et 0,3 dB pour le cas 5 ;
- -0,9 et 0,3 dB pour le cas 4 ;
- -0,5 et 0,1 dB pour le cas 2.

Cependant, nous développons cette combinaison de tissus pour évaluer plus rapidement les DAS 10 g, donc nous privilégions les résultats sur le DAS 10 g. De plus, il est possible d'améliorer les résultats sur le  $DAS_{CE}$  en modifiant les propriétés du tissu homogène constituant la troisième couche. Les cas 4 et 5 sont donc étudiés pour une exposition en onde plane en HF (de 1 à 30 MHz) contrairement au cas 2 qui est mis de côté.

Le fantôme Duke est exposé à une onde plane polarisée verticalement à 61 V/m en HF (de 2 à 30 MHz). Seuls les cas 4 et 5 sont comparés au fantôme hétérogène Duke. Nous constatons que pour les deux cas, les DAS 10 g sont assez proches entre eux mais restent inférieurs à ceux du fantôme hétérogène. De plus, leurs  $DAS_{CE}$  sont également inférieurs à ceux du fantôme hétérogène (figure 5.17). Cependant, les écarts entre les deux cas et le fantôme hétérogène sont plus élevés que dans

28. Le tissu homogène est celui décrit en annexe B et utilisé dans la partie précédente 5.3.1.

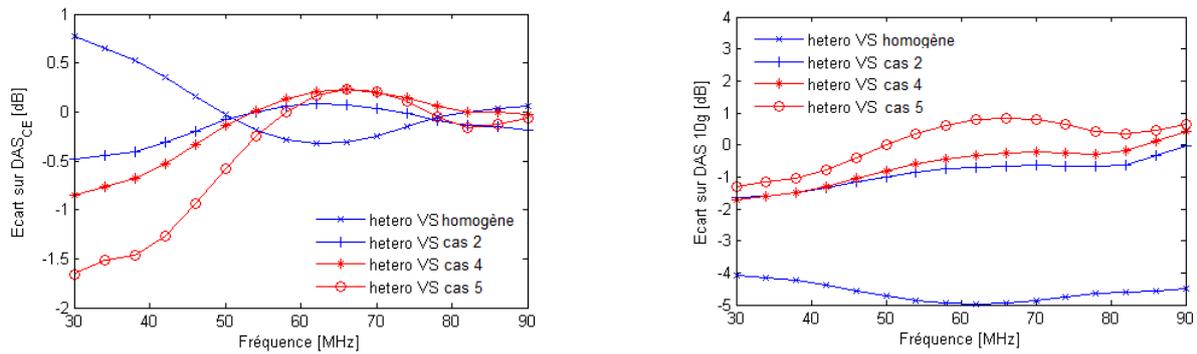


FIGURE 5.16 – Ecart sur les DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres entre le fantôme hétérogène Duke et le fantôme Duke à 3 tissus (graisse/sang/homogène intérieure) dans le fantôme Duke en onde plane

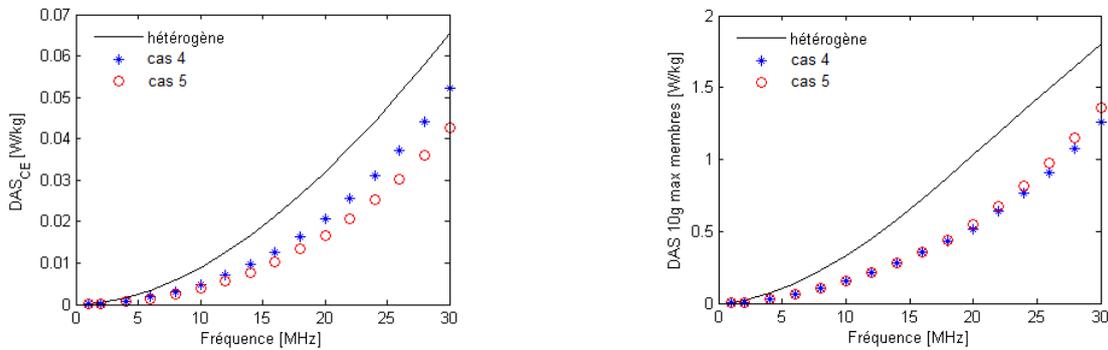


FIGURE 5.17 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres entre le fantôme hétérogène Duke et le fantôme Duke à 3 tissus (graisse/sang/homogène intérieure) lors d'une exposition en onde plane en HF

l'exposition de 30 à 90 MHz, car nous observons des écarts sur le DAS  $_{CE}$  compris entre :

- -3 et -1,5 dB pour le cas 4 ;
- -4,2 et -1,9 dB pour le cas 5.

Les écarts sur le DAS 10 g sont compris entre :

- -5,5 et -1,6 dB pour le cas 4 ;
- -5,5 et -1,2 dB pour le cas 5.

Les figures 5.18 à 5.23 présentent la répartition surfacique des DAS 10 g sur le fantôme Duke dans plusieurs cas. Nous constatons que sur les cas 4 et 5, il y a un fort DAS 10 g au bout du pied contrairement au cas hétérogène. Pour les cas 1, 2 et 3, il y a également une augmentation du DAS 10 g au bout du pied en comparaison du fantôme hétérogène. L'augmentation de DAS au bout du pied est cependant moins forte dans les cas 1, 2 et 3 que dans les cas 4 et 5.

C'est à la cheville que le DAS 10 g est le plus fort pour le fantôme hétérogène. Les cas 1 à 5 présentent aussi un DAS 10 g important à la cheville, bien que ce ne soit pas toujours le DAS 10 g max. Néanmoins, ce DAS 10 g à la cheville reste comparable à la valeur de DAS 10 g max du fantôme hétérogène, donc chacun de nos cas reste valide concernant la localisation des DAS 10 g.

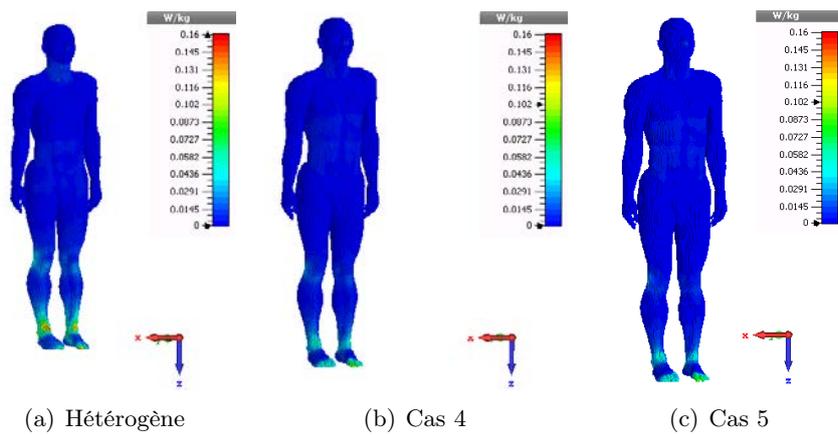


FIGURE 5.18 – Répartition surfacique du DAS 10 g sur le fantôme Duke en exposition onde plane à 8 MHz

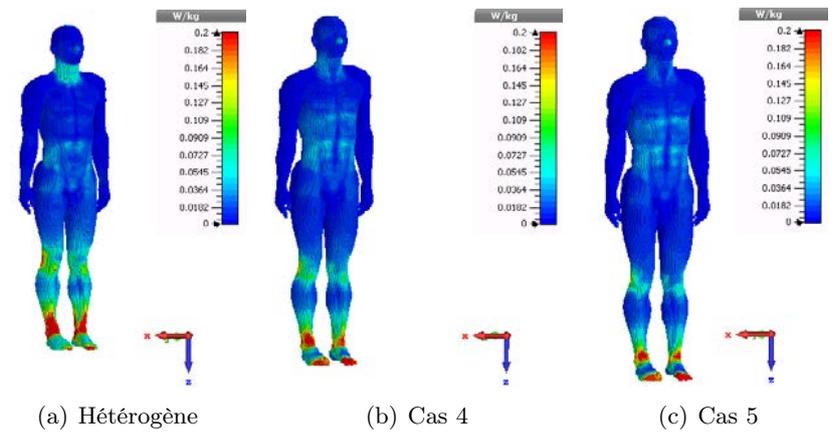


FIGURE 5.19 – Répartition surfacique du DAS 10 g sur le fantôme Duke en exposition onde plane à 18 MHz

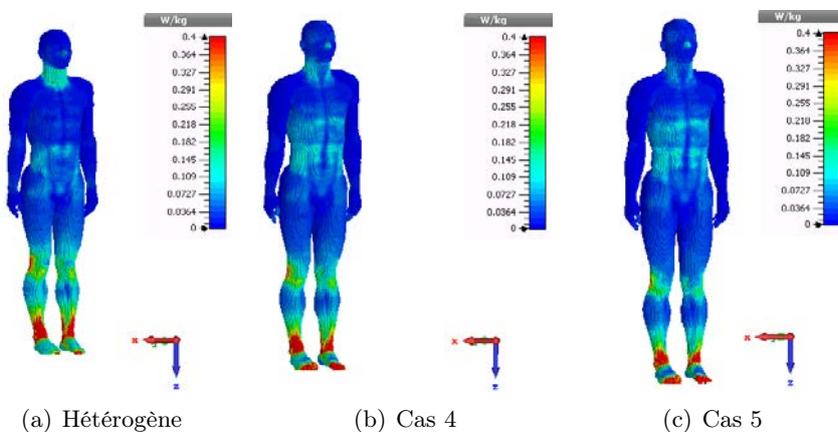


FIGURE 5.20 – Répartition surfacique du DAS 10 g sur le fantôme Duke en exposition onde plane à 28 MHz

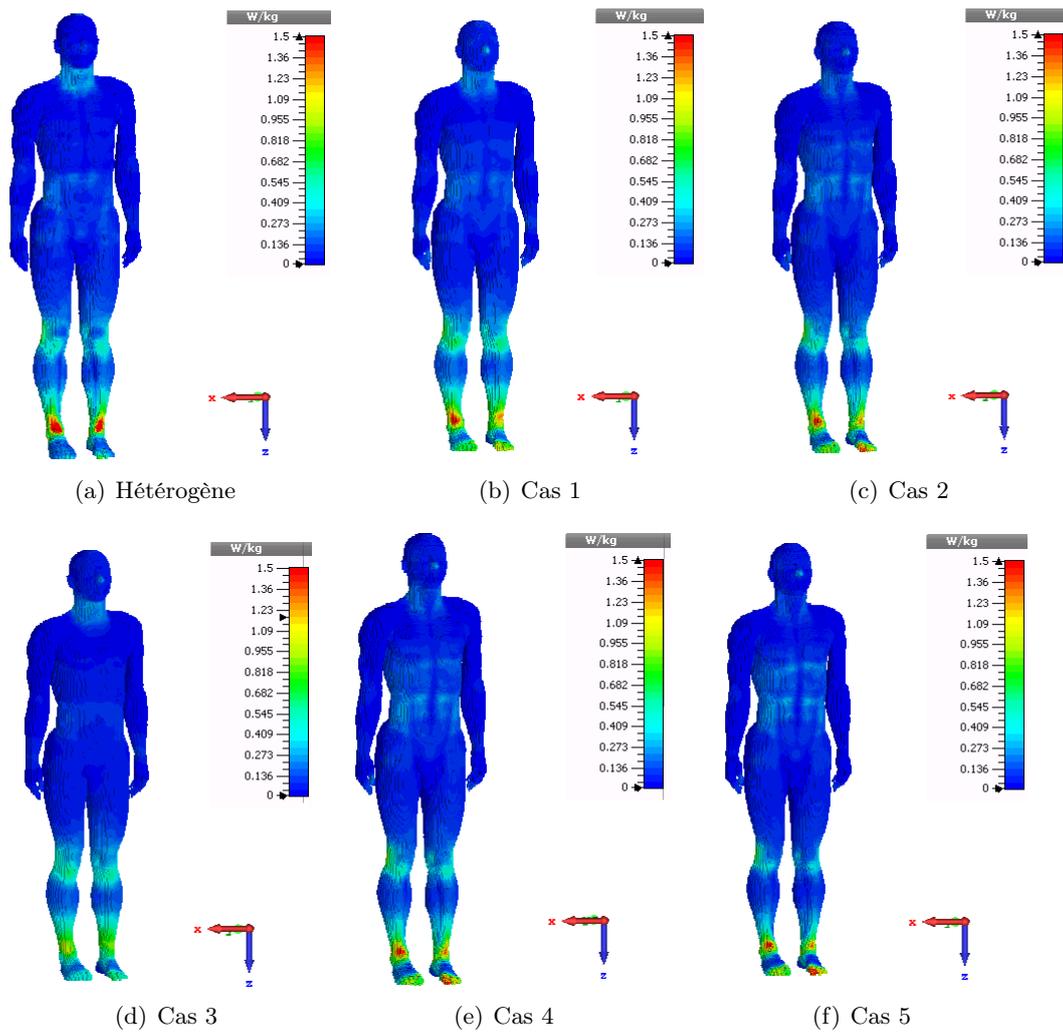


FIGURE 5.21 – Répartition surfacique du DAS 10 g sur le fantôme Duke en exposition onde plane à 38 MHz

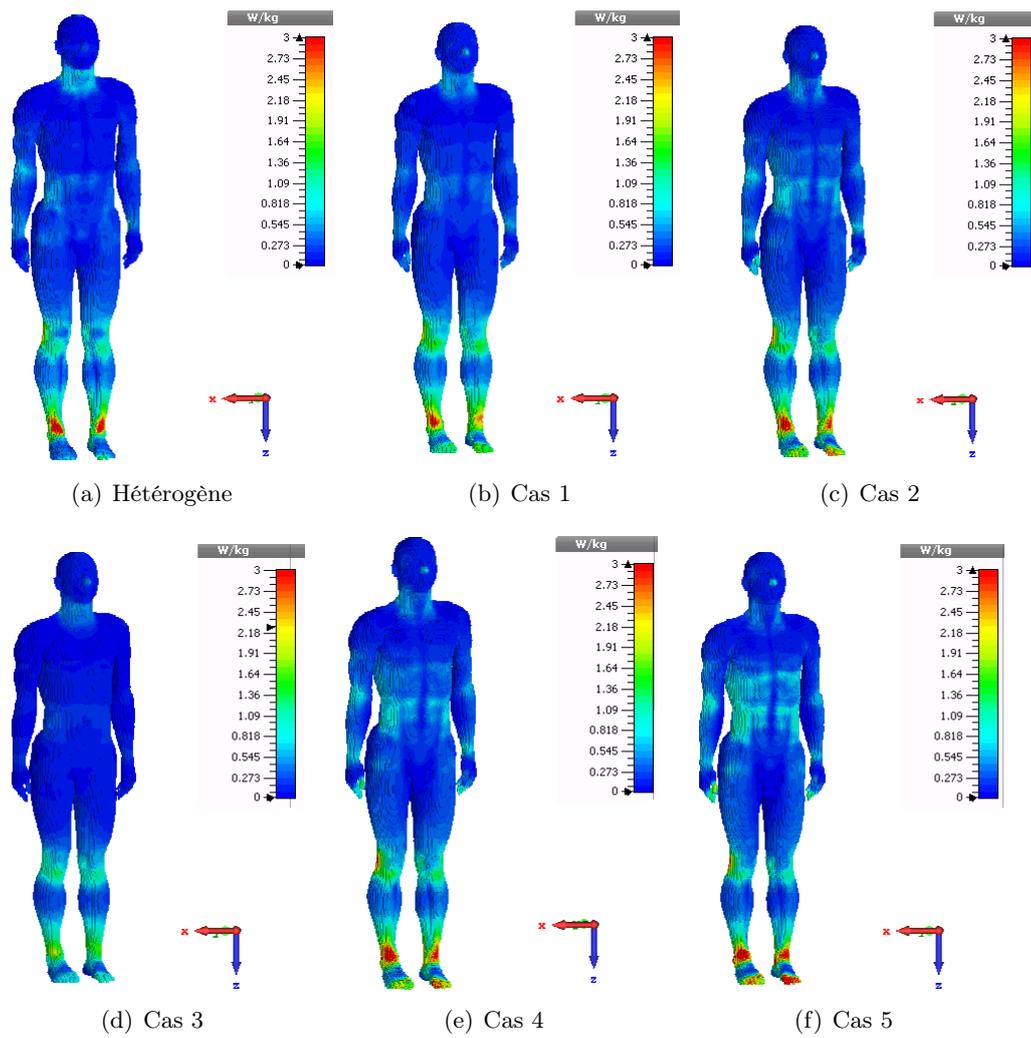


FIGURE 5.22 – Répartition surfacique du DAS 10 g sur le fantôme Duke en exposition onde plane à 62 MHz

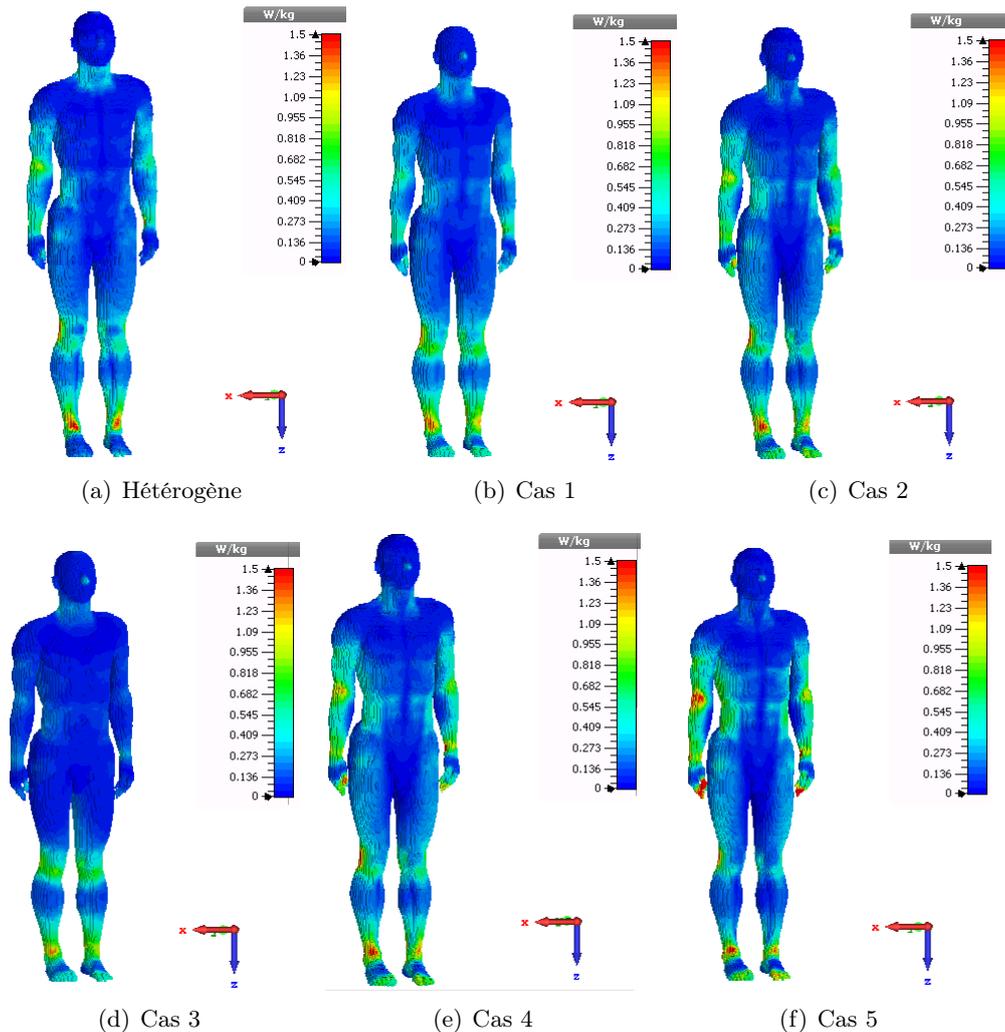


FIGURE 5.23 – Répartition surfacique du DAS 10 g sur le fantôme Duke en exposition onde plane à 86 MHz

### 5.3.3.2 Exposition à un champ haute impédance

Comme dans le chapitre 4.3.3.1, le fantôme Duke est maintenant exposé à une champ haute impédance entre 1 et 10 MHz. Ce champ est créé par deux plaques conductrices parallèles. Seuls les cas 4, 5 et hétérogène sont étudiés pour cette exposition.

