



L'HOMME CONNECTÉ

Antennes 4G et impact sanitaire associé pour lunettes connectées

4G Antennas and related SAR for wireless eyewear devices

*Aykut Cihangir**, *Will Whittow***, *Chinthana Panagamuwa*^o, *Fabien Ferrero***, *Gilles Jacquemod**, *Frédéric Giancesello****, *Romain Pilard****, *Cyril Luxey**

* *EpOC, Université Nice-Sophia Antipolis, aykut.cihangir@unice.fr*

^o *Wireless Communications Research Group, School of Electronic, Electrical & Systems Engineering, Loughborough University, W.G.Whittow@lboro.ac.uk*

** *CREMANT-CNRS-LEAT, Université Nice-Sophia Antipolis, Fabien.ferrero@unice.fr*

*** *STMicroelectronics, Crolles, frederic.giancesello@st.com*

Mots-clefs: Lunettes connectées, élément de couplage, LTE, DAS.

Key-words: Eyewear device, coupling element, LTE, SAR.

Résumé

Dans ce papier, nous présentons tout d'abord une étude de faisabilité d'antennes 4G (700-960MHz et 1,7-2,7GHz) intégrables dans une paire de lunettes proposant des connexions en réalité augmentée. Cet objet est destiné à être connecté aux réseaux de communication cellulaires de dernière génération ainsi qu'aux réseaux personnels de type WLAN. Le concept antennaire d'Élément de Couplage imprimé associé à un circuit d'adaptation est ainsi évalué pour trois prototypes possibles en termes de coefficient de réflexion et d'efficacité rayonnée lorsque les lunettes sont positionnées sur la tête de l'utilisateur. Nous présentons également l'analyse dosimétrique des prototypes optimisés pour le fantôme homogène SAM et le fantôme évolué Visible Human (VH) : les niveaux de DAS dans ces deux fantômes sont simulés et comparés aux normes en vigueur. Dans un second temps, nous présentons les premiers résultats expérimentaux obtenus à partir de prototypes fabriqués par une imprimante 3D pour les lunettes et utilisant des procédés de réalisation classique pour les PCB avec élément de couplage antennaire imprimé et circuit d'adaptation associé. Les valeurs théoriques et expérimentales concernant les coefficients de réflexion et les efficacités totales des antennes sont en très bon accord attestant ainsi d'efficacité rayonnée variant de 10 à 12% en bande basse et de 20 à 35% en bande haute. Cependant, les simulations dosimétriques révèlent des niveaux de DAS qui peuvent dépasser les normes en vigueur du fait des fortes efficacités rayonnées obtenues avec les antennes conçues, notamment avec des pics préoccupant observés au niveau de l'œil. Des mesures dosimétriques sont actuellement en cours à l'Université de Loughborough pour confirmer ces faits. Si ces valeurs sont confirmées, il faudra ainsi envisager des techniques de réduction de niveau de DAS pour protéger les utilisateurs de lunettes connectées.