Nous constatons que le  $DAS_{CE}$  du cas 5 est le plus faible et que celui du cas 4 reste inférieur à celui de l'hétérogène (figure 5.24). Les DAS 10 g des cas 4 et 5 sont identiques et restent inférieurs à ceux du fantôme hétérogène. Les écarts entre les cas 4 et 5 et le fantôme hétérogène sont compris entre :

- Cas 4 : -1,8 et -1,2 dB pour le  $DAS_{CE}$  et entre -4,9 et -2,5 dB pour le DAS 10 g ;
- Cas 5 : -3,6 et -2,5 dB pour le  $DAS_{CE}$  et entre -4,4 et -2,5 dB pour le DAS 10 g (figure 5.25).

Les écarts constatés sont plus faibles que ceux relevés en exposition onde plane entre 1 et 10 MHz, mais ils restent du même ordre de grandeur. Ces résultats nous montrent que la même simplification du fantôme Duke hétérogène par un fantôme Duke n'ayant que trois tissus différents est à la fois envisageable pour une exposition en onde plane et pour une exposition à un champ haute impédance.

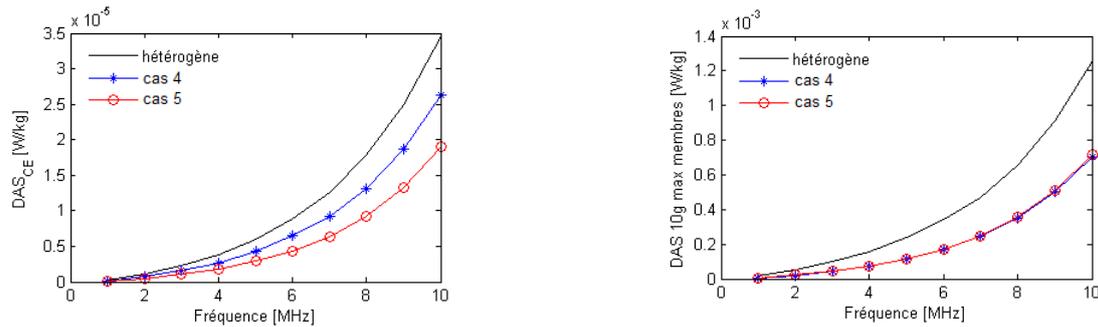


FIGURE 5.24 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour une combinaison de 3 tissus (graisse/muscle/*homogène intérieure*) dans le fantôme Duke en champ haute impédance

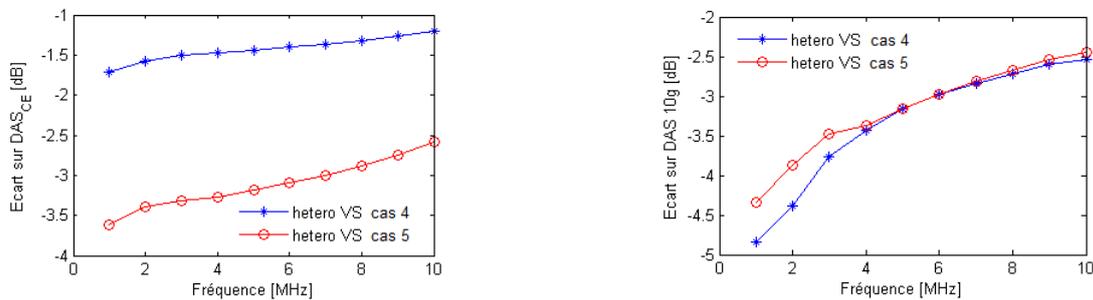


FIGURE 5.25 – Ecart sur les DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres entre le fantôme hétérogène Duke et le fantôme Duke à 3 tissus (graisse/sang/*homogène intérieure*) en champ haute impédance

### 5.3.3.3 Exposition à un champ rayonné par une antenne placée sur un véhicule

Nous nous intéressons à une exposition réaliste dans cette section (figure 5.26). Le fantôme Duke est exposé au champ rayonné par une antenne électrique placée sur le toit d'un véhicule. Le fantôme est placé à 20 cm de l'arrière du véhicule et à 2 cm au-dessus du sol pour modéliser l'isolation due à la semelle en caoutchouc d'une chaussure de militaire (configuration similaire à celle de la section 4.3.3.3). En HF (de 1 à 30 MHz), l'antenne mesure 5 m alors qu'en VHF (de 30 à 90 MHz), elle mesure 2,5 m. Comme en exposition en haute impédance, seuls les cas 4,5 et hétérogène sont comparés. La puissance fournie à l'antenne est de 0,5 W et les résultats en DAS présentés dans cette partie sont normalisés à 1 W de puissance absorbée par le corps. Les pertes d'adaptation de l'antenne ont bien été prises en compte pour les calculs de DAS.

En VHF, nous constatons que les  $DAS_{CE}$  des cas 4 et 5 sont proches de celui de l'hétérogène

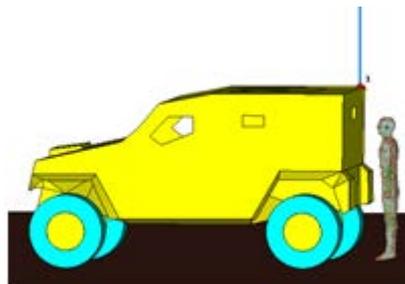


FIGURE 5.26 – Schéma d'exposition du fantôme Duke au champ rayonné par une antenne électrique placée sur le toit d'un véhicule

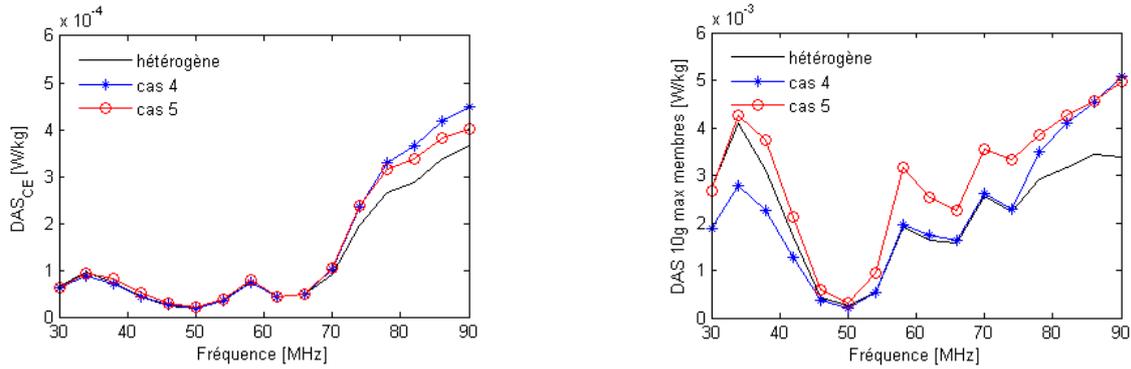


FIGURE 5.27 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour une combinaison de 3 tissus (graisse/muscle/homogène intérieur) dans le fantôme Duke en champ rayonné par une antenne VHF

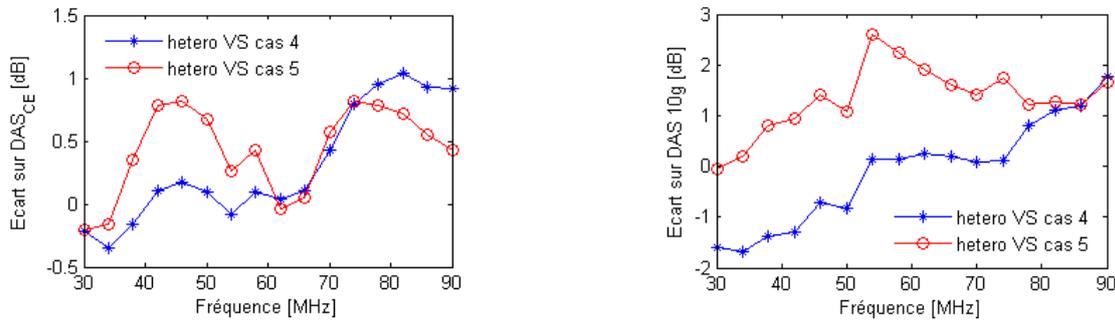


FIGURE 5.28 – Écarts sur les DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres entre le fantôme hétérogène Duke et le fantôme Duke à 3 tissus (graisse/sang/homogène intérieur) en champ rayonné par une antenne VHF

(figure 5.27). Les écarts avec l'hétérogène varient entre :

- -0,4 et 1 dB pour le cas 4;
- -0,2 et 0,9 dB pour le cas 5 (figure 5.28).

Pour le DAS 10 g, ces écarts varient entre :

- -1,7 et 1,8 dB pour le cas 4;
- 0 et 2,7 dB pour le cas 5.

En comparant ces écarts à ceux issus de l'exposition en onde plane, nous remarquons qu'ils sont plus faibles sur les  $DAS_{CE}$  alors qu'ils sont plus élevés sur les DAS 10 g qu'en exposition onde plane, bien qu'ils restent du même ordre de grandeur.

En HF, nous constatons que les  $DAS_{CE}$  des cas 4 et 5 sont inférieurs à ceux de l'hétérogène, hormis à 18 MHz (figure 5.29). Les écarts avec l'hétérogène varient entre :

- -1,2 et 0,5 dB pour le cas 4;
- -3,2 et 2 dB pour le cas 5 (figure 5.30).

Pour le DAS 10 g, ces écarts varient entre :

- -4 et 4 dB pour le cas 4;
- -3,2 et 4 dB pour le cas 5.

Nous pouvons noter un pic à 18 MHz sur la figure 5.30 présentant les écarts entre le cas hétérogène et les cas 4 et 5. Cela s'explique par la polarisation du champ électrique. Nous avons constaté qu'à 18 MHz, la polarisation du champ électrique au niveau du fantôme est horizontale (cf. orientation du champ E entre les deux roues du véhicule en figure 5.31b) alors que pour les autres fréquences, elle est verticale (figures 5.31a et 5.31c, exemples à 16 MHz et 20 MHz). Ce changement de polarisation entraîne une absorption différente du corps (cf. section 1.2.2.2). Le DAS 10 g max situé à la cheville

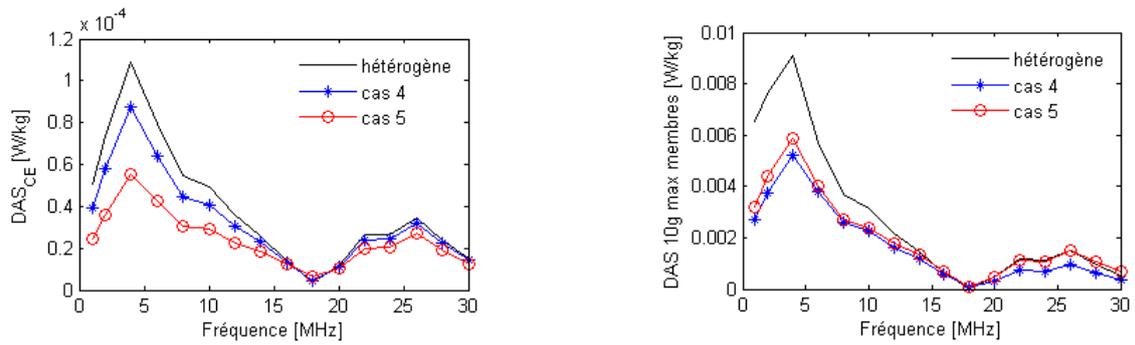


FIGURE 5.29 – Comparaison des DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres pour une combinaison de 3 tissus (graisse/muscle/*homogène intérieur*) dans le fantôme Duke en champ rayonné par une antenne HF

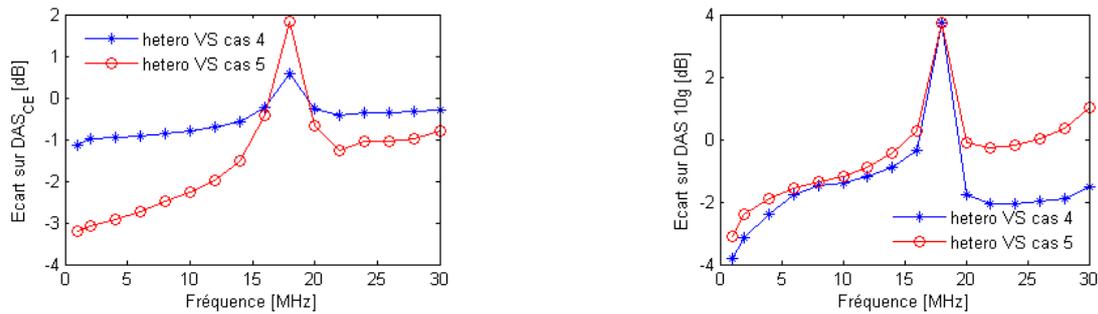


FIGURE 5.30 – Ecart sur les DAS corps entier et DAS 10 g max dans les membres entre le fantôme hétérogène Duke et le fantôme Duke à 3 tissus (graisse/sang/*homogène intérieur*) dans le fantôme Duke en champ rayonné par une antenne HF

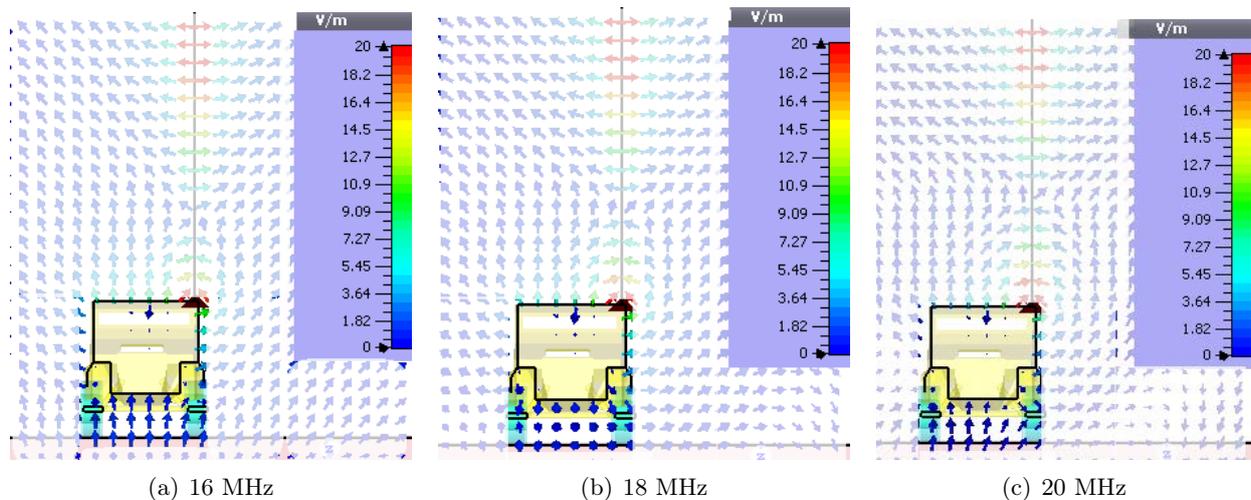
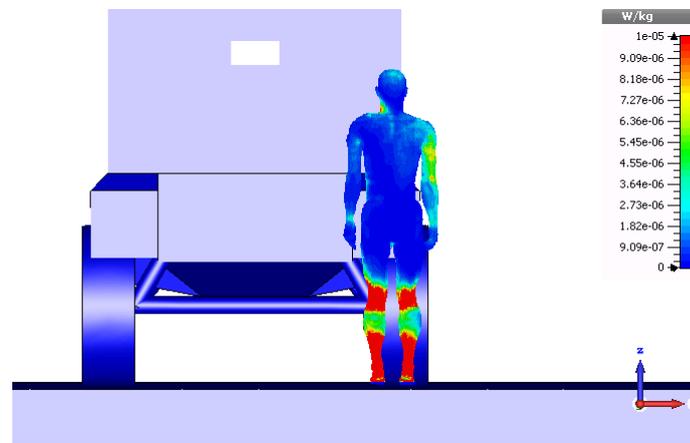


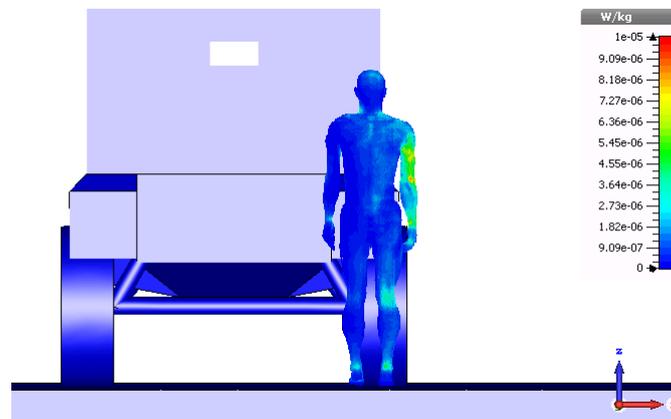
FIGURE 5.31 – Polarisation du champ électrique - Exposition au champ rayonné par l'antenne HF placée sur le toit d'un véhicule

pour la polarisation verticale, se situe sur le bras pour la polarisation horizontale à 18 MHz (figure 5.32).