Introduction

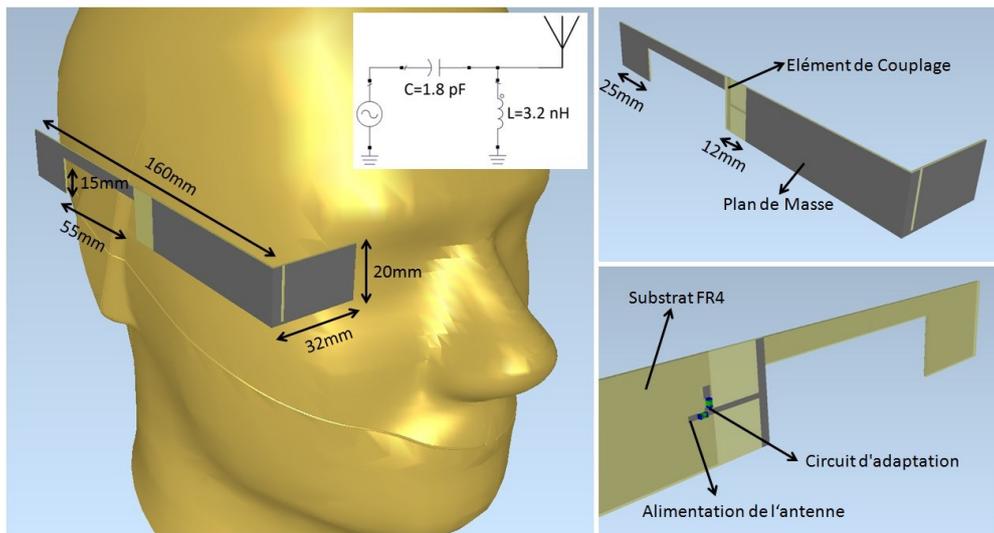
Durant ces dernières années, les objets connectés ont été plébiscités par le grand public : smartphones, appareils photos, montres, etc. Récemment, un intérêt fulgurant a émergé pour des lunettes connectées proposant des connexions en réalité augmentée. Ainsi, tous les fabricants d'objets nomades ont actuellement des études en cours dans ce domaine, le plus avancé d'entre eux étant "Google" avec ses Google Glasses qui devraient être mises sur le marché à la fin de l'année 2014 [1]. Ces premières lunettes utiliseront ainsi les protocoles Bluetooth 4.0 et Wi-Fi 802.11b/g pour une connectivité à 2,4 GHz. Sur ce produit, la partie antennaire du dispositif est placée le long de l'oreille comme cela est le cas dans une oreillette sans fil (headset) de smartphone [2, 3]. Comme les puissances mises en jeu dans le protocole Bluetooth et WLAN low power sont relativement faibles, le Débit d'Absorption Spécifique (DAS) n'est pas un facteur à surveiller dans le cas de ces "Google Glass" de première génération [4, 5]. La grande majorité des développeurs ayant eu en main ces lunettes ont jugé les prototypes excellent en termes d'usage et d'ergonomie mais ils ont aussi fortement pointé les limitations en termes de connectivité, uniquement Bluetooth et WLAN à ce jour: les lunettes nécessitent un smartphone à portée ou bien l'utilisateur est contraint à se trouver dans une zone couverte par le WiFi. Compte tenu de l'attractivité de cet objet et des possibilités d'usage offertes extrêmement attirantes, les spécialistes de ce type de télécommunications admettent que ces lunettes pourraient bien remplacer les smartphones dans un futur proche, si toutefois l'autonomie devient plus satisfaisante. Dans ce contexte, il y a donc clairement un besoin d'antenne 4G intégrées performantes pour les futures lunettes connectées de deuxième génération qui devront pouvoir échanger des données avec les réseaux cellulaires 4G. Ainsi, l'aspect dosimétrique et notamment les valeurs de DAS dans la tête de l'utilisateur devront donc être contrôlées avec précision (et éventuellement minimisées) vu les puissances mises en jeu dans les communications cellulaires 4G compte tenu des normes en vigueur qui doivent être strictement respectées.

Dans ce papier, nous présentons tout d'abord une étude de faisabilité d'antennes 4G (700-960MHz et 1,7-2,7GHz) intégrables dans des lunettes qui sont destinées à être connectées aux réseaux de communication cellulaires de dernière génération ainsi qu'aux réseaux personnels de type WLAN. Le concept antennaire d'Elément de Couplage associé à un circuit d'adaptation est ainsi évalué pour trois prototypes possibles en termes de coefficient de réflexion et d'efficacité rayonnée lorsque les lunettes sont positionnées sur la tête de l'utilisateur. Nous présentons également l'analyse dosimétrique des prototypes optimisés pour le fantôme homogène SAM et le fantôme évolué Visible Human (VH) : les niveaux de DAS dans ces deux fantômes sont simulés et comparés aux normes en vigueur. Dans un second temps, nous présentons les premiers résultats expérimentaux obtenus à travers la fabrication de prototypes. La fabrication a été réalisée en utilisant une imprimante 3D pour les lunettes et à partir de procédés de réalisation classique pour les PCB avec élément de couplage antennaire imprimé et circuit d'adaptation associé. Les mesures dosimétriques sont actuellement en cours à l'Université de Loughborough pour confirmer les simulations effectuées en présence du fantôme SAM.