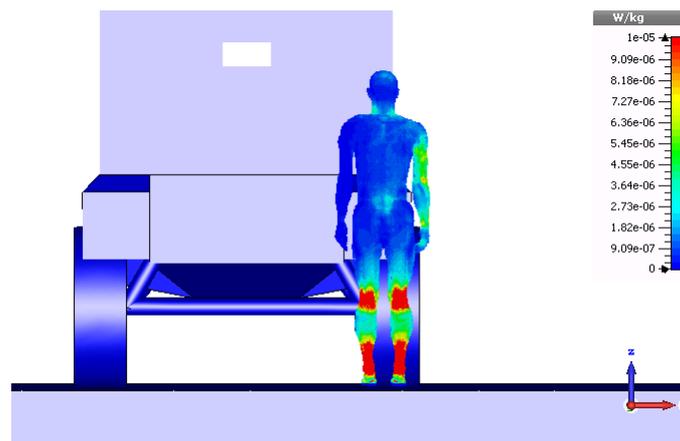
Nous rappelons que cette simplification de l'hétérogène n'est développée que pour des expositions dont la polarisation est verticale. C'est pourquoi nous nous sommes particulièrement intéressés aux tissus constituant les jambes et chevilles du fantôme. Si nous avions voulu développer une combinaison de tissus pour des polarisations horizontales, comme le DAS 10 g max n'apparaît pas à la cheville, nous n'aurions pas forcément choisi les mêmes tissus qu'en polarisation verticale.



(a) 16 MHz



(b) 18 MHz



(c) 20 MHz

FIGURE 5.32 – Distribution en DAS sur le fantôme hétérogène - Exposition au champ rayonné par l'antenne HF placée sur le toit d'un véhicule

### 5.3.3.4 Evolution de l'hétérogène simple à 3 tissus

Grâce aux différents résultats obtenus pour la combinaison à 3 tissus, nous avons sélectionné le cas 5 :

- **1<sup>ère</sup> couche** : composée de graisse sur une épaisseur de 5 mm ;
- **2<sup>ème</sup> couche** : composée de sang dont la conductivité est multipliée par 2 sur une épaisseur de 5 mm ;
- **3<sup>ème</sup> couche ou reste du corps** : composée d'un tissu homogène spécifique aux tissus composant l'intérieur du corps du fantôme Duke.

Nous souhaiterions cependant modifier cette combinaison (en changeant notamment la conductivité et/ou la permittivité relative des tissus des deux premières couches), pour obtenir à la fois :

- des écarts avec l'hétérogène compris entre 0 et 3 dB ;
- un hétérogène simple ayant des DAS 10 g toujours supérieurs à ceux de l'hétérogène (besoin industriel pour la validation d'équipements radioélectriques).

Sur le même principe que précédemment, nous faisons donc évoluer la conductivité des tissus des deux premières couches pour essayer d'atteindre cet objectif. Les différents cas sont présentés dans le tableau 5.2. Les valeurs de permittivité et de conductivité des tissus graisse, sang et homogène intérieur ont été données précédemment (figure 5.13).

| Modification des combinaisons à 3 tissus | 1 <sup>ère</sup> couche           | 2 <sup>ème</sup> couche                                  | 3 <sup>ème</sup> couche |
|--|-----------------------------------|--|-------------------------|
| i  | Graisse dont $\sigma_{graisse}/2$ | Sang   | Homogène intérieur      |
| ii                                       | Graisse dont $\sigma_{graisse}/6$ | Sang   | Homogène intérieur      |
| iii                                      | Graisse                           | Sang dont $\epsilon_{r_{sang}}/2$                        | Homogène intérieur      |
| iv                                       | Graisse                           | Sang dont $\epsilon_{r_{sang}}/4$ et $\sigma_{sang} * 4$ | Homogène intérieur      |
| v  | Graisse dont $\sigma_{graisse}/6$ | Sang dont $\epsilon_{r_{sang}}/4$ et $\sigma_{sang} * 6$ | Homogène intérieur      |
| vi                                       | Graisse dont $\sigma_{graisse}/4$ | Sang dont $\epsilon_{r_{sang}}/4$ et $\sigma_{sang} * 4$ | Homogène intérieur      |

TABLE 5.2 – Modifications de la combinaison à trois tissus testées pour réduire les écarts avec le fantôme hétérogène pour une exposition en onde plane entre 1 et 30 MHz

Nous choisissons pour ces cas une exposition en onde plane polarisée verticalement de face en espace libre sur le fantôme Duke entre 1 et 30 MHz. Les figures 5.33 à 5.36 présentent les valeurs de  $DAS_{CE}$ , de DAS 10 g max pour les cas i à vi ainsi que les écarts avec le fantôme hétérogène. En modifiant uniquement la conductivité de la graisse (cas i et ii), nous obtenons toujours un  $DAS_{CE}$  inférieur à celui de l'hétérogène avec des écarts minimaux de 1,1 à 2,6 dB. Le DAS 10 g max est également inférieur à celui de l'hétérogène et les écarts minimaux sont compris entre 0 et 2,7 dB. C'est le cas ii qui présente les écarts les plus faibles sur les DAS, notamment entre 1 et 10 MHz. Au-delà de 10 MHz, ces deux cas présentent des écarts équivalents.

En modifiant uniquement la conductivité et/ou la permittivité du sang (cas iii et iv), nous obtenons un  $DAS_{CE}$  inférieur à celui de l'hétérogène avec des écarts minimaux compris entre 0,7 et 3 dB. C'est le cas iii qui présente ces écarts minimaux. Pour le cas iv, le DAS 10 g est inférieur à celui de l'hétérogène sur quasiment toute la bande de fréquence (exception à 30 MHz), alors que le cas iii a ses valeurs de DAS 10 g toujours inférieures à celles de l'hétérogène sur toute la bande. Les écarts minimaux sont obtenus avec le cas iv et sont compris entre 5 et 0,2 dB.

En modifiant à la fois les propriétés (conductivité et permittivité relative) de la graisse et du sang (cas v et vi), nous observons un  $DAS_{CE}$  inférieur sur toute la bande à celui de l'hétérogène. Les écarts minimaux entre 1 et 6 MHz sont relevés dans le cas v et sont compris entre 4,7 et 5,4 dB, alors qu'au-delà de 6 MHz, ils sont relevés dans le cas vi et sont compris entre 4,6 et 5,6 dB. Le DAS 10 g max reste inférieur à celui de l'hétérogène pour les deux cas jusqu'à 28 MHz. Les écarts avec l'hétérogène sur le DAS 10 g sont très proches entre les cas v et vi, bien qu'ils soient légèrement plus faibles avec le cas v.

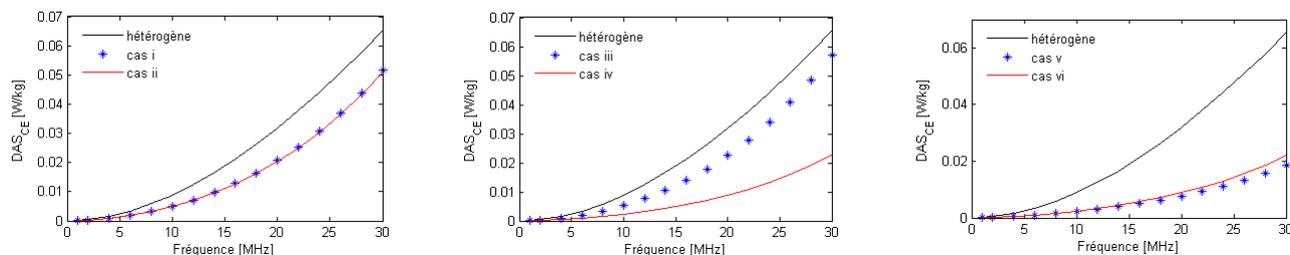


FIGURE 5.33 – DAS corps entier pour les cas i à vi en exposition onde plane sur le fantôme Duke

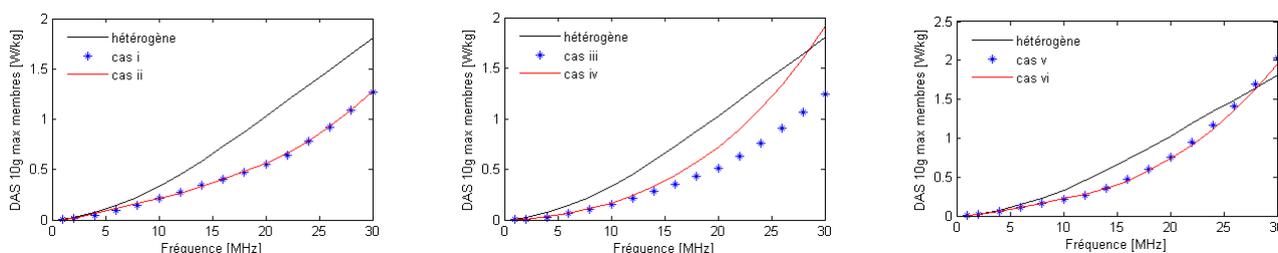


FIGURE 5.34 – DAS 10 g membres pour les cas i à vi en exposition onde plane sur le fantôme Duke

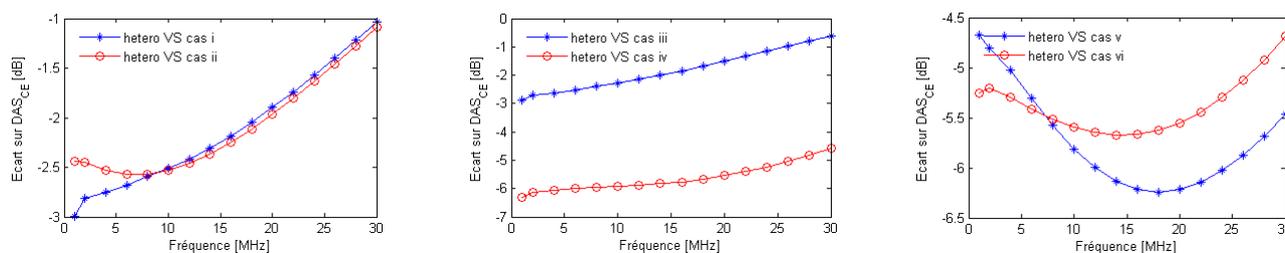


FIGURE 5.35 – Ecart sur les DAS corps entier pour les cas i à vi en exposition onde plane sur le fantôme Duke

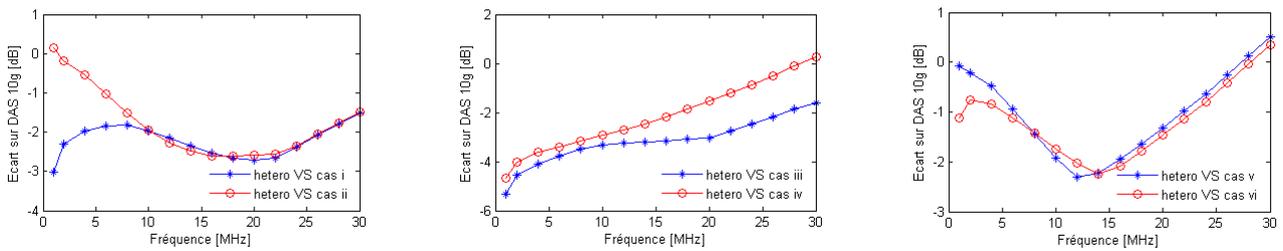


FIGURE 5.36 – Ecarts sur les DAS 10 g membres pour les cas i à vi en exposition onde plane sur le fantôme Duke

Nous constatons que selon la fréquence d'exposition, certaines modifications de conductivité et de permittivité permettent de se rapprocher des valeurs de DAS de l'hétérogène. Il faudrait donc pouvoir appliquer des modifications de conductivité et ou permittivité fréquence par fréquence : par exemple vouloir multiplier la conductivité par un facteur  $n_1$  en fréquence  $f_1$ , par un facteur  $n_2$  en fréquence  $f_2$  et par un facteur  $n_3$  en fréquence  $f_3$ .

Nous présentons dans le tableau 5.3, un exemple où la conductivité de la 2<sup>ème</sup> couche a été modifiée fréquence par fréquence. Ces données ont ensuite été rentrées dans le logiciel de simulation. Le problème majeur rencontré avec ces modifications fréquence par fréquence est l'ajustement des données effectué par le logiciel : le logiciel calcule une fonction d'interpolation pour modéliser les données rentrées sur une bande de fréquence choisie (ici les propriétés conductrices des matériaux). Mais dans notre cas où nous souhaitons ajuster la conductivité des tissus fréquence par fréquence, le calcul d'une fonction d'interpolation par le logiciel n'est pas adapté en raison des différences entre les données rentrées et l'interpolation (figure 5.37).

| Fréquence f [MHz] | Permittivité relative | Conductivité [S/m]   |
|-------------------|-----------------------|----------------------|
| 1                 | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 7$  |
| 5,95              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 12$ |
| 10,9              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 13$ |
| 15,85             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 15$ |
| 20,8              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 12$ |
| 25,75             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 9$  |
| 30,7              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 7$  |
| 35,65             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 7$  |
| 40,6              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 6$  |
| 45,55             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 5$  |
| 50,5              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 4$  |
| 55,45             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 60,4              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 65,35             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 70,3              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 75,25             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 80,2              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 85,15             | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 90,1              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 95,5              | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |
| 100               | $\epsilon_{r_{sang}}$ | $\sigma_{sang} * 3$  |

TABLE 5.3 – Exemple de changement de propriétés diélectriques pour le tissu représentant la 2<sup>ème</sup> couche, donc ici représente les voxels de muscle associés aux propriétés du sang

En raison de nos moyens peu adaptés, nous n'avons donc pas pu aboutir à une combinaison de 3 tissus répondant à toutes nos exigences. Pour pouvoir appliquer ces modifications fréquence par fréquence, il aurait fallu faire de nombreuses simulations fréquence par fréquence afin de trouver les

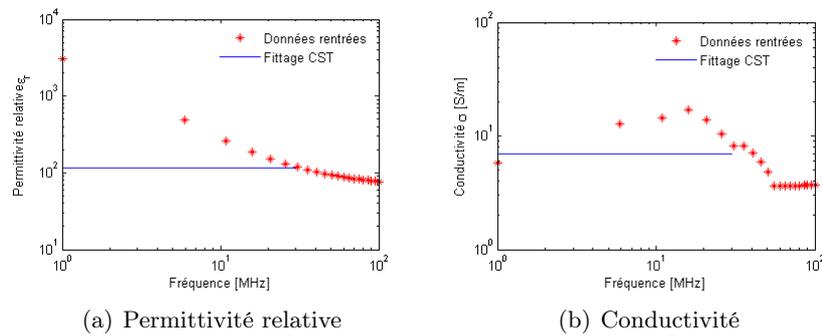


FIGURE 5.37 – Exemple de changement de propriétés du tissu constituant la 2<sup>ème</sup> couche correspondant aux valeurs données dans le tableau 5.3 et comparaison avec le refittage des données entre 1 et 30 MHz par le logiciel CST Microwave

propriétés diélectriques des trois tissus nous permettant d’avoir des résultats en DAS satisfaisants par rapport au cas hétérogène. Idéalement, il aurait fallu avoir soit un logiciel permettant d’appliquer directement au modèle les données rentrées sans passer par une fonction d’interpolation intermédiaire.

Cependant nos résultats montrent que le modèle hétérogène à trois tissus permet de modéliser un fantôme hétérogène classique, car la répartition et l’ordre de grandeur des DAS sont similaires.

## 5.4 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre une nouvelle méthode d’évaluation rapide du DAS corps entier et du DAS 10 g max à partir du champ électrique appliqué. Les évaluations données ne sont pas exactes, mais permettent de connaître rapidement les éventuels risques de surexposition électromagnétique pour des expositions en onde plane.

De plus, nous proposons dans ce chapitre une combinaison de trois tissus permettant de calculer les DAS corps entier et DAS 10 g tout en gardant une bonne corrélation avec un fantôme hétérogène de plus de 70 tissus. Cela permet d’envisager le développement de fantômes physiques utilisables pour des mesures de DAS en bandes HF et VHF.



# Conclusions et Perspectives

Les travaux effectués durant cette thèse ont porté sur l'analyse des phénomènes physiques intervenant dans le corps humain lors d'une exposition électromagnétique en bandes HF et VHF.

Dans le chapitre 1, nous avons constaté que de nombreuses normes sont applicables dans ces bandes de fréquences, bien qu'elles aient été, à l'origine, fondées sur des études animales extrapolées directement à l'homme et réalisées à des fréquences supérieures. Nous avons également constaté qu'il n'existe actuellement pas de moyen de mesure dosimétrique pour des fréquences inférieures à 300 MHz.

En raison du nombre important de fantômes numériques de l'humain disponibles dans la littérature, nous avons étudié dans le chapitre 2 des fantômes hétérogènes et homogènes de l'humain, de morphologie et de sexe différents. Cela nous a permis de constater qu'en fréquences HF et VHF, la présence de graisse en surface d'un fantôme tend à faire augmenter les valeurs de DAS 10 g, alors que la présence de peau en surface peut faire diminuer ces valeurs de DAS 10 g. Pour la suite de nos travaux, nous avons donc choisi d'utiliser le fantôme Duke de la Virtual Family [3] (résolution de 5 mm) plutôt que le fantôme Hugo [51] (résolution de 4 mm), car contrairement à ce dernier dont la surface est composée uniquement de graisse, sa surface est composée à la fois de peau et de graisse.

Dans le chapitre suivant (chapitre 3), nous avons étudié le comportement thermique du corps lors d'une exposition électromagnétique en onde plane en HF et VHF.

Nous avons constaté que pour des valeurs de champ électrique inférieures aux niveaux de référence de l'ICNIRP [7], la température se stabilise au bout de 30 min d'exposition. De plus, la température ambiante n'a aucune influence sur l'élévation de température, car le corps ajuste de lui-même ses mécanismes de thermorégulation pour maintenir sa température constante.

Enfin, nous avons caractérisé dans ce chapitre, la température du corps entier par la température moyenne du sang sur tout le corps, afin de quantifier les effets du DAS corps entier. Cela nous a permis de constater que durant une exposition électromagnétique, les élévations locales de températures sont bien plus importantes que l'élévation de la température globale du corps : en effet, on atteint plus rapidement une élévation locale de 8 °C qu'une élévation de 1 °C sur le corps.