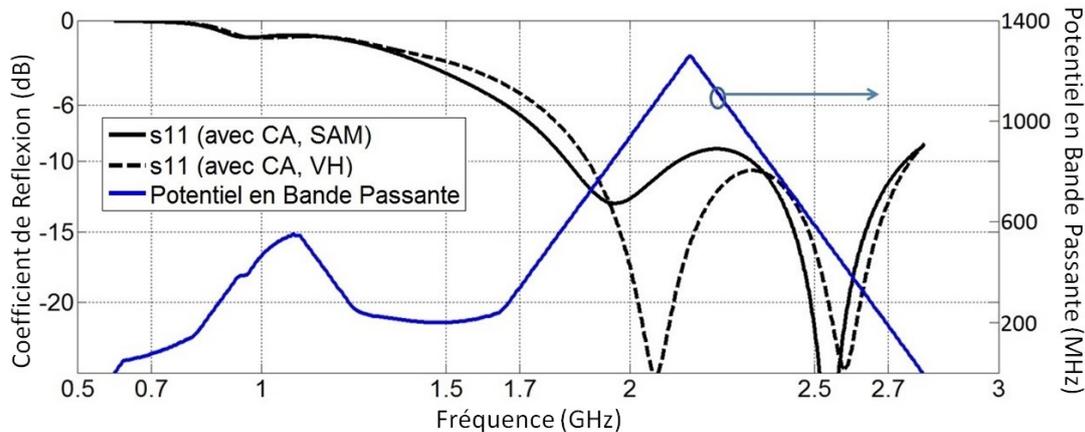
1. Etude de faisabilité

1.1. Proposition et optimisation de solutions antennaires

C'est un défi particulièrement délicat de concevoir une antenne bi-bande avec respectivement 30 et 45% de bande passante en 4G (700-960MHz ; 1,7-2,7GHz) avec un espace alloué est extrêmement réduit comme cela est le cas dans une paire de lunettes classique. Comme la longueur d'onde à 700MHz (42,8cm) est beaucoup plus grande que l'espace réservé pour la partie antennaire (2-3 cm), une antenne résonante n'est absolument pas appropriée. Nous proposons donc d'utiliser un élément de couplage (EC) pour exciter des courants HF sur le PCB électronique de ces lunettes et ainsi bénéficier d'un facteur de qualité plus faible et donc d'une bande passante plus élevée [6]. Un EC est alimenté de la même façon qu'un monopole mais il a la particularité d'être optimisé pour exciter efficacement les courants HF circulant sur le PCB. L'antenne est ensuite ajustée à l'impédance d'entrée souhaitée à l'aide d'un circuit d'adaptation (CA). Le PCB que nous avons simulé peut-être observé sur la Fig. 1 : nous avons ainsi choisi une géométrie et des dimensions réalistes à partir de données extraites de [1].



(a)



(b)

Fig. 1- (a) Prototype Antennaire 1 optimisé avec la présence du fantôme SAM
 (b) Résultats de simulation (coefficient de réflexion et PBP) pour le prototype 1 en présence du SAM et du VH

Il faut cependant préciser que nous n'avons pas considéré à ce stade de l'étude des montures de lunettes métalliques. En effet, il a été démontré dans [7, 8] que celles-ci ont un effet non négligeable sur les performances de l'antenne et les valeurs de DAS : ces effets seront précisément étudiés ultérieurement. Les simulations ont été systématiquement effectuées avec la présence de la tête SAM puis VH. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 1a, les dimensions totales du PCB en FR4 sont de $160 \times 20 \times 0.8 \text{ mm}^3$ avec une partie perpendiculaire en face de l'œil de $32 \times 20 \times 0.8 \text{ mm}^3$ et une partie évidée de $55 \times 15 \times 0.8 \text{ mm}^3$ au niveau de l'oreille. L'analyse de la structure nous a permis de conclure qu'il existait trois possibilités d'intégration pour un EC de type capacitif. La première possibilité consiste à placer l'EC au milieu de la longue portion du PCB, juste en face de l'oreille. Il s'agit d'un simple élément de couplage de type ruban de largeur 2mm, imprimé sur la face inférieure du PCB (face en regard du SAM). Les simulations et optimisations ont été effectuées avec le logiciel EMPIRE XCel 6.01. Le PBP est obtenu pour un CA de deux éléments réactifs et un coefficient de réflexion fixé, choisi ici à -6dB. Pour cela, en chaque point de fréquence, plusieurs circuits d'adaptations (différentes topologies et composants) sont optimisés pour satisfaire au critère choisi ($|S_{11}| < -6 \text{ dB}$). Le meilleur circuit (la plus grande bande passante) est retenu et le PBP retenu et tracé en ce point de fréquence traduit la bande passante en adaptation que l'on peut espérer couvrir avec un coefficient de réflexion inférieur à -6dB. Pour remplir nos objectifs, il faut donc que le PBP soit égal à 260 MHz à 830 MHz et 1 GHz à 2,2 GHz. Sur la Figure 1b, nous pouvons constater que le PBP est suffisant pour nos besoins en bande haute puisqu'il est supérieur à 1 GHz. Cependant, la courbe montre aussi qu'il n'est pas possible de couvrir la bande basse 700-960 MHz avec ce CE, principalement à cause de sa position qui n'est pas optimale pour l'excitation des courants sur le PCB à ces fréquences. Néanmoins, nous avons quand même optimisé un circuit d'adaptation composé d'une inductance parallèle de 3,2 nH et d'une capacité série de 1,8pF au niveau de l'alimentation du CE pour que ce prototype puisse fonctionner dans la bande 1,7-2,7 GHz avec un coefficient de réflexion inférieur à -6dB. Nous pouvons ainsi voir sur la Figure 1b qu'il existe un bon accord entre le $|S_{11}|$ obtenu en présence du fantôme SAM et le $|S_{11}|$ obtenu en présence du fantôme VH. L'efficacité rayonnée simulée prenant en compte les pertes dans les fantômes varie ainsi de 20 à 35% dans toute la bande de fréquences considérées.

Dans le prototype 2, le CE est placé derrière l'oreille (Fig. 2a). Il est évident que d'après la Figure 2b, le PBP obtenu dans les bandes basse et haute est plus élevé que celui obtenu avec le premier prototype. Ceci est dû au fait que les courants sont mieux excités avec cet EC, notamment pour profiter de toute la longueur du PCB disponible. Avec un CA de deux éléments (une inductance parallèle de 14 nH et une capacité série de 1,6 pF), un comportement bi-bande est obtenu, assurant la couverture 700-960 MHz et 1,7-2,7 GHz avec un coefficient de réflexion étant égal au plus à -6dB. Les réponses en $|S_{11}|$ de ce prototype 2 placé à côté du SAM ou du VH sont en bon accord. En moyenne, les efficacités rayonnées simulées sont de 9% en bande basse et 20% en bande haute.

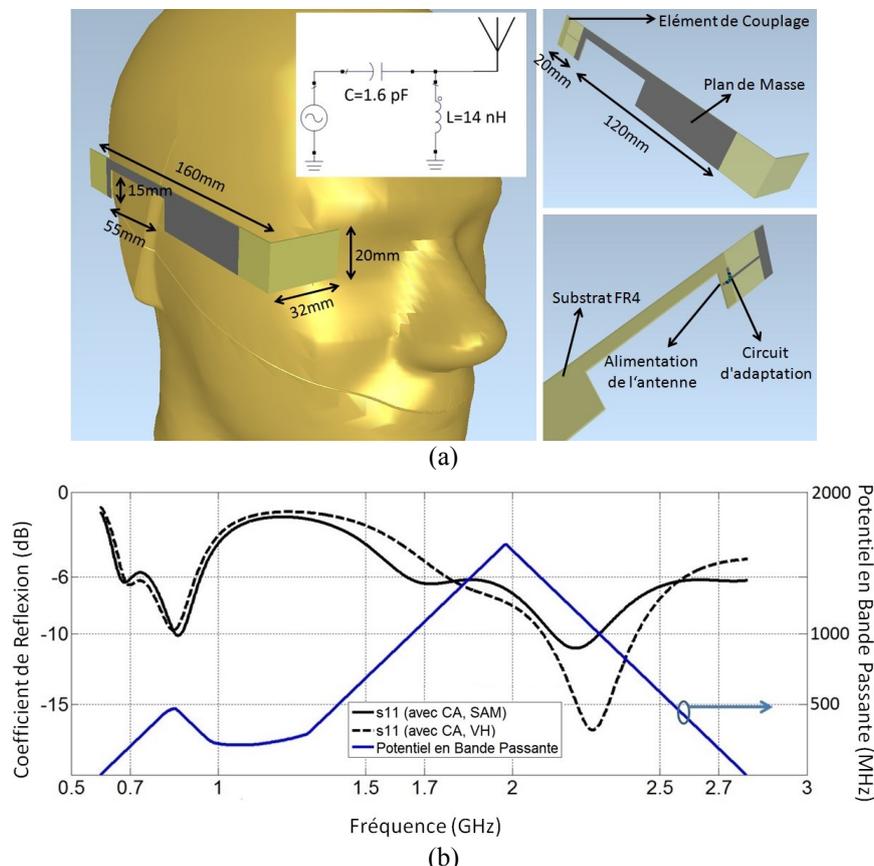