Les travaux du chapitre 4 ont montré que du point de vue DAS, le corps isolé (sans aucun contact avec des surfaces conductrices) est sensible à la partie électrique du champ électromagnétique, alors que le corps en contact avec des surfaces conductrices (de manière à former une boucle de courant) est sensible à la partie magnétique du champ électromagnétique. En prenant en compte les conditions opérationnelles, cela a permis de définir le cas isolé comme le pire cas d'exposition.

En étudiant le comportement d'antenne du corps isolé en fréquences HF et VHF lors d'une exposition en onde plane polarisée verticalement, nous avons développé un circuit de Thévenin équivalent permettant d'évaluer la tension à mi-hauteur dans le corps ainsi que son impédance. En se basant sur ce circuit, nous pouvons calculer les courants induits le long du corps et plus particulièrement entre les pieds et le torse.

Nous avons également proposé dans ce chapitre, des formules permettant de calculer pour la première fois, le DAS corps entier, le DAS 10 g maximal dans les membres et le DAS 10 g maximal dans la tête & le tronc à partir de valeurs de courant induit le long du corps avec une précision inférieure à 3 dB. Nous avons validé ces formules pour différents types d'exposition : champ d'impédance quelconque, onde plane et champ rayonné par une antenne.

Ces formules de calculs permettent d'envisager un moyen de mesure de courants induits pour l'évaluation des DAS. Ce moyen de mesure serait, par exemple, applicable sur des antennes équivalentes à l'être humain en courant induit.

Enfin dans le dernier chapitre (chapitre 5), en nous basant sur les résultats des chapitres précédents, nous proposons une nouvelle méthode analytique d'évaluation des DAS corps entier et 10 g.

Cette méthode est pour l'instant applicable uniquement à des expositions en onde plane polarisée verticalement. A partir des valeurs de champ électrique, elle permet d'évaluer avec une précision inférieure à 3 dB, les valeurs de DAS corps entier et de DAS 10 g dans un fantôme homogène entre 50 et 90 MHz.

Nous proposons également dans ce chapitre de simplifier les tissus des fantômes hétérogènes, en remplaçant ces tissus par seulement trois tissus. En plus de réduire la complexité de ces fantômes, cela permet d'envisager le développement de fantômes physiques utilisables pour des mesures de DAS et particulièrement adaptés aux fréquences HF et VHF.

Nous avons ainsi montré qu'avec un fantôme hétérogène simplifié ne comportant que trois tissus différents, il est possible de couvrir de façon pertinente le comportement électromagnétique d'un fantôme hétérogène classique, et ce pour plusieurs types d'exposition : onde plane et champ proche.

Contrairement aux fantômes hétérogènes classiques, il devient envisageable avec ce modèle hétérogène simplifié de concevoir des fonctions de transfert entre les courants induits et les DAS corps entier et 10 g. Ces fonctions seraient indépendantes de la posture du fantôme. Ainsi, il deviendrait possible de développer un moyen d'évaluation de DAS corps entier et de DAS 10 g via des mesures de courant induit sur un fantôme physique. Ce fantôme physique est a priori faisable et se baserait sur notre modèle d'hétérogène simplifié.

# Bibliographie

- [1] France Ministère de la Défense. Instruction 302 143/DEF/SGA/DFP/PER5 du 18 août 2003 relative à la protection des personnes contre les effets des champs électromagnétiques émis par les équipements ou installations relevant du Ministère de la Défense. 2003.
- [2] OTAN. STANAG - Evaluation et contrôle de l'exposition du personnel aux rayonnements des fréquences radio allant de 3 kHz à 300 GHz. *Agence OTAN de normalisation*, 2003.
- [3] A. Christ, W. Kainz, E. Hahn, K. Honegger, M. Zefferer, E. Neufeld, W. Rascher, R. Janka, W. Bautz, J. Chen, B. Kiefer, P. Schmitt, H. Hollenbach, J. Shen, M. Oberle, D. Szczerba, A. Kam, J. Guag, and N. Kuster. The Virtual Family - Development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. *Physics in Medicine and Biology*, 55 :23–38, 2010.
- [4] IEEE C95.1. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. *IEEE*, 1991.
- [5] ANSI C95.1. American National Standard, Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 100 GHz. *ANSI*, 1982.
- [6] IEEE C95.1. IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. *IEEE*, 2005.
- [7] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health in Physics*, pages 494–522, 1998.
- [8] ANSI. American National Standard safety level of electromagnetic radiation with respect to personnel. *ANSI*, 1966.
- [9] P. Chadwick. Induced current densities and SARs from non-uniform, near field exposure to RF magnetic fields. *RF radiation dosimetry*, pages 321–334, 2000.
- [10] O. P. Gandhi, J.Y. Chen, and A. Riazi. Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 33 :757–767, 1986.
- [11] S. Tofani, G. d'Amore, G. Fiandino, A. Benedetto, O. P. Gandhi, and J.Y. Chen. Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 37 :96–99, 1995.
- [12] ICNIRP. Lignes directrices pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps (fréquences de 1 Hz à 100 kHz). *ICNIRP*, 2011.
- [13] R. Asayama, J. Wang, and O. Fujiwara. Quantitative relationship between whole-body averages SARs in numerical human models of pregnant women and 3-year child for far-field exposure. *Electronics and Communications in Japan*, 97, 2014.
- [14] A. Guy, J. Lin, P. Kramar, and A. Emery. Effects of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique*, 23 :492–498, 1975.
- [15] P. Kramar, C. Harris, A. Emery, and A. Guy. Acute microwave irradiation and cataract formation in rabbits and monkey. *Journal of microwave power*, 13 :239–249, 1975.
- [16] J. Elder. Ocular effects of radiofrequency energy. *BioElectromagnetics*, S6 :s148–s161, 2003.

- [17] P. Kramar, A. Emery, A. Guy, and J. Lin. The ocular effects of microwave on hypothermic rabbits : a study of microwave cataractogenic mechanisms. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 247 :155–165, 1975.
- [18] W.D. Hurt. *RF radiation dosimetry relationship to biological effects of EM fields*, chapter Absorption characteristics and measurement concepts, pages 39–52. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [19] IEEE C95.3. IEEE recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz. *IEEE*, 2002.
- [20] ANSI. Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 300 GHz. *ANSI C.95.1*, 1974.
- [21] IRPA/INIRC. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 300 kHz to 300 GHz. *Health in Physics*, 54 :115–123, 1988.
- [22] M. Repacholi and E. Cardis. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosim.*, 72 :305–312, 1997.
- [23] M. Repacholi and J. Stolwijk. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Australia*, 9 :79–84, 1991.
- [24] J. Bernhardt. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects. *Radiation and Environmental Biophysics*, 27 :1–27, 198.
- [25] IEEE. IEEE Standard for military workplaces - Force health protection regarding personnel exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C95.1*, 2014.
- [26] Y.A. Cengel. *Heat transfer : a practical approach, 2<sup>nd</sup> edition*. Mc Graw-Hill higher education, 2002.
- [27] E.R. Adair, S.A. Kelleher, G.W. Mack, and T.S. Morocco. Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz. *Bioelectromagnetics*, 19 :232–245, 1998.
- [28] K.R. Foster and L.S. Erdreich. Thermal models for microwave hazards and their role in standards development. *Bioelectromagnetics*, 20 :52–63, 1999.
- [29] D.W. Blick, E.R. Adair, W.D. Hurt, C.J. Sherry, T.J. Walters, and J.H. Merritt. Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin. *Bioelectromagnetics*, 18 :403–409, 1997.
- [30] E.R. Adair and D.R. Black. Thermoregulatory responses to RF energy absorption. *Bioelectromagnetics*, S6 :S17–S38, 2003.
- [31] A. Hirata, T. Asano, and O. Fujiwara. FDTD analysis of human body-core temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines. *Physics in Medicine and Biology*, 52 :5013–5023, 2007.
- [32] M.S. Fahim, Z. Fahim, R. Der, D.G. Hall, and J. Harman. Heat in male contraception (hot water 60 degrees c, infrared, microwave, and ultrasound. *Contraception*, 11 :549–562, 1975.
- [33] E. Berman, H.B. Carter, and D. House. Growth and development of mice offspring after irradiation in utero with 2450 MHz microwaves. *Teratology*, 30 :393–402, 1984.
- [34] E. Berman and H.B. Carter. Decreased body weight in fetal rats after irradiation with 2450-MHz CW microwaves. *Heath Phys.*, 46 :537–542, 1984.
- [35] R. MacAffee, A. Longacre, R. Bishop, J. Elder, S. ANS May, M. Holland, and R. Gordon. Absence of ocular pathology after repeated exposure of unanesthetized monkeys to 9.3 GHz microwaves. *Journal of microwave power*, 14 :41–44, 1979.
- [36] M. Balci, E. Devrim, and I. Durak. Effects of mobile phones on oxydant/antioxydant balance in cornea and lens of rats. *Curr. Eye Res.*, pages 21–25, 2007.

- [37] M. Kojima, I. Hata, K. Wake, S. Watanabe, Y. Yamanaka, Y. Kamimura, M. Taki, and K. Sasaki. Influence of anesthesia on ocular effects and temperature in rabbit eyes exposed to microwaves. *Bioelectromagnetics*, 25 :228–233, 2004.
- [38] P. Vecchia, R. Matthes, G. Ziegelberger, J. Lin, R. Saunders, and A. Swerdlow. *Exposures to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz - 300 GHz)*. ICNIRP, 2009.
- [39] SPEAG. cSARD6 – Taking SAR measurements to the next level. <https://www.speag.com/products/csard6/overview/>.
- [40] ART-Fi. ART-MAN, fast and accurate SAR measurement system. <http://www.art-fi.eu/>.
- [41] A.W. Guy. Analyses of electromagnetic fields induced in biological tissues by thermographic studies on equivalent phantom models. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 19 :205–214, 1968.
- [42] Y. Okano, K. Ito, I. Ida, and M. Takahashi. The SAR evaluation method by a combination of thermographic experiments and biological tissue-equivalent phantoms. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 48 :2094–2103, 2000.
- [43] T. Kawamura, K. Saito, S. Kikachi, M. Takahashi, and K. Ito. Specific Absorption Rate measurement of birdcage coil for 3.0 T Magnetic Resonance Imaging system employing thermographic method. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 57 :2508–2514, 2009.
- [44] C. Gabriel and P. Chadwick. Development of whole-body shell and solid phantoms for SAR and radio propagation measurement. *2nd International Conference on bioinformatics and biomedical engineering*, pages 805–807, 2008.
- [45] SPEAG. SAM V4.5 – Specific Anthropomorphic Head model (SAM Head). <https://www.speag.com/products/em-phantom/head-phantoms/sam-v4-5/>.
- [46] N. Chahat, M. Zhadobov, R. Sauleau, and K. Ito. A compact UWB antenna for on-body applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59 :1123–1131, 2011.
- [47] A.W. Guy. Analysis of electromagnetic fields induced in biological tissues by thermographic studies on equivalent phantom models. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 19 :205–214, 1971.
- [48] T. Takimoto, T. Onishi, K. Saito, M. Takahashi, S. Uebayashi, and K. Ito. Characteristics of biological tissue equivalent phantoms applied to UWB communications. *Electronics and communications in Japan (Part I : Communications)*, 90 :48–55, 2007.
- [49] H.L.J. Fisher and W.S. Snyder. Distribution of dose in the body from a source of gamma rays distributed uniformly in an organ. *ORNL-4168, Oak Ridge National Library*, 1967.
- [50] R. Kramer, M. Zankl, G. Williams, and G. Drexler. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte-Carlo methods, Part 1 : The male (ADAM) and female (EVA) adult mathematical phantoms. *GSF Bericht S-885, GSF-National Research Center for Health and Environment*, 1982.
- [51] The visible human project. *disponible en ligne : http ://www.nlm.nih.gov/research/visible/*, 1994.
- [52] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki, and Y. Yamanaka. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*, 49 :1–16, 2004.
- [53] G. Zubal, C. Harrel, E. Smith, Z. Ratner, G. Gindi, and P. Hoffer. Computerized three-dimensional segmented human anatomy. *Medical Physics*, 21 :299–302, 1994.
- [54] P.J. Dimbylow. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Physics in Medicine and Biology*, 42 :479–490, 1997.

- [55] M. Zankl, N. Petoussi-Henss, U. Fill, and D. Regulla. The application of voxel phantoms to the internal dosimetry of radionuclides. *Radiation Protection Dosimetry*, 105 :539–548, 2003.
- [56] N. Petoussi-Henss, M. Zankl, U. Fill, and D. Regulla. The GSF family of voxel phantoms. *Physics in Medicine and Biology*, 47 :89–106, 2002.
- [57] P.J. Dimbylow. Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption rate (SAR) in the female voxel model, NAOMI. *Physics in Medicine and Biology*, 50 :4053–4063, 2005.
- [58] A. Lee, W.Y. Choi, M.S. Chung, H.D. Choi, and J.I. Choi. Development of Korean male body model for computational dosimetry. *ETRI Journal*, 28 :107–110, 2006.
- [59] C.H. Kim, S.H. Choi, J.H. Jeong, C. Lee, and M.S. Chung. Hdrk-man : a whole body voxel model based on high resolution color slice images of a Korean adult male cadaver. *Physics in Medicine and Biology*, 53 :4093–4106, 2008.
- [60] J. Becker, M. Zankl, U. Fill, and C. Hoeschen. Katja - the 24th week of virtual pregnancy for dosimetric calculations. *Polish journal of Medical Physics and Engineering*, 14 :13–19, 2008.
- [61] A. Christ, G. Schlid, R. Djafarzadeh, R. Überbacher, S. Cecil, M. Zefferer, E. Neufel, M. Lichsteiner, M. Bouterfas, and N. Kuster. Numerische Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate bei Ganzkörperexposition von Kindern : Abschlussbericht. *Rapport technique, IT'IS Foundation, Zürich, Suisse*, juillet 2009.
- [62] T. Wu, L. Tan, Q. Shao, C. Zhang, Y. Li, E. Conil, A. Hadjem, J. Wiart, B. Lu, L. Xiao, N. Wang, Yi Xie, and S. Zhang. Chinese adult anatomical models and the application in evaluation of RF exposures. *Physics in Medicine and Biology*, 56 :2075–2089, 2011.
- [63] T. Weiland. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-components fields. *Electronics and Communication (AEÜ)*, 31 :116, 1977.
- [64] IEEE/IEC 62704-1. Draft recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate (sar) in the human body from wireless communication devices, 30 MHz - 6 GHz : General requirements for using the finite difference time domain FDTD method for SAR calculations. *IEEE*, 2013.
- [65] A. Hadjem, M.F. Wong, and J. Wiart. *Collaboration entre Thales Communications & Security et WhistLab pour des études de validation DAS*. WhistLab, 2009.
- [66] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel. The dielectric properties of biological tissues : III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in Medicine and Biology*, 41 :2271–2293, 1996.
- [67] A. Christ, T. Samaras, A. Klingenböck, and N. Kuster. Characterization of the electromagnetic near-field absorption in layered tissue in the frequency range from 30 MHz to 6000 MHz. *Physics in Medicine and Biology*, 51 :4951–4965, 2006.
- [68] K. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14 :302–307, 1966.
- [69] Pennes. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of applied physiology*, 1 :93–122, 1948.
- [70] E.H. Wissler. Pennes'1948 paper revisited. *Journal of applied physiology*, 85 :35–41, 1998.
- [71] R.M. Cotta, B.P. Cotta, C.P. Naveiro-Cotta, and G. Cotta-Pereira. Hybrid integral transforms analysis of the bioheat equation with variable properties. *International journal of thermal sciences*, 49 :1510–1516, 2010.
- [72] D. Fiala, K.J. Lomas, and M. Stohrer. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions : the passive system. *Journal of applied physiology*, 87 :1957–1972, 1999.
- [73] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, and E. PiuZZi. Specific absorption rate and temperature elevation in a subject exposed in the far-field of RF sources operating in the 10-900 MHz range. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 50 :295–304, 2003.

- [74] A. Hirata, T. Asano, and O. Fujiwara. FDTD analysis of body-core temperature elevation in humans and animals for whole-body exposure. *Physics in Medicine and Biology*, 53 :5223–5238, 2008.
- [75] A. Hirata, H. Sugiyama, and O. Fujiwara. Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged SAR. *Progress in Electromagnetics Research*, PIER 99 :53–70, 2009.
- [76] I. Laakso and H. Akimasa. Modelling the SAR and thermoregulatory response during far-field RF exposure. *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2012.
- [77] J. Stolwijk. A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA contractor report CR-1855, NASA New Haven, Connecticut, 1971.
- [78] V. De Santis and M. Feliziani. Effects of thermoregulatory mechanisms on the eye thermal elevation produced by intense RF exposure. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, EMC 2008, 2008.
- [79] O. Gandhi and E. Aslan. Human equivalent antenna for electromagnetic fields. *Brevet US 5394164*, 1995.
- [80] R. King and S. Sandler. Electric fields and currents induced in organs of the human body when exposed to ELF and VLF electromagnetic fields. *Radio Science*, 31 :1153–1167, 1996.
- [81] R. King. The electric field induced in the human body when exposed to electromagnetic fields at 1-30 MHz on shipboard. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 46 :747–751, 1999.
- [82] R. King. Electric current and electric field induced in the human body when exposed to an incident electric field near the resonant frequency. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 48 :1537–1543, 2000.
- [83] D. Poljak, C.Y. Tham, O. Gandhi, and A. Sarolic. Human equivalent antenna model for transient electromagnetic radiation exposure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 45 :141–145, 2003.
- [84] M. Bozzetti, G. Calo, F. Lattarulo, and V. Petruzzelli. Multi-monopole model of man for SAR evaluations. *International conference on Software in Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2006.
- [85] A. Simba, A. Itou, L. Hamada, S. Watanabe, T. Arima, and T. Uno. Development of a liquid-type human-body equivalent antennas for induced ankle current measurements at VHF band. *IEEE Transactions on EMC*, 54 :565–573, 2012.
- [86] T. Yoshihide, T. Arima, P. Pormanong, S. Watanabe, and T. Uno. Development of a liquid-type human-body equivalent antenna using NaCl solution. *18th International Zurich Symposium on EMC*, 2007.
- [87] A. Hirata, O. Fujiwara, T. Nagaoka, and S. Watanabe. Estimation of whole-body averaged SAR in human models due to plane-wave exposure at resonance frequency. *IEEE Transactions on EMC*, 52 :41–48, 2010.
- [88] B. Kibret, K. Teshome, and D.T.H. Lai. Cylindrical antenna theory for the analysis of whole-body averaged specific absorption rate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 :5224–5229, 2015.
- [89] B. Kibret, K. Teshome, and D.T.H. Lai. Characterizing the human body as a monopole antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 :4384–4392, 2015.
- [90] V. De Santis, P. Beeckman, D. Lampassi, and M. Feliziani. Assessment of human body impedance for safety requirements against contact currents for frequencies up to 110 MHz. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58 :390–396, 2011.
- [91] N. Ohanessian, L. Eyraud, and G. Grange. *Théorie et technique des antennes*. Vuibert, 1973.
- [92] C.R. Paul. *Analysis of multiconductor transmission lines, 1st edition*. Wiley-Intersciences, 1994.

- [93] EN 50475. 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). 2008.
- [94] J. Frere, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras, and G. Le Cadre. Lien entre le courant induit et le débit d'absorption spécifique de 1 à 30 MHz. *18ème colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique, CEM Rennes*, 2016.
- [95] S.A. Schelkunoff. Theory of antennas of arbitrary size and shape. *Proceeding of the I.R.E.*, pages 493–521, 1941.
- [96] J.Y. Chen and O.P. Gandhi. RF currents induced in an anatomically-based model of a human for plane-wave exposures (20 - 100 mhz). *Health in Physics*, 57 :89–98, 1989.
- [97] Fred Gardiol. *Traité d'Electricité, vol.III Electromagnétisme*. Editions Georgi, 1979.
- [98] IEEE C95.1. IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. *IEEE*, 1999.

## Annexe A

# Principales limites des normes civiles IEEE et ICNIRP entre 1974 et 2005

Cette annexe regroupe les principales valeurs des restrictions de base et des niveaux de référence pour les normes civiles de l'IEEE et de l'ICNIRP.

Les tableaux A.1 à A.5 présentent les niveaux de référence préconisés par [6]. Dans le tableau A.3, le terme *contact, prise* définit la connexion électrique avec un large conducteur énergétique faite par la prise ferme du conducteur dans la main. Dans la norme IEEE [6], la surface de contact est de 15 cm<sup>2</sup> pour ce type de contact. Le terme *contact, toucher* représente un contact sur une faible surface entre le corps humain et un conducteur énergisé. Dans la norme IEEE [6], la surface de ce type de contact est supposée être de 1 cm<sup>2</sup>.

Les tableaux A.6 à A.9 présentent les niveaux de référence préconisés par [7].

Les tableaux A.10 à A.12 présentent les niveaux de référence préconisés par [12].

Les tableaux A.13 et A.14 présentent les restrictions de base préconisées par [6].

Le tableau A.15 présente les restrictions de base préconisées par [12] et les tableaux A.16 et A.17 par [7].

Les tableaux A.18 et A.19 présentent les évolutions des normes ANSI et IEEE de 1974 à 2005.

Les tableaux A.20 à A.22 présentent les évolutions des normes IRPA et ICNIRP de 1988 à 1998.

| Fréquence f [kHz]         | Niveau d'action |             | Environnement contrôlé |             |
|---------------------------|-----------------|-------------|------------------------|-------------|
|                           | B rms [mT]      | H rms [A/m] | B rms [mT]             | H rms [A/m] |
| <i>Zone tête et tronc</i> |                 |             |                        |             |
| 3 - 3,35                  | 0,687/f         | 547/f       | 2,06/f                 | 1640/f      |
| 3,35 - 5000               | 0,205           | 163         | 0,615                  | 490         |
| <i>Zone membres</i>       |                 |             |                        |             |
| 3 - 3,35                  | 3,79/f          | 3016/f      | 3,79/f                 | 3016/f      |
| 3,35 - 5000               | 1,13            | 900         | 1,13                   | 900         |

TABLE A.1 – Niveaux de référence en champ magnétique entre 3 kHz et 5 MHz - IEEE 2005 [6]

| Fréquence f [kHz] | Niveau d'action | Environnement contrôlé |
|-------------------|-----------------|------------------------|
|                   | E rms [V/m]     | E rms [V/m]            |
| 3 - 100           | 614             | 1842                   |

TABLE A.2 – Niveaux de référence en champ électrique externe entre 3 kHz et 100 kHz pour une exposition corps entier - IEEE 2005 [6]

| Courant induit et de contact [mA]   | Niveau d'action | Environnement contrôlé |
|---|-----------------|------------------------|
| <i>f est en kHz</i>   |                 |                        |
| <i>Limites s'appliquant sur le courant circulant entre le corps et un objet relié à la masse pouvant être en contact avec la personne</i> |                 |                        |
| de 3 kHz à 100 kHz  |                 |                        |
| temps moyen d'exposition = 0,2 s  |                 |                        |
| les 2 pieds   | 0,9f            | 2f                     |
| un pied   | 0,45f           | 1f                     |
| Contact, prise  | —               | 1f                     |
| Contact, toucher  | 0,167f          | 0,5f                   |
| de 100 kHz à 110 MHz  |                 |                        |
| temps moyen d'exposition = 6 min  |                 |                        |
| les 2 pieds   | 90              | 200                    |
| un pied   | 45              | 100                    |
| Contact, prise  | —               | 100                    |
| Contact, toucher  | 16,7            | 50                     |

TABLE A.3 – Niveaux de référence en courant de contact et induit (rms) pour des ondes continues sinusoïdales entre 3 kHz et 110 MHz - IEEE 2005 [6]

| Fréquence [MHz] | E rms [V/m] | H rms [A/m] | S rms de E ou H [W/m <sup>2</sup> ] | Moyenne temporelle pour  E  <sup>2</sup> ,  H  <sup>2</sup> ou S [min] |
|-----------------|-------------|-------------|-------------------------------------|--|
| 0,1 - 1         | 1842        | 16,3/ $f_M$ | (9000, 100000/ $f_M^2$ )            | 6  |
| 1 - 30          | 1842/ $f_M$ | 16,3/ $f_M$ | (9000/ $f_M^2$ , 100000/ $f_M^2$ )  | 6  |
| 30 - 100        | 61,4        | 16,3/ $f_M$ | (10, 100000/ $f_M^2$ )              | 6  |
| 100 - 300       | 61,4        | 0,163       | 10                                  | 6  |
| 300 - 3000      |             |             | $f_M/30$                            | 6  |
| 3000 - 30000    |             |             | 100                                 | 19,63/ $f_G^{1,079}$   |
| 30000 - 300000  |             |             | 100                                 | 2,524/ $f_G^{0,476}$   |

$f_M$  fréquence en MHz,  $f_G$  fréquence en GHz

*Pour certaines fréquences, il y a une limite en densité de puissance S pour le champ E et pour le champ H.*

TABLE A.4 – Niveaux de référence entre 100 kHz et 300 GHz - Environnement contrôlé - IEEE 2005 [6]

| Fréquence [MHz] | E rms [V/m]  | H rms [A/m]          | S rms de E ou H [W/m <sup>2</sup> ]   | Moyenne temporelle [min] |                                    |
|-----------------|--------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
|                 |              |                      |                                       | E  <sup>2</sup> , S      | H  <sup>2</sup>                    |
| 0,1 - 1,34      | 614          | 16,3/ $f_M$          | (1000, 100000/ $f_M^2$ )              | 6                        | 6                                  |
| 1,34 - 3        | 823,8/ $f_M$ | 16,3/ $f_M$          | (1800, 100000/ $f_M^2$ )              | $f_M^2/0,3$              | 6                                  |
| 3 - 30          | 823,8/ $f_M$ | 16,3/ $f_M$          | (1800/ $f_M^2$ ,<br>100000/ $f_M^2$ ) | 30                       | 6                                  |
| 30 - 100        | 27,5         | 158,3/ $f_M^{1,668}$ | (2, 9400000/ $f_M^{3,336}$ )          | 30                       | 0,0636/ $f_M^{1,337}$              |
| 100 - 400       | 27,5         | 0,0729               | 2                                     | 30                       | 30                                 |
| 400 - 2000      |              |                      | $f_M/200$                             |                          | 30                                 |
| 2000 - 5000     |              |                      | 10                                    |                          | 30                                 |
| 5000 - 30000    |              |                      | 10                                    |                          | 150/ $f_G$                         |
| 30000 - 100000  |              |                      | 10                                    |                          | 25,24/ $f_G^{0,476}$               |
| 100000 - 300000 |              |                      | (90 $f_G$ - 7000)/200                 |                          | 5048/(9 $f_G$ - 700) $f_G^{0,476}$ |

$f_M$  fréquence en MHz,  $f_G$  fréquence en GHz

*Pour certaines fréquences, il y a une limite en densité de puissance S pour le champ E et pour le champ H.*

TABLE A.5 – Niveaux de référence entre 100 kHz et 300 GHz - Environnement non-contrôlé - IEEE 2005 [6]

| Fréquence f      | E rms [V/m]  | H rms [A/m]      | B rms [ $\mu$ T] | S rms de l'onde plane équivalente [W/m <sup>2</sup> ] |
|------------------|--------------|------------------|------------------|---|
| jusqu'à 1 Hz     |              | 163000           | 200000           |   |
| 1 - 8 Hz         | 20000        | 1,63e5/ $f^2$    | 2e5/ $f^2$       |   |
| 8 - 25 Hz        | 20000        | 20000/ $f$       | 25000/ $f$       |   |
| 0,025 - 0,82 kHz | 500/ $f$     | 20/ $f$          | 25/ $f$          |   |
| 0,82 - 65 kHz    | 610          | 24,4             | 30,7             |   |
| 0,065 - 1 MHz    | 610          | 1,6/ $f$         | 2/ $f$           |   |
| 1 - 10 MHz       | 610/ $f$     | 1,6/ $f$         | 2/ $f$           |   |
| 10 - 400 MHz     | 61           | 0,16             | 0,2              | 10  |
| 400 - 2000 MHz   | 3 $\sqrt{f}$ | 0,008 $\sqrt{f}$ | 0,01 $\sqrt{f}$  | f/40  |
| 2 - 300 GHz      | 137          | 0,36             | 0,45             | 50  |

TABLE A.6 – Niveaux de référence pour un environnement contrôlé ou travailleur - ICNIRP 1998 [7]

| Fréquence f     | E rms [V/m]      | H rms [A/m]          | B rms [ $\mu$ T]     | S rms de l'onde plane équivalente [W/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|------------------|----------------------|----------------------|---|
| jusqu'à 1 Hz    |                  | 32000                | 40000                |   |
| 1 - 8 Hz        | 10000            | 32000/f <sup>2</sup> | 40000/f <sup>2</sup> |   |
| 8 - 25 Hz       | 10000            | 4000/f               | 5000/f               |   |
| 0,025 - 0,8 kHz | 250/f            | 4/f                  | 5/f                  |   |
| 0,8 - 3 kHz     | 250/f            | 5                    | 6,25                 |   |
| 3 - 150 kHz     | 87               | 5                    | 6,25                 |   |
| 0,15 - 1 MHz    | 87               | 0,73/f               | 0,92/f               |   |
| 1 - 10 MHz      | 87/ $\sqrt{f}$   | 0,73/f               | 0,92/f               |   |
| 10 - 400 MHz    | 28               | 0,073                | 0,092                | 2   |
| 400 - 2000 MHz  | 1,375 $\sqrt{f}$ | 0,0037 $\sqrt{f}$    | 0,0046 $\sqrt{f}$    | f/40  |
| 2 - 300 GHz     | 61               | 0,16                 | 0,2                  | 10  |

TABLE A.7 – Niveaux de référence pour un environnement non-contrôlé ou population générale - ICNIRP 1998 [7]

| Catégorie           | Fréquence         | Courant de contact max [mA], f en kHz |
|---------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Travailleurs        | jusqu'à 2,5 kHz   | 1                                     |
|                     | 2,5 - 100 kHz     | 0,4f                                  |
|                     | 100 kHz - 110 MHz | 40                                    |
| Population générale | jusqu'à 2,5 kHz   | 0,5                                   |
|                     | 2,5 - 100 kHz     | 0,2f                                  |
|                     | 100 kHz - 110 MHz | 420                                   |

TABLE A.8 – Niveaux de référence pour les courants alternatifs dus au contact avec des objets conducteurs - ICNIRP 1998 [7]

| Catégorie           | Courant [mA] |
|---------------------|--------------|
| Travailleurs        | 100          |
| Population générale | 45           |

TABLE A.9 – Niveaux de référence pour un courant induit dans un membre entre 10 et 110 MHz - ICNIRP 1998 [7]

| Fréquences     | E [kV/m] | H [A/m] | B [T] |
|----------------|----------|---------|-------|
| 3 kHz - 10 MHz | 0,17     | 80      | 1e-4  |

*Il faut également tenir compte des recommandations de l'ICNIRP 1998*

TABLE A.10 – Niveaux de référence pour les travailleurs - ICNIRP 2011 [12]

| Fréquences     | E [kV/m] | H [A/m] | B [T]  |
|----------------|----------|---------|--------|
| 3 kHz - 10 MHz | 0,083    | 21      | 2,7e-5 |

*Il faut également tenir compte des recommandations de l'ICNIRP 1998*

TABLE A.11 – Niveaux de référence pour la population générale - ICNIRP 2011 [12]

| Catégorie           | Fréquences       | Courant contact max |
|---------------------|------------------|---------------------|
| Travailleurs        | 100 kHz - 10 MHz | 40 mA               |
| Population générale | 100 kHz - 10 MHz | 20 mA               |

TABLE A.12 – Niveaux de référence pour les courants de contact - ICNIRP 2011 [12]

|               |            | Niveau d'action | Environnement contrôlé |
|---------------|------------|-----------------|------------------------|
| Tissu exposé  | $f_e$ [Hz] | $E_0$ rms [V/m] | $E_0$ rms [V/m]        |
| Cerveau       | 20         | 0,00589         | 0,0177                 |
| Cœur          | 167        | 0,943           | 0,943                  |
| Extrémités    | 3350       | 2,1             | 2,1                    |
| Autres tissus | 3350       | 0,701           | 2,1                    |

*$E_{int} = E_0$  si  $f < f_e$  et  $E_{int} = E_0 f / f_e$  avec  $f < 5$  MHz et  $E_{int}$  est la valeur limite de champ interne autorisée*

TABLE A.13 – Restrictions de base s'appliquant à plusieurs régions du corps entre 0 et 5 MHz - IEEE 2005 [6]

|                         |                                  | Niveau d'action DAS [W/kg] | Environnement contrôlé DAS [W/kg] |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Exposition corps entier | Moyenne sur le corps entier      | 0,08                       | 0,4                               |
| Exposition localisée    | Local (pic moyenné spatialement) | 2                          | 10                                |
|                         | Extrémités et oreilles           | 4                          | 20                                |

*DAS moyenné sur le corps entier ou sur 10 g d'un même tissu pour le local  
Les extrémités sont les bras et jambes (à partir des coudes et des genoux)*

TABLE A.14 – Restrictions de base entre 100 kHz et 3 GHz - IEEE 2005 [6]

| Travailleurs                         |                                      | Population Générale                  |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Tissus de la tête appartenant au SNC | Autres tissus de la tête et du corps | Tissus de la tête appartenant au SNC | Autres tissus de la tête et du corps |
| 0,00027f                             | 0,00027f                             | 0,000135f                            | 0,000135f                            |

*f est en Hz*

*Il faut également tenir compte des recommandations de l'ICNIRP 1998*

*SNC : Système Nerveux Central*

TABLE A.15 – Limites sur le champ électrique E interne entre 3 kHz et 10 MHz - ICNIRP 2011 [12]

| Fréquences                 | Densité de courant tête et tronc rms [mA/m <sup>2</sup> ] | DAS corps entier [W/kg] | DAS <sub>10g</sub> tête et tronc [W/kg] | DAS <sub>10g</sub> membres [W/kg] |
|----------------------------|---|-------------------------|---|-----------------------------------|
| <i>Travailleurs</i>        |   |                         |   |                                   |
| jusqu'à 1 Hz               | 40  |                         |   |                                   |
| 1 - 4 Hz                   | 40/f  |                         |   |                                   |
| 4 Hz - 1 kHz               | 10  |                         |   |                                   |
| 1 - 100 kHz                | f/100   |                         |   |                                   |
| 0,1 - 10 MHz               | f/100   | 0,4                     | 10                                      | 20                                |
| 0,01 - 10 GHz              |   | 0,4                     | 10                                      | 20                                |
| <i>Population générale</i> |   |                         |   |                                   |
| jusqu'à 1 Hz               | 8   |                         |   |                                   |
| 1 - 4 Hz                   | 8/f   |                         |   |                                   |
| 4 Hz - 1 kHz               | 2   |                         |   |                                   |
| 1 - 100 kHz                | f/500   |                         |   |                                   |
| 0,1 - 10 MHz               | f/500   | 0,08                    | 2                                       | 4                                 |
| 0,01 - 10 GHz              |   | 0,08                    | 2                                       | 4                                 |

TABLE A.16 – Restrictions de base de 0 à 10 GHz - ICNIRP 1998 [7]

| Catégorie           | Densité de puissance [W/m <sup>2</sup> ] |
|---------------------|--|
| Travailleurs        | 50                                       |
| Population générale | 10                                       |

TABLE A.17 – Restrictions de base pour la densité de puissance entre 10 et 300 GHz - ICNIRP 1998 [7]

| Fréquence f [MHz]   | Champ E rms [V/m]         | Champ H rms [A/m]          | Densité de puissance S pour (E,H) [W/m <sup>2</sup> ] | Temps moyen [min]                     |
|---|---------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|
| <i>IEEE 2005 [6]</i>  |                           |                            |   |                                       |
| 0,1-1   | 1842                      | 16,3/f                     | (9000, 100000/f <sup>2</sup> )                        | 6                                     |
| 1-30  | 1842/f                    | 16,3/f                     | (9000/f <sup>2</sup> , 100000/f <sup>2</sup> )        | 6                                     |
| 30-100  | 61,4                      | 16,3/f                     | (10, 100000/f <sup>2</sup> )                          | 6                                     |
| 100-300   | 61,4                      | 0,163                      | 10  | 6                                     |
| 300-3000  |                           |                            | f/30  | 6                                     |
| 3000-30000  |                           |                            | 100   | 19,63/f <sub>G</sub> <sup>1,079</sup> |
| 30000-300000  |                           |                            | 100   | 2,524/f <sub>G</sub> <sup>0,476</sup> |
| <i>IEEE 1999 [98] et IEEE 1991 [4]</i>  |                           |                            |   |                                       |
| 0,003-0,1   | 614                       | 163                        | (100, 1000000)  | 6                                     |
| 0,1-3   | 614                       | 16,3/f                     | (100, 10000/f <sup>2</sup> )                          | 6                                     |
| 3-30  | 1842/f                    | 16,3/f                     | (900/f <sup>2</sup> , 10000/f <sup>2</sup> )          | 6                                     |
| 30-100  | 61,4                      | 16,3/f                     | (1, 10000/f <sup>2</sup> )                            | 6                                     |
| 100-300   | 61,4                      | 0,163                      | 1   | 6                                     |
| 300-3000  |                           |                            | f/300   | 6                                     |
| 3000-15000  |                           |                            | 10  | 6                                     |
| 15000-300000  |                           |                            | 10  | 616000/√f                             |
| <i>ANSI 1982 [5]</i>  |                           |                            |   |                                       |
|   | <b>E<sup>2</sup></b>      | <b>H<sup>2</sup></b>       | <b>S [mW/cm<sup>2</sup>]</b>                          | ...                                   |
| 0,3-3   | 400000                    | 2,5                        | 100   |                                       |
| 3-30  | 4000(900/f <sup>2</sup> ) | 0,025(900/f <sup>2</sup> ) |   |                                       |
| 30-300  | 4000                      | 0,025                      | 1   |                                       |
| 300-1500  | 4000(f/300)               | 0,025(f/300)               | f/300   |                                       |
| 1500-100000   | 20000                     | 0,125                      | 5   |                                       |
| <i>f<sub>G</sub> représente la fréquence en GHz, f la fréquence en MHz</i>  |                           |                            |   |                                       |
| <i>Pour certaines fréquences, il y a une limite en densité de puissance S pour le champ E et pour le champ H.</i> |                           |                            |   |                                       |
| <i>ANSI 1982 : pas de distinction entre environnement contrôlé ou non-contrôlé</i>                                |                           |                            |   |                                       |
| <i>ANSI 1974 : pas de niveaux de référence [20]</i>   |                           |                            |   |                                       |