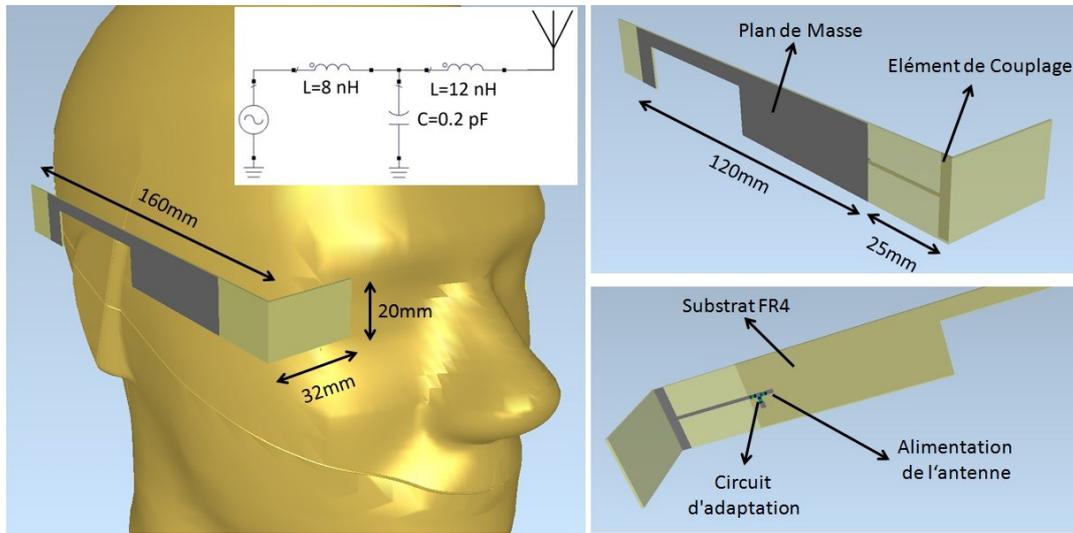
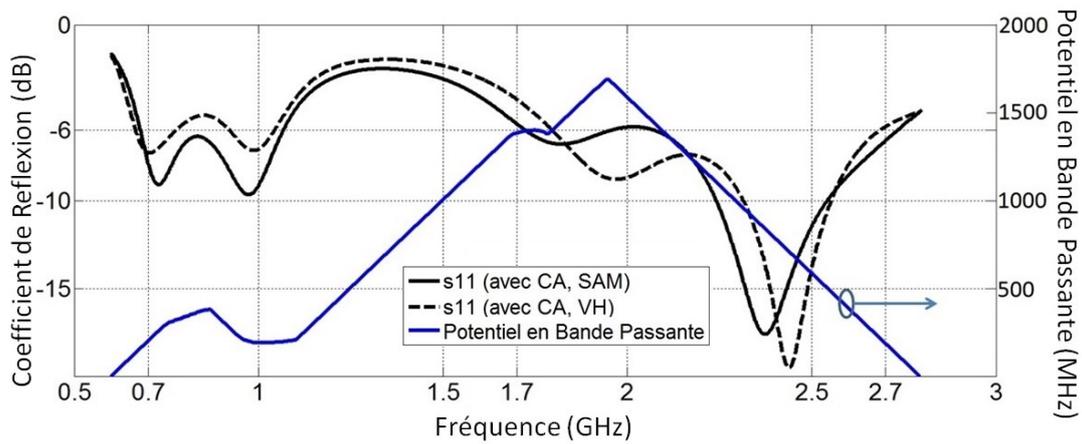


Fig. 2- (a) Prototype Antennaire 2 optimisé avec la présence du fantôme SAM
(b) Résultats de simulation (coefficient de réflexion et PBP) pour le prototype 2 en présence du SAM et du VH

Le CE du prototype 3 est placé au bout de la branche, proche de l'oeil (Figure 3a). Une couverture bi-bande est obtenue avec cet EC en utilisant un circuit d'adaptation à trois éléments (deux inductances série de 8 et 12 nH et une capacité shunt de 0.2pF) placés au niveau de l'alimentation du CE. Un bon accord est observé entre le coefficient de réflexion simulé avec le fantôme SAM et celui simulé avec la tête VH. L'efficacité de rayonnement moyenne simulée prenant en compte les pertes dans les fantômes est de 14% en bande basse et de 36% en bande haute.