TABLE A.18 – Evolution des niveaux de référence entre les différentes versions de la norme C95.1 (norme de l'ANSI et de l'IEEE) de 1974 à 2005 pour un environnement contrôlé

| Fréquence f [MHz]   | Champ E rms [V/m] | Champ H rms [A/m]        | Densité de puissance S pour (E,H) [W/m <sup>2</sup> ] | Temps moyen [min]   |                           |
|---|-------------------|--------------------------|---|---|---------------------------|
|   |                   |                          |   | S,  E  <sup>2</sup>   | H  <sup>2</sup>           |
| <i>IEEE 2005 [6]</i>  |                   |                          |   |   |                           |
| 0,1-1,34  | 614               | 16,3/f                   | (1000, 100000/f <sup>2</sup> )                        | 6   | 6                         |
| 1,34-3  | 823,8/f           | 16,3/f                   | (1800/f <sup>2</sup> , 100000/f <sup>2</sup> )        | f <sup>2</sup> /0,3   | 6                         |
| 3-30  | 823,8/f           | 16,3/f                   | (1800/f <sup>2</sup> , 100000/f <sup>2</sup> )        | 30  | 6                         |
| 30-100  | 27,5              | 158,3/f <sup>1,668</sup> | (2, 9400000/f <sup>3,336</sup> )                      | 30  | 0,0636/f <sup>1,337</sup> |
| 100-400   | 27,5              | 0,0729                   | 2   | 30  | 30                        |
| 400-2000  |                   |                          | f/200   | 30  |                           |
| 2000-5000   |                   |                          | 10  | 30  |                           |
| 5000-30000  |                   |                          | 10  | 150/f <sub>G</sub>  |                           |
| 30000-100000  |                   |                          | 10  | 25,24/f <sub>G</sub> <sup>0,476</sup>                         |                           |
| 100000-300000   |                   |                          | (90f <sub>G</sub> -7000)/200                          | 5048/[(9f <sub>G</sub> -700)f <sub>G</sub> <sup>0,476</sup> ] |                           |
| <i>IEEE 1999 [98] et IEEE 1991 [4]</i>  |                   |                          |   |   |                           |
| 0,003-0,1   | 614               | 163                      | (100, 1000000)  | 6   | 6                         |
| 0,1-1,34  | 614               | 16,3/f                   | (100, 10000/f <sup>2</sup> )                          | 6   | 6                         |
| 1,34-3  | 823,8/f           | 16,3/f                   | (180/f <sup>2</sup> , 10000/f <sup>2</sup> )          | f <sup>2</sup> /0,3   | 6                         |
| 3-30  | 823,8/f           | 16,3/f                   | (180/f <sup>2</sup> , 10000/f <sup>2</sup> )          | 30  | 6                         |
| 30-100  | 27,5              | 158,3/f <sup>1,668</sup> | (0,2, 940000/f <sup>3,336</sup> )                     | 30  | 0,0636/f <sup>1,337</sup> |
| 100-300   | 27,5              | 0,0729                   | 0,2   | 30  |                           |
| 300-3000  |                   |                          | f/1500  | 30  |                           |
| 3000-15000  |                   |                          | f/1500  | 90000/f   |                           |
| 15000-300000  |                   |                          | 10  | 616000/√f   |                           |
| <i>f<sub>G</sub> représente la fréquence en GHz, f la fréquence en MHz</i>  |                   |                          |   |   |                           |
| <i>Pour certaines fréquences, il y a une limite en densité de puissance S pour le champ E et pour le champ H.</i> |                   |                          |   |   |                           |
| <i>ANSI 1982 : pas de distinction entre environnement contrôlé ou non-contrôlé , cf Table 1.19 [5]</i>            |                   |                          |   |   |                           |
| <i>ANSI 1974 : pas de niveaux de référence [20]</i>   |                   |                          |   |   |                           |

TABLE A.19 – Evolution des niveaux de référence entre les différentes versions de la norme C95.1 (norme de l'ANSI et de l'IEEE) de 1974 à 2005 pour un environnement non-contrôlé

|   | Niveau d'action    | Environnement contrôlé |
|---|--------------------|------------------------|
| <b>DAS corps entier</b> [W/kg]                  | 2005 : 0,08        | 2005 : 0,4             |
|   | 1999 : 0,08        | 1999 : 0,4             |
|   | 1991 : 0,08        | 1991 : 0,4             |
|   | 1982 : 0,4         | 1982 : 0,4             |
|   | 1974 : —           | 1974 : —               |
| <b>DAS local, extrémités et oreilles</b> [W/kg] | 2005 : 4 sur 10 g  | 2005 : 20 sur 10 g     |
|   | 1999 : 4 sur 10 g  | 1999 : 20 sur 10 g     |
|   | 1991 : 4 sur 10 g  | 1991 : 20 sur 10 g     |
|   | 1982 : 8 sur 1 g   | 1982 : 8 sur 1 g       |
|   | 1974 : —           | 1974 : —               |
| <b>DAS local, autres tissus</b> [W/kg]          | 2005 : 2 sur 10 g  | 2005 : 10 sur 10 g     |
|   | 1999 : 1,6 sur 1 g | 1999 : 8 sur 1 g       |
|   | 1991 : 1,6 sur 1 g | 1991 : 8 sur 1 g       |
|   | 1982 : 8 sur 1 g   | 1982 : 8 sur 1 g       |
|   | 1974 : —           | 1974 : —               |

TABLE A.20 – Evolution des restrictions de base entre les différentes versions de la norme C95.1 (norme de l'ANSI et de l'IEEE) de 1974 à 2005

| Fréquence f            | Champ E rms [V/m] | Champ H rms [A/m]   | Champ B [ $\mu$ T] | Densité puissance de l'onde plane équivalente S [W/m <sup>2</sup> ] |
|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---|
| <i>ICNIRP 1998 [7]</i> |                   |                     |                    |   |
| jusqu'à 1 Hz           |                   | 1,63e5              | 2e5                |   |
| 1-8 Hz                 | 20000             | 1,63/f <sup>2</sup> | 2e5/f <sup>2</sup> |   |
| 8-25 Hz                | 20000             | 20000/f             | 25000/f            |   |
| 0,025-0,82 kHz         | 500/f             | 20/f                | 25/f               |   |
| 0,82-65 kHz            | 610               | 24,4                | 30,7               |   |
| 0,065-1 MHz            | 610               | 1,6/f               | 2/f                |   |
| 1-10 MHz               | 610/f             | 1,6/f               | 2/f                |   |
| 10-400 MHz             | 61                | 0,16                | 0,2                | 10  |
| 400-2000 MHz           | 3 $\sqrt{f}$      | 0,008 $\sqrt{f}$    | 0,01 $\sqrt{f}$    | f/40  |
| 2-300 GHz              | 137               | 0,36                | 0,45               | 50  |
| <i>IRPA 1988 [21]</i>  |                   |                     |                    |   |
| 0,1-1 MHz              | 614               | 1,6/f               |                    |   |
| 1-10 MHz               | 614/f             | 1,6/f               |                    |   |
| 10-400 MHz             | 61                | 0,16                |                    | 10  |
| 400-2000 MHz           | 3 $\sqrt{f}$      | 0,08 $\sqrt{f}$     |                    | f/40  |
| 2-300 GHz              | 137               | 0,36                |                    | 50  |

TABLE A.21 – Evolution des niveaux de référence entre les différentes recommandations de l'IRPA et de l'ICNIRP de 1988 à 1998 pour les travailleurs

| Fréquence f            | Champ E rms [V/m] | Champ H rms [A/m] | Champ B [ $\mu$ T] | Densité puissance de l'onde plane équivalente S [ $W/m^2$ ] |
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---|
| <i>ICNIRP 1998 [7]</i> |                   |                   |                    |   |
| jusqu'à 1 Hz           |                   | 32000             | 40000              |   |
| 1-8 Hz                 | 10000             | $32000/f^2$       | $40000/f^2$        |   |
| 8-25 Hz                | 10000             | $4000/f$          | $5000/f$           |   |
| 0,025-0,8 kHz          | $250/f$           | $4/f$             | $5/f$              |   |
| 0,8-3 kHz              | $250/f$           | 5                 | 6,25               |   |
| 3-150 kHz              | 87                | 5                 | 6,25               |   |
| 0,15-1 MHz             | 87                | $0,73/f$          | $0,92/f$           |   |
| 1-10 MHz               | $87/\sqrt{f}$     | $0,73/f$          | $0,92/f$           |   |
| 10-400 MHz             | 28                | 0,073             | 0,092              | 2   |
| 400-2000 MHz           | $1,375\sqrt{f}$   | $0,0037\sqrt{f}$  | $0,0046\sqrt{f}$   | $f/200$   |
| 2-300 GHz              | 61                | 0,16              | 0,2                | 10  |
| <i>IRPA 1988 [21]</i>  |                   |                   |                    |   |
| 0,1-1 MHz              | 87                | $0,23/\sqrt{f}$   |                    |   |
| 1-10 MHz               | $87/\sqrt{f}$     | $0,23/\sqrt{f}$   |                    |   |
| 10-400 MHz             | 27,5              | 0,073             |                    | 2   |
| 400-2000 MHz           | $1,375\sqrt{f}$   | $0,0037\sqrt{f}$  |                    | $f/200$   |
| 2-300 GHz              | 61                | 0,16              |                    | 10  |

TABLE A.22 – Evolution des niveaux de référence entre les différentes recommandations de l'IRPA et de l'ICNIRP de 1988 à 1998 pour la population générale

|   |                               | Population générale | Travailleurs |
|---|-------------------------------|---------------------|--------------|
| <i>IRPA 1988 [21]</i>   |                               |                     |              |
| Corps entier  | DAS corps entier [W/kg]       | 0,08                | 0,4          |
| Local   | DAS 10 g Extrémités [W/kg]    | —                   | 20           |
|   | DAS 10 g Autres tissus [W/kg] | —                   | 10           |
| Les DAS sont moyennés sur une période de 6 min<br>Limites pour $f > 10$ MHz   |                               |                     |              |
| <i>ICNIRP 1998 [7]</i>  |                               |                     |              |
| Corps entier  | DAS corps entier [W/kg]       | 0,08                | 0,4          |
| Local   | DAS 10 g Membres [W/kg]       | 4                   | 20           |
|   | DAS 10 g Tête et tronc [W/kg] | 2                   | 10           |
| Les DAS sont moyennés sur une période de 6 min<br>Limites pour $100 \text{ kHz} < f < 10 \text{ GHz}$<br>Entre 100 kHz et 10 MHz, limites sur la densité de courant<br>à prendre en compte également. |                               |                     |              |

TABLE A.23 – Evolution des restrictions de base entre les différentes recommandations de l'IRPA et de l'ICNIRP de 1988 à 1998



## Annexe B

# Tissus constituant les fantômes Duke, Ella et Hugo

Cette annexe présente les tissus biologiques constituant les fantômes Ella [3], Duke [3] et Hugo [51] utilisés dans ce mémoire (tableau B.1).

### B.1 Tissus hétérogènes

La figure B.1 présente les propriétés (conductivité, permittivité relative et épaisseur de peau) des tissus majoritaires dans ces trois fantômes d'après les données de Gabriel [66].

| Tissu                     | Hugo | Duke | Ella |
|---------------------------|------|------|------|
| Glandes surénales         |      | x    |      |
| Glande thyroïde           | x    | x    | x    |
| Glande                    | x    |      |      |
| Air interne               | x    | x    | x    |
| Artères                   | x    | x    | x    |
| Vessie                    | x    | x    | x    |
| Sang / Vaisseaux sanguins | x    | x    | x    |
| Os                        | x    | x    | x    |
| Cerveau (matière grise)   | x    | x    | x    |
| Cerveau (matière blanche) | x    | x    | x    |
| Seins                     |      |      | x    |
| Bronches                  |      | x    | x    |
| Bronches (contenu)        |      | x    | x    |
| Cartilage                 | x    | x    | x    |
| Cervelet                  |      | x    | x    |
| Liquide cérobrospinal     |      | x    | x    |
| Commissure antérieure     |      | x    | x    |
| Commissure postérieure    |      | x    | x    |
| Tissu conjonctif          |      | x    | x    |
| Cornée                    |      | x    | x    |
| Diaphragme                |      | x    | x    |
| Epidydime                 |      | x    |      |
| Œsophage                  |      | x    | x    |
| Œsophage (contenu)        |      | x    | x    |
| Œil (lentille)            | x    | x    | x    |
| Œil (sclère)              |      | x    | x    |

|                          |   |   |   |
|--------------------------|---|---|---|
| Œil (humeur vitrée)      |   | x | x |
| Yeux                     | x |   |   |
| Nerf optique             | x |   |   |
| Graisse                  | x | x | x |
| Vésicule biliaire        | x | x | x |
| Cœur (lumen)             |   | x | x |
| Cœur (muscle)            |   | x | x |
| Cœur (ventricules)       | x |   |   |
| Cœur (atriums)           | x |   |   |
| Hippocampe               |   | x | x |
| Hypophyse                |   | x | x |
| Hypothalamus             |   | x | x |
| Disques intervertébraux  |   | x | x |
| Reins (enveloppe)        |   | x | x |
| Reins (contenu)          |   | x | x |
| Reins                    | x |   |   |
| Gros intestins           | x | x | x |
| Gros intestins (contenu) | x | x | x |
| Intestin grêle           |   | x | x |
| Intestin grêle (contenu) |   | x | x |
| Intestins                | x |   |   |
| Intestins (contenu)      | x |   |   |
| Larynx                   |   | x | x |
| Foie                     | x | x | x |
| Poumons                  | x | x | x |
| Mâchoire                 |   | x | x |
| Moëlle osseuse           | x | x | x |
| Moëlle allongée          |   | x | x |
| Menisque                 |   | x | x |
| Mésencéphale             |   | x | x |
| Muqueuse                 | x | x | x |
| Muscle                   | x | x | x |
| Nerf                     |   | x | x |
| "Fabrique neuronale"     | x |   |   |
| Ovaires                  |   |   | x |
| Pancreas                 | x | x |   |
| Rotule                   |   | x | x |
| Pénis                    |   | x |   |
| Pharynx                  |   | x | x |
| Glande pinéale           |   | x | x |
| Oreilles (cartilage)     |   | x | x |
| Oreilles (peau)          |   | x | x |
| Pont (système nerveux)   |   | x | x |
| Prostate                 |   | x |   |
| Graisse sous-cutanée     |   | x | x |
| Peau                     | x | x | x |
| Crâne                    |   | x | x |
| Moëlle épinière          |   | x | x |
| Rate                     | x | x | x |
| Estomac                  | x | x | x |
| Estomac (lumen)          |   | x | x |

|               |   |   |   |
|---------------|---|---|---|
| Dents         |   | X | X |
| Tendon        |   | X | X |
| Testicules    |   | X |   |
| Thalamus      |   | X | X |
| Thymus        |   | X |   |
| Langue        |   | X | X |
| Trachée       |   | X | X |
| Trachée (air) |   | X | X |
| Urètre        |   | X | X |
| Utérus        |   |   | X |
| Vagin         |   |   | X |
| Veines        | X | X | X |
| Vertèbres     |   | X | X |

TABLE B.1: Intitulé des tissus et organes composant les fantômes Duke, Ella et Hugo

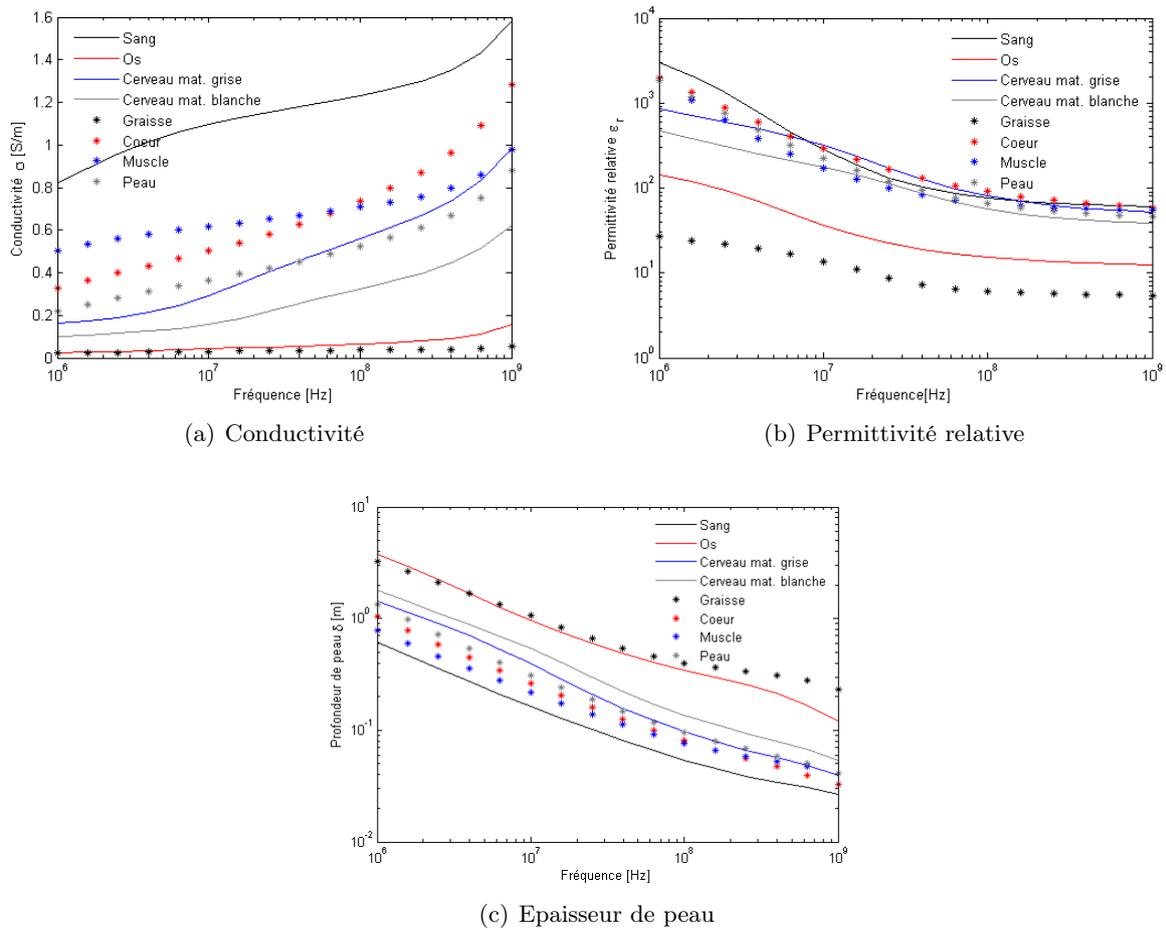


FIGURE B.1 – Propriétés des tissus majoritaires des fantômes Ella, Duke et Hugo

## B.2 Tissu homogène

Dans ce mémoire, les fantômes sont homogénéisés par un même tissu homogène. Ce tissu a été développé à partir du fantôme Hugo [51] en résolution de voxels de 1 mm et est issu d'une collaboration entre Thales et le laboratoire WhistLab [65]. Sa conductivité, sa permittivité relative ainsi que sa masse volumique sont déterminés à partir de la moyenne pondérée de ces propriétés pour les neuf tissus les plus présents dans Hugo. Les tissus sont les os corticaux, les os spongieux, la moelle osseuse, la graisse, les tendons, le foie, les muscles, la peau et les poumons. La figure B.2 présente la conductivité et la permittivité relative de ce tissu homogène entre 1 et 100 MHz. Sa masse volumique est  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ . Il a été validé par des comparaisons entre fantôme hétérogène et homogène sur le fantôme Hugo en résolution de 1 mm, puis appliqué sur un fantôme de morphologie ISO.

Ce tissu présente une conductivité  $\sigma > \omega\epsilon$  entre 1 et 210 MHz, il est donc plutôt conducteur dans ces fréquences alors qu'au-dessus de 210 MHz, il sera majoritairement diélectrique (figure B.3).

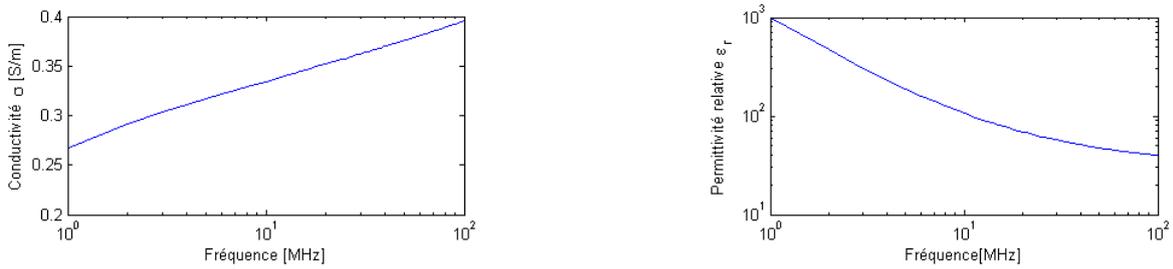


FIGURE B.2 – Propriétés diélectriques du tissu homogène servant à homogénéiser les fantômes entre 1 et 100 MHz

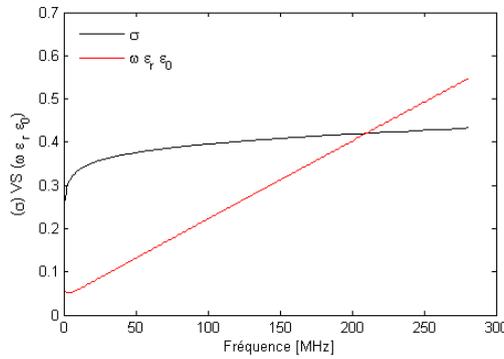


FIGURE B.3 – Conductivité  $\sigma$  et  $\omega\epsilon_r\epsilon_0$  entre 1 et 250 MHz du tissu homogène

## Annexe C

# Fantôme simplifié équivalent à la morphologie du fantôme Ella

Nous détaillons dans cette annexe le fantôme simplifié équivalent à la morphologie du fantôme Ella [3], qui est utilisé dans le chapitre 4 (4.5.3.2). Nous donnons également les résultats de  $DAS_{CE}$  et  $DAS_{10g}$  en exposition onde plane obtenus en simulation avec le fantôme Ella homogène et par calcul avec les formules du chapitre 4 (4.5.2) et le fantôme simplifié.

### C.1 Fantôme simplifié

Comme pour le fantôme Duke, nous développons un fantôme simplifié d'Ella dont les dimensions sont proches afin d'appliquer les formules de  $DAS_{CE}$  et de  $DAS_{10g}$  issues du paragraphe 4.5.2. Ce fantôme est composé de cinq parties cylindriques représentant la tête, le cou, le tronc, les jambes et les chevilles du fantôme Ella.

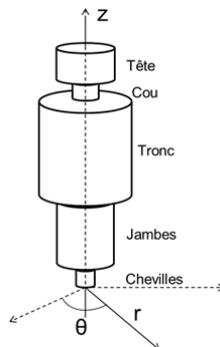


FIGURE C.1 – Fantôme simplifié Ella

|          | Rayon (m) | Hauteur (m) |
|----------|-----------|-------------|
| Tête     | 0,0865    | 0,180       |
| Cou      | 0,0575    | 0,04        |
| Tronc    | 0,187     | 0,611       |
| Jambe    | 0,109     | 0,622       |
| Cheville | 0,046     | 0,167       |

TABLE C.1 – Dimensions du fantôme simplifié pour Ella

## C.2 Résultats en onde plane

Le fantôme Ella homogène est exposé à une onde plane polarisée verticalement de face d'amplitude 61 V/m. Le tissu homogène est le même que celui utilisé pour le fantôme Duke dans le chapitre 4.

Les écarts obtenus entre la simulation avec le fantôme Ella et les formules sont compris entre 0 et 2 dB pour le  $DAS_{CE}$ , entre -1,5 et 2,25 dB pour le  $DAS_{10\text{ g max}}$  dans les membres et entre -1 et 0,5 dB pour le  $DAS_{10\text{ g max}}$  dans la tête & tronc.

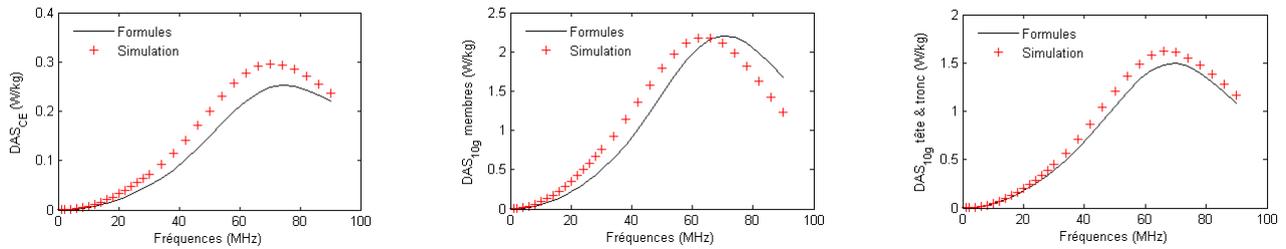


FIGURE C.2 – Comparaison des DAS corps entier, des DAS 10 g max sur les membres et des DAS 10 g max sur tête & tronc pour le fantôme Ella et son fantôme simplifié homogènes

## Annexe D

# Compléments au chapitre 4 : validation des formules de calcul du DAS pour un fantôme placé à l'intérieur d'un véhicule

### D.1 Introduction

Dans le chapitre 4, nous avons développé des formules de calculs de DAS à partir des courants induits le long du corps. Ces formules ont été validées pour différents types d'exposition. Cependant, le fantôme était toujours isolé de la source (par exemple, à côté du véhicule sur lequel est placée l'antenne).

Dans cette annexe, nous étudions la validation de ces formules pour deux expositions. Dans la première, l'antenne placée sur le toit du véhicule est une antenne VHF et le fantôme est toujours placé derrière le véhicule (cf. section 4.5.3.5). La puissance fournie à l'antenne est de 0,5 W.

Dans la deuxième exposition, l'antenne est une antenne HF (la même que dans la section 4.5.3.5) mais le fantôme est placé à l'intérieur du véhicule (figure D.1). La puissance fournie à l'antenne est de 0,5 W.

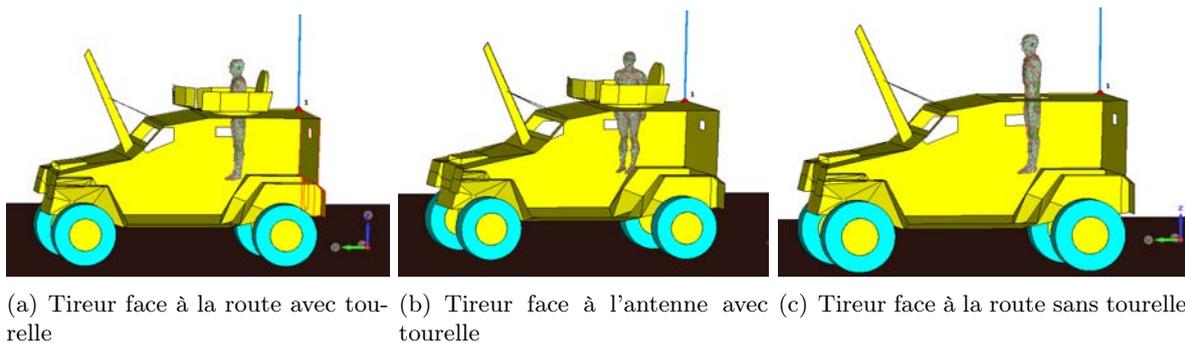


FIGURE D.1 – Scénarios d'exposition pour la position tireur avec une antenne HF placée sur le toit du véhicule

### D.2 Résultats

#### D.2.1 Exposition en VHF

Nous constatons que nos formules de calculs de DAS donnent des résultats satisfaisants : les écarts par rapport à la simulation sont compris entre -0,2 et 1,4 dB pour le  $DAS_{CE}$ , entre -0,5 et 0,8 dB pour

le DAS tête & tronc et entre -1 et 0,6 dB pour le DAS membres (figure D.2).

Avec les résultats du chapitre 4, nous pouvons en conclure que nos formules de calculs de DAS sont valides pour une exposition où le fantôme est isolé.

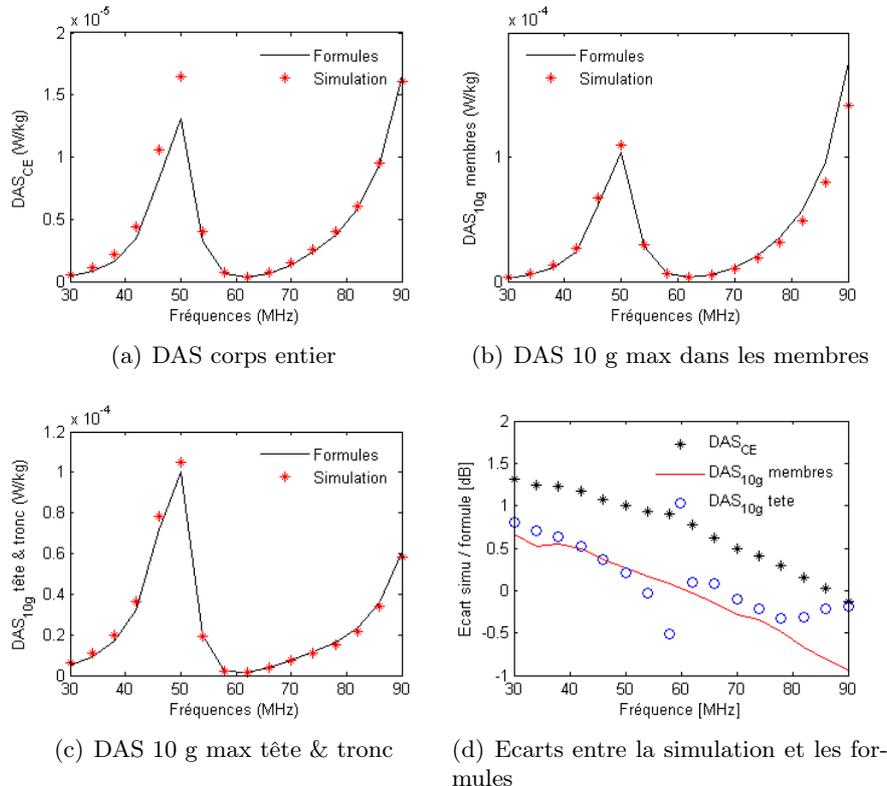


FIGURE D.2 – Comparaison des DAS pour l'exposition en VHF

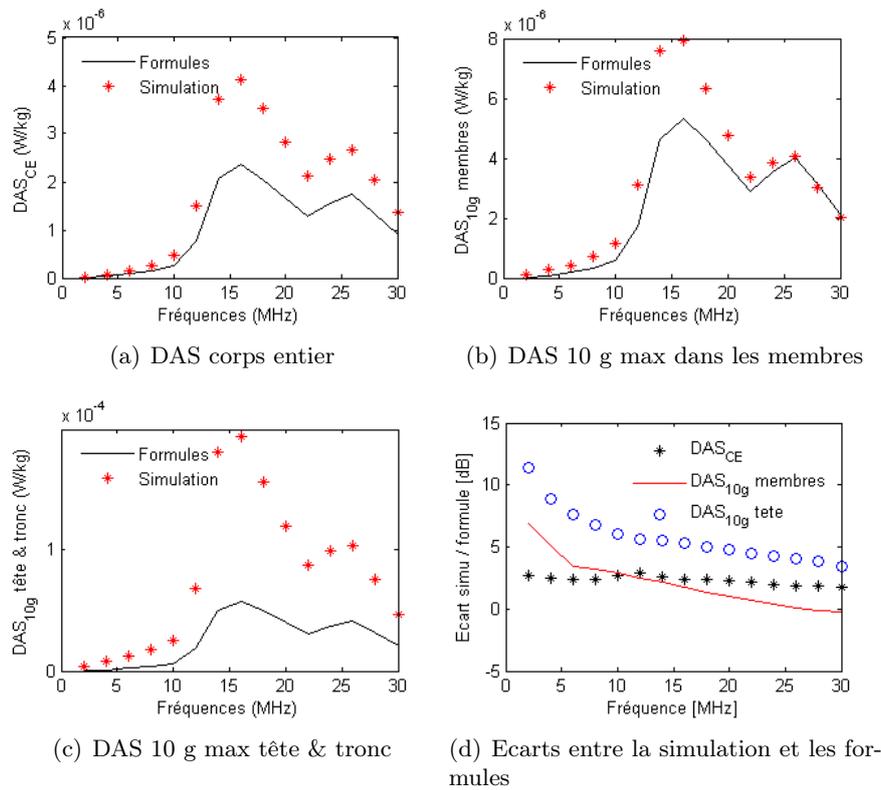
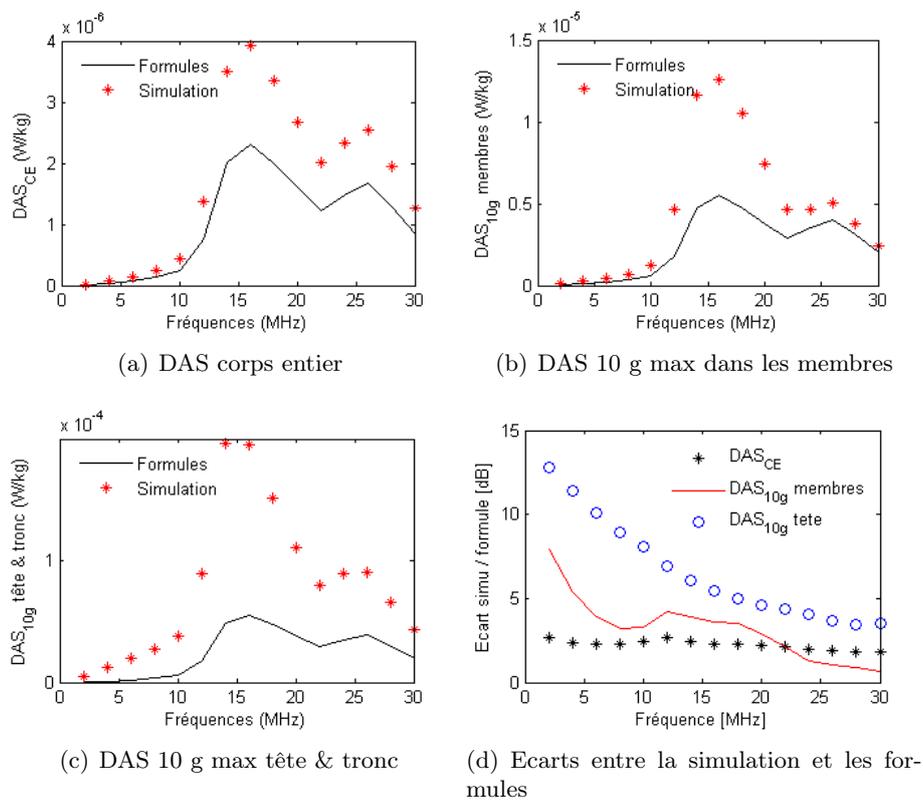
## D.2.2 Exposition en HF

Dans cette section, le fantôme est exposé au champ rayonné par une antenne HF en étant dans le véhicule (position *tireur*).

Le fantôme est d'abord placé dans la configuration (a) de la figure D.1. Nous relevons des écarts importants entre les DAS calculés en simulation et ceux calculés avec les formules proposées. Ils sont de 3 dB pour le  $DAS_{CE}$ , compris entre 0 et 7 dB pour le DAS 10 g membres et compris entre 3 et 12 dB pour le DAS 10 g tête & tronc (figure D.3). L'exposition n'est pas complètement symétrique (fantôme non placé en face de la source contrairement à l'onde plane étudiée dans le chapitre 4), les forts écarts peuvent peut-être provenir de cela.