(a)



(b)

Fig. 3- (a) Prototype Antennaire 3 optimisé avec la présence du fantôme SAM
 (b) Résultats de simulation (coefficient de réflexion et PBP) pour le prototype 3 en présence du SAM et du VH

Les diagrammes de rayonnement en 3D des trois prototypes optimisés sont présentés sur la Figure 4, pour un point de fréquence en bande basse (800 MHz) et un point de fréquence en bande haute (2,2 GHz). Tous les prototypes optimisés ont une tendance naturelle à rayonner dans la direction perpendiculaire à l'antenne, opposée à la tête comme cela est le cas avec les téléphones mobiles. Cependant, il est néanmoins très important de contrôler les niveaux de DAS qui sont engendrés dans les fantômes SAM et VH par les prototypes qui ont été conçus.

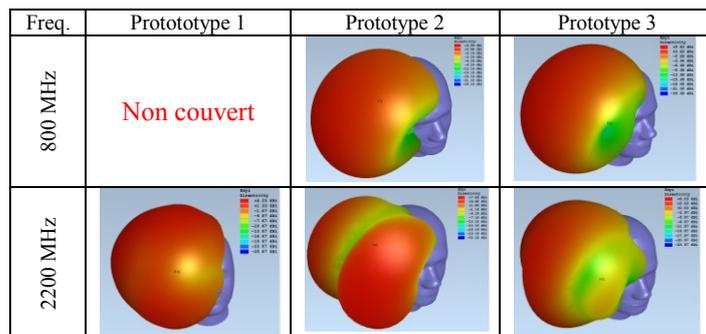


Fig. 4- Diagrammes de rayonnement simulés à 800 MHz et 2,2 GHz pour tous les prototypes optimisés

1.2. Analyse Dosimétrique

Durant les 20 dernières années, il y a eu un intérêt public et scientifique tout particulier concernant l'étude de la nocivité des champs électromagnétiques rayonnés par un téléphone mobile. Aujourd'hui, la puissance émise par un téléphone mobile est entre autre précisément règlementée pour notamment limiter la puissance des signaux absorbés dans la tête de l'utilisateur. Le paramètre dosimétrique important est le Débit d'Absorption Spécifique (DAS). Il décrit la puissance absorbée dans les tissus humains par unité de masse (W/kg). Il existe deux normes en vigueur : Européenne qui stipule un DAS limite de 2W/kg moyennée sur 10g pendant 6mn [10] tandis que la norme Nord-Américaine définit une limite stricte de 1,6W/kg moyennée sur 1g pendant 30mn [11]. De très nombreux papiers ont examiné le niveau de DAS dans la tête de l'utilisateur à l'aide d'un fantôme homogène SAM ou un fantôme hétérogène [12, 13]. La valeur de DAS moyennée sur 1g est typiquement le double du DAS moyenné sur 10g. Le fantôme SAM engendre généralement une valeur de DAS supérieure au fantôme hétérogène et il est aujourd'hui bien établi que la valeur de DAS engendrée par un téléphone mobile dépend de la fréquence, de la distance de la source électromagnétique par rapport à la tête mais surtout du type d'antenne utilisé. De plus, le DAS obtenu dans un fantôme homogène décroît de façon exponentielle en fonction de la distance par rapport à la source. La situation est plus complexe pour une tête d'utilisateur réaliste (ou un fantôme hétérogène) car celle-ci est constituée de plusieurs tissus ayant des propriétés diélectriques différentes ce qui crée des discontinuités au niveau des interfaces mises en jeu. Ces interfaces peuvent ainsi générer des résonances dans certaines parties du corps, comme cela est fréquemment le cas pour les yeux : les champs électriques vont augmenter au lieu de décroître naturellement avec la distance qui augmente par rapport à la source. Ainsi, il a été démontré dans [8, 14, 15] que si l'on expose les yeux à une densité de puissance donnée, le DAS peut-être deux fois supérieur au DAS obtenu dans les tissus environnants, notamment à des fréquences spécifiques telles que 600 MHz et 2,4 GHz, selon la présence plus ou moins forte de liquide dans ces organes et aussi l'angle d'incidence et la polarisation des ondes émises par la source. De plus, il a déjà été démontré par certains auteurs de cette communication que de possibles branches métalliques de lunettes agissaient comme des diffracteurs passifs d'ondes électromagnétiques et que le niveau de DAS dans la tête de l'utilisateur et plus précisément dans les yeux pouvait augmenter de façon significative dans ce cas précis [8]. Comme les branches métalliques de lunettes englobent le tour de tête en passant près des yeux, il est important dans ce cas-là d'utiliser en simulation un fantôme anatomique qui inclut ces yeux mais le DAS ne peut être évalué qu'en simulation. Tous les niveaux de DAS qui ont été simulés ont ainsi été normalisés à 0,25W pour prendre en compte la puissance moyenne mise en jeu [13]. Il est à noter que le DAS dans la bande GSM1800 doit-être normalisé à 0,125 W pour rester réaliste.

1.2.1 Fantôme SAM

Les niveaux de DAS simulés dans le cas du fantôme SAM sont présentés dans le tableau I. Ils sont normalisés pour une puissance incidente de 0,25W et pour une puissance injectée de 0,25W (pas de désadaptation au niveau du port d'entrée). Des liquides avec des propriétés diélectrique différentes ont été utilisées pour les différentes bandes de fréquence ($\epsilon_r = 41,5$; $\tan\delta = 0,467$) à 835MHz et ($\epsilon_r = 39,2$; $\tan\delta = 0,337$) à 2500MHz. Les valeurs de DAS qui sont supérieures aux normes sont indiquées en gras italique. Globalement, la proximité de la source par rapport à la tête de l'utilisateur et l'absence de plan de masse "blindant" comme c'est le cas avec un PCB de téléphone mobile engendrent des valeurs de DAS bien supérieures à celles obtenues avec un téléphone mobile. Il faut aussi noter que les efficacités rayonnées obtenues avec les prototypes que nous avons conçus sont aussi largement supérieures aux efficacités qui sont observées avec les smartphones modernes, en mode utilisation (tête et main de l'utilisateur pris en compte) : 5% en bande basse et 15% en bande haute tandis que nous obtenons comparativement 10/15% et 20/35 % avec nos prototypes. Le DAS 1g est systématiquement au-dessus de 1.6 W/kg mais les niveaux simulés sont légèrement plus acceptables pour la norme 10g de 2W/kg : ils sont uniquement supérieurs à la norme en bande basse (sauf pour le prototype 1 à 2200 MHz). Avec le prototype 3, toutes les valeurs de DAS sont systématiquement inférieures aux autres car la source se trouve positionnée plus loin de la tête dans ce cas.

TABLEAU I : VALEURS DE DAS SIMULEES DANS LE FANTOME SAM (W/KG)

Prototype	Freq. (MHz)	0,25W de puissance incidente		0,25W de puissance injectée (sans S ₁₁)	
		1g DAS	10g DAS	1g DAS	10g DAS
1	1900	<i>7,86</i>	<i>3,32</i>	<i>8,37</i>	<i>3,53</i>
1	2200	<i>4,31</i>	<i>2,07</i>	<i>4,88</i>	<i>2,35</i>
1	2500	<i>4,36</i>	1,54	<i>4,39</i>	1,55
2	835	<i>4,33</i>	<i>2,08</i>	<i>4,96</i>	<i>2,39</i>
2	1900	<i>2,97</i>	1,47	<i>3,89</i>	1,92
2	2200	<i>4,18</i>	1,99	<i>4,54</i>	<i>2,16</i>
2	2500	<i>3,68</i>	1,83	<i>4,69</i>	<i>2,33</i>
3	835	<i>4,17</i>	<i>2,03</i>	<i>5,50</i>	<i>2,68</i>
3	1900	<i>2,47</i>	1,18	<i>3,19</i>	1,53
3	2200	<i>2,22</i>	1,04	<i>2,60</i>	1,22
3	2500	<i>1,96</i>	0,82	<i>2,11</i>	0,89

1.2.2 Fantôme VH

Les niveaux de DAS simulés dans le cas du fantôme VH sont présentés dans le tableau II. Les propriétés des tissus du VH simulées à l'aide du logiciel EMPIRE XCell sont dispersives et sont donc automatiquement réajustées avec les variations de fréquences lors des simulations. Les résultats obtenus sont proches des niveaux de DAS obtenus avec le SAM notamment avec un DAS 1g systématiquement au-dessus de la norme de 1.6 W/kg mais systématiquement en dessous de la norme 10g de 2W/kg. La tête hétérogène VH a notamment une géométrie externe différente du SAM et ainsi, les distances source-tête sont légèrement modifiées par rapport aux simulations effectuées avec le SAM. Excepté pour le prototype 3 à 2500 MHz, les niveaux de DAS avec le VH sont systématiquement inférieurs aux niveaux de DAS rencontrés avec le SAM. Dans nos simulations, un très intéressant phénomène a été observé : la section métallique du PCB en face de l'œil induit une onde qui se propage superficiellement dans les tissus au niveau de l'œil. Quelques distributions du DAS sont présentées pour les trois prototypes (Fig. 5) et confirment que le DAS maximum apparaît systématiquement sur le côté de la tête avec des spots secondaires inquiétant autour de l'œil (pour les prototypes 1 et 3). Ces résultats nécessitent des investigations plus poussées et éventuellement des techniques spécifiques pour une réduction de tels niveaux de DAS.