Nous déplaçons le fantôme, de manière à ce qu'il soit placé en face de l'antenne et que l'exposition soit symétrique (configuration (b) de la figure D.1). Nous constatons que les écarts sont identiques à la configuration précédente (figure D.4). Les forts écarts ne s'expliquent donc pas par la nature non-symétrique de l'exposition.

Suite à cela, nous enlevons la tourelle du toit du véhicule, car dans des études précédentes (en interne à Thales), il a été montré que la tourelle pouvait perturber le champ. Le fantôme est à nouveau placé face à la route (configuration (c), figure D.1). Nous constatons que les écarts diminuent par rapport aux deux configuration précédentes : ils sont toujours d'environ 3 dB pour le  $DAS_{CE}$ , mais pour le DAS 10 g membres, ils sont maintenant compris entre 1 et 4,5 dB et pour le DAS 10 g tête & tronc entre 2,5 et 8 dB.

FIGURE D.3 – Comparaison des DAS pour le cas d'exposition *Tireur face à la route avec tourelle*FIGURE D.4 – Comparaison des DAS pour le cas d'exposition *Tireur face à l'antenne avec tourelle*

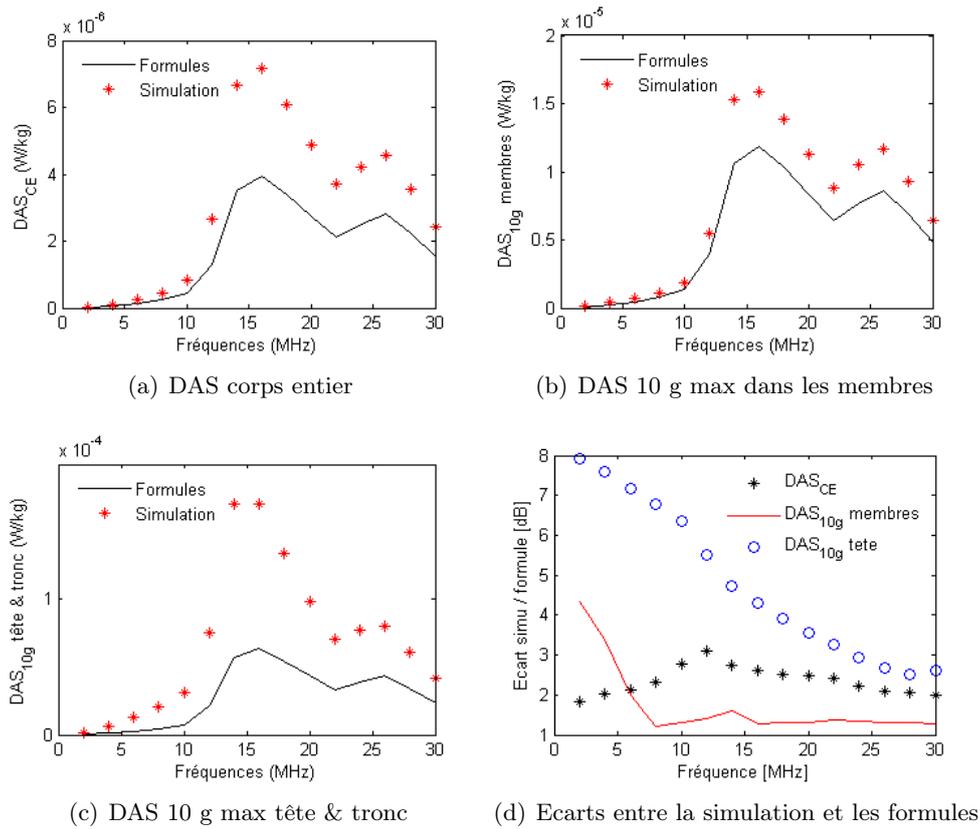


FIGURE D.5 – Comparaison des DAS pour le cas d'exposition *Tireur face à la route sans tourelle*

### D.2.3 Conclusion

Ces résultats montrent que les formules de calculs de DAS développées dans le chapitre 4 ne sont valables que pour une exposition symétrique où le fantôme est isolé (en-dehors d'un véhicule). Pour une exposition à l'intérieur d'un véhicule, nos hypothèses de répartition de la densité de courant et du courant induit ne sont plus valables. En effet, si l'exposition n'est pas symétrique, la densité de courant ne s'exprimera plus par une *simple fonction de Bessel*. Si le corps est placé dans un véhicule, le courant induit ne sera plus réparti de manière sinusoïdale le long du corps avec un maximum à mi-hauteur.

## Annexe E

# Compléments au chapitre 3 : Exposition électromagnétique au-delà des limites normatives et élévations de température associées

### E.1 Présentation de l'étude

Dans cette annexe, nous exposons de face le fantôme Duke hétérogène [3] à une onde plane polarisée verticalement entre 30 et 90 MHz. La densité de puissance est de  $100 \text{ W/m}^2$ , soit un champ électrique de  $180 \text{ V/m}$ . Cela nous permet d'étudier les élévations de température pour une exposition supérieure à 2 fois les valeurs de champs E préconisées par l'ICNIRP (limites *Travailleurs* [7]). L'exposition dure 30 min et la température extérieure est de  $20^\circ \text{C}$ .

### E.2 Résultats

Les valeurs de DAS corps entier sont comprises entre  $0,15 \text{ W/kg}$  et  $0,8 \text{ W/kg}$  (figure E.1a). Nous pouvons y associer une élévation de température du corps inférieure à  $0,05^\circ \text{C}$  (élévations de température du sang et de l'hypothalamus en figure E.2a).

Les valeurs de DAS 10 g max dans la cheville sont comprises entre  $10$  et  $40 \text{ W/kg}$  (figure E.1b). La limite de  $20 \text{ W/kg}$  de l'ICNIRP est dépassée, mais les élévations de température correspondantes restent inférieures à  $8^\circ \text{C}$  (figure E.2b). Les limites en DAS semblent donc être suffisamment protectrices par rapport aux élévations de température constatées. Nous avons également relevé le DAS 10 g et les élévations de température correspondantes en un autre point de la cheville. En cet autre point, le DAS 10 g est compris entre  $4$  et  $14 \text{ W/kg}$  (figure E.1c) et l'élévation de température monte à  $5,5^\circ \text{C}$  (figure E.1b).

Nous avons également voulu étudier les effets de l'exposition de l'œil. Lors du traitement des données, nous moyennons les valeurs de DAS 10 g dans les différents tissus de l'œil (lentille, humeur vitrée ...) pour obtenir le DAS de l'œil de la figure E.1d. Nous constatons que celui-ci reste très inférieur au DAS 10 g max de la cheville et à la limite de l'ICNIRP de  $10 \text{ W/kg}$  pour les travailleurs. Les élévations de température correspondantes sont également faibles, puisqu'elles montent à  $0,04^\circ \text{C}$  (figure E.2c), ce qui est très inférieur à l'élévation de  $4^\circ \text{C}$  dans l'œil qui peut causer des dommages irréversibles sur l'œil. Nous relevons même des élévations de température négatives, qui sont liées au fait que nous moyennons la température (et le DAS) sur les 4 tissus constituant l'œil, qui ne sont pas tous à la même température initiale.

ANNEXE E. COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 3 : EXPOSITION ÉLECTROMAGNÉTIQUE AU-DELÀ DES LIMITES NORMATIVES ET ÉLÉVATIONS DE TEMPÉRATURE ASSOCIÉES

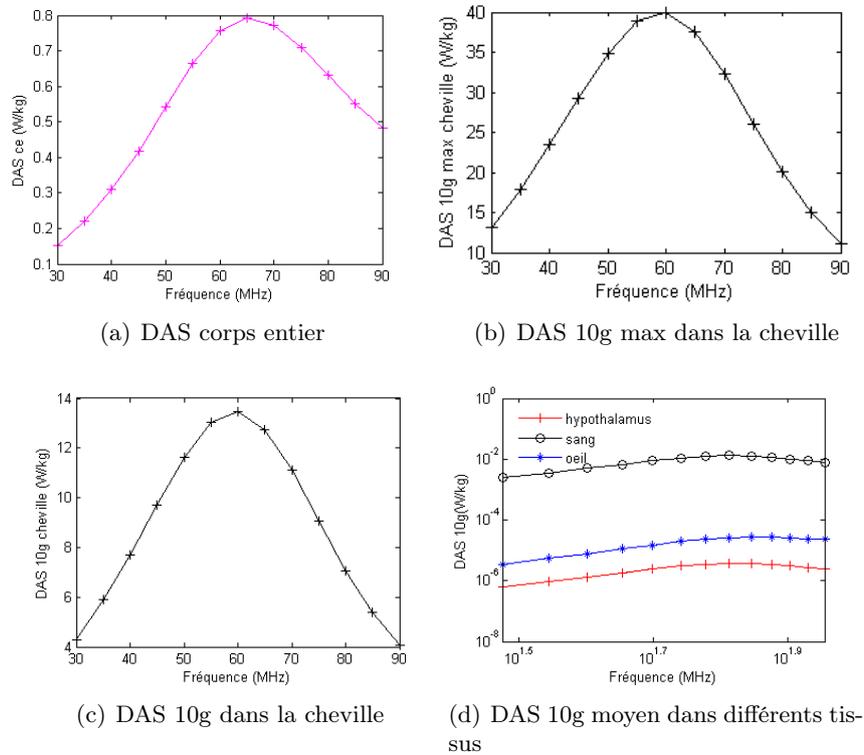


FIGURE E.1 – DAS dans différents tissus ou parties du corps pour une exposition à  $100 \text{ W/m}^2$  en onde plane

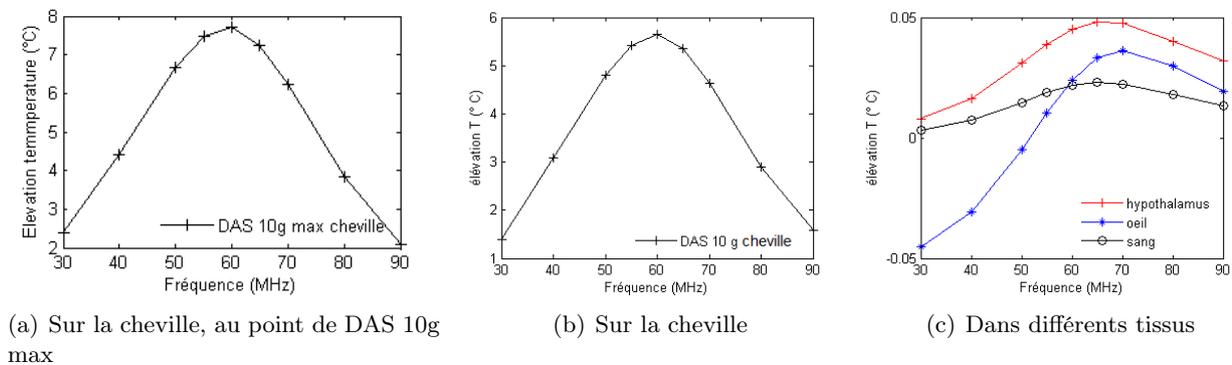


FIGURE E.2 – Élévations de température dans différents tissus ou parties du corps pour une exposition à  $100 \text{ W/m}^2$  en onde plane

| Tissu ou zone du corps           | Élévation de température [ ° C ] |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Point DAS 10 g max dans cheville | 12,6                             |
| Sang                             | 2,7                              |
| Œil                              | -0,7                             |
| Hypothalamus                     | 0,13                             |

TABLE E.1 – Élévations de température dans différents tissus ou zones du corps pour une exposition à 60 MHz sans thermorégulation

Nous avons également fait une simulation à 60 MHz en enlevant la thermorégulation du corps (absence des coefficients A et B dans l'équation de Pennes décrite en 3.1 dans le chapitre 3). Nous avons relevé des élévations de température assez fortes, notamment dans le sang (tableau E.1). L'élévation négative dans l'œil est due à la température extérieure de 20 ° C et l'absence de chaleur métabolique par la suppression de la thermorégulation, car l'absorption de puissance à cet endroit du corps est infime à 60 MHz, donc insuffisante face à la température extérieure. Nous notons également que cette thermorégulation est particulièrement efficace pour la température du corps entier (écart de 21 dB par rapport aux simulations avec thermorégulation) contrairement aux températures locales (écart de 2 dB pour le point de DAS 10 g max dans la cheville).

### E.3 Conclusion

Nous avons constaté que malgré le dépassement des limites de l'ICNIRP en champ et en DAS 10 g max d'un facteur 2, les élévations de température restent inférieures aux limites biologiques du corps (8 ° C d'élévation sur la peau pouvant causer des sensations de brûlure et 4 ° d'élévation dans l'œil pouvant causer une cataracte). L'élévation de température au point de DAS 10 g max est montée à 7,5 ° C pour un DAS 10 g de 40 W/kg. Malgré cela, les élévations de température au niveau du corps entier sont très faibles (inférieure à 0,05 ° C), même si le  $DAS_{CE}$  dépasse les 0,4 W/kg.

De plus, la thermorégulation est un phénomène non négligeable lors des simulations thermiques. Nous avons pu constater que ce système était particulièrement efficace pour réguler la température du corps entier, et qu'il a moins d'effet sur les élévations de température locale. Cela explique pourquoi nous atteignons le seuil de 8 ° C au niveau local, alors que nous sommes loin du seuil de 1 ° C au niveau corps entier, alors que dans les deux cas, les valeurs de DAS sont deux fois supérieures à celles des normes ICNIRP [7] et IEEE [6].

Cela nous permet de suggérer une évolution des limites de DAS pour qu'elles soient plus en adéquation avec les effets thermiques. En effet, il est un peu probable au vu des résultats qu'avec un  $DAS_{CE}$  de 4 W/kg, nous atteignons 1 ° C d'élévation sur le corps. Alors qu'au niveau local, nous pouvons atteindre les 8 ° C d'élévation avec un DAS 10 g supérieur à 40 W/kg. Il serait donc judicieux d'adapter à la fois les limites en  $DAS_{CE}$  et en DAS 10 g qui sont actuellement peu pertinentes par rapport aux réels effets thermiques constatés à ces fréquences.



# Annexe F

## Liste des publications

### Conférences internationales

- **J. Frère**, A. Alcaras, M. Zhadobov, C. Lemoine, G. Le Cadre, R. Sauleau. Evaluation of currents induced in human body by plane wave exposure at 1-90 MHz. *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2017*.
- A. Alcaras, **J. Frère**. Thermal risks due to land vehicle radioelectric exposure - Results of Thales research and study for military purpose. *International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2017*.

### Conférences nationales

- **J. Frère**, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras, G. Le Cadre. Etude comparative de différents fantômes de l'humain en bandes HF et VHF. *19<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microondes, JNM 2015*.
- **J. Frère**, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras, G. Le Cadre. Lien entre le courant induit et le débit d'absorption spécifique de 1 à 30 MHz. *18<sup>ème</sup> Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique, CEM 2016*.
- **J. Frère**, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras, G. Le Cadre. Impact du débit d'absorption spécifique sur les effets thermiques d'une personne exposée à une onde plane en bandes HF et VHF. *18<sup>ème</sup> Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique, CEM 2016*.
- **J. Frère**, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras, G. Le Cadre. Influence de l'impédance d'onde sur les valeurs de débit d'absorption spécifique pour un fantôme de l'humain en bande HF. *18<sup>ème</sup> Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique, CEM 2016*.

### Conférences industrielles

- **J. Frère**, A. Alcaras. Exposition électromagnétique des personnes en bandes HF et VHF. *NOE (Network of Excellence) Workshop 2015 - CEM de plateformes navales*.
- **J. Frère**, C. Castel, A. Alcaras, G. Le Cadre. Prise en compte du DREP par Thales - Résultats de thèse. *Journée thématique DREP (Dangers des Rayonnements Electromagnétiques non ionisants sur les Personnes) de la DGA, 17 nov. 2016*.



## Résumé

Dans les environnements militaires, et plus particulièrement dans le domaine terrestre, de nombreux systèmes radioélectriques HF (de 3 à 30 MHz), VHF (de 30 à 300 MHz) et UHF (de 300 à 3000 MHz) sont utilisés. Ces systèmes remplissent plusieurs fonctions (communication longue et courte distance, brouillage, radar, etc ...) et peuvent parfois cohabiter sur un même porteur. Ces différentes fonctions utilisent plusieurs antennes et augmentent les risques de surexposition électromagnétique des opérateurs. Des normes civiles et militaires proposent des limites sur les champs électromagnétiques appliqués et sur des grandeurs dosimétriques (débit d'absorption spécifique DAS, densité de courant et champs électriques internes) pour limiter ces risques entre 0 et 300 GHz.

Ces travaux de thèse ont deux objectifs principaux. Le premier est d'étudier les normes civiles et militaires afin de comprendre comment elles ont été développées et si elles sont réellement adaptées aux fréquences HF et VHF. Le deuxième est de proposer et valider une nouvelle méthode de validation des produits radio Thales.

Pour cela, nous caractérisons numériquement le comportement électromagnétique et thermique du corps humain lors d'une exposition électromagnétique en bandes HF et VHF. L'étude des couplages entre le corps et les champs électromagnétiques externes nous permet de proposer pour la première fois des formules calculant les DAS dans le corps d'un fantôme homogène à partir, soit des courants induits le long du corps pour une exposition quelconque, soit du champ électrique appliqué pour une exposition en onde plane.

**Mots clés :** interactions corps / champs électromagnétiques, débit d'absorption spécifique (DAS), courant induit, fantôme homogène, fantôme hétérogène

## Abstract

In military environments, especially land field, high frequencies (HF, 3 - 30 MHz), very high frequencies (VHF, 30 - 300 MHz) and ultra high frequencies (UHF, 300 - 3000 MHz) have been used for long range and shortrange communications, for communication interference or for detection. To have all those functions on the same carrier, they require many antennas, therefore they are increasing the operator's electromagnetic overexposure risk. Civilian and military standards were published providing limits on external electromagnetic fields and dosimetric quantities (specific absorption rate SAR, current density and internal electric field) to limit this overexposure risk between 0 and 300 GHz.

The PhD thesis project has two main objectives. First, civilian and military standards are studied to understand how they were developed and if they are really suited for HF and VHF frequencies. Second, a new validation method of Thales radio product is proposed and validated.

This PhD thesis project have characterized numerically the human body electromagnetic and thermal behavior during electromagnetic exposure in HF and VHF. Then, by studying couplings between external electromagnetic fields, induced current and human body, formulas to calculate both whole-body averaged SAR and local SAR 10 g in homogeneous body are proposed for the first time.

**Keywords :** electromagnetic fields / human body interactions, specific absorption rate (SAR), induced current, homogeneous phantom, heterogeneous phantom