TABLEAU II : VALEURS DE DAS SIMULEES DANS LE FANTOME VH (W/KG)

Prototype	Freq. (MHz)	Eff. (%)	0,25W de puissance incidente		0,25W sans S ₁₁	
			1g DAS	10g DAS	1g DAS	10g DAS
1	1900	25,2	3,53	1,64	3,86	1,79
1	2200	36,0	2,90	1,32	3,04	1,38
1	2500	42,1	1,80	0,85	1,84	0,87
2	835	10,0	1,50	0,97	1,69	1,09
2	1900	19,8	1,64	0,83	2,03	1,03
2	2200	21,2	2,25	1,09	2,35	1,14
2	2500	20,9	2,51	1,14	3,04	1,38
3	835	12,7	1,32	0,80	1,88	1,14
3	1900	38,0	2,40	0,91	2,83	1,07
3	2200	33,3	2,32	1,00	2,82	1,21
3	2500	37,2	2,62	1,01	2,73	1,05

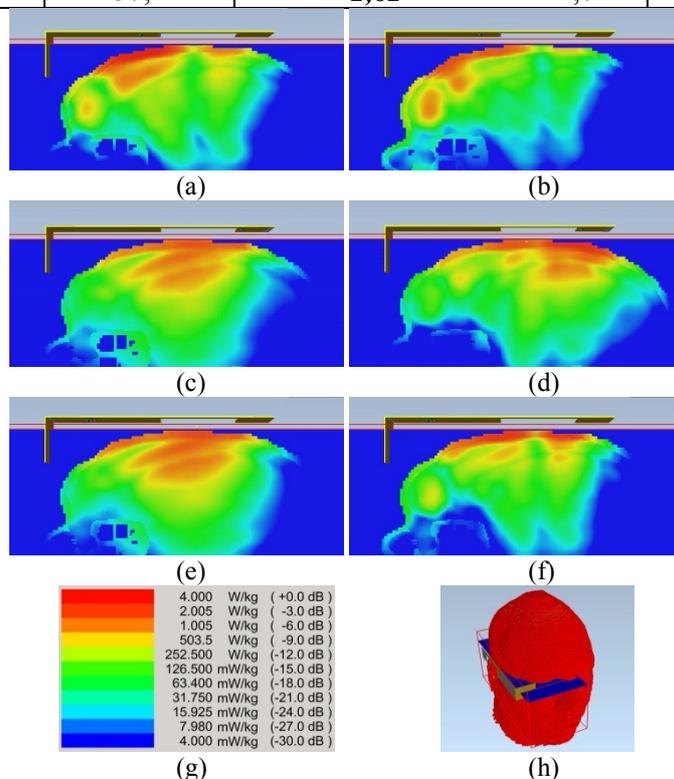


Fig. 5- Distribution de DAS 1g simulées dans le fantôme VH. (a) Prototype 1 à 1900MHz; (b) Prototype 1 à 2500MHz; (c) Prototype 2 à 835MHz; (d) Prototype 2 à 2500MHz; (e) Prototype 3 à 835MHz et (f) Prototype 3 à 2500MHz. (g) Echelle utilisée pour toutes les distributions de DAS; (h) Plan horizontal dans la tête du VH dans lequel les distributions de DAS ont été simulées.

1.3 Conclusion sur l'étude de faisabilité

Dans cette étude de faisabilité, nous avons présenté trois positions possibles pour des antennes 4G pour lunettes connectées opérant dans les bandes 700-960 MHz et 1,7-2,7 GHz. De très bonnes efficacités rayonnées variant en moyenne de 10-15% à 835 MHz et 20-35% en bande haute ont été obtenues. Généralement, les niveaux de DAS dans la tête ont été démontrés supérieurs aux normes 1g mais inférieurs aux normes 10g (sauf exception) lorsque la puissance de normalisation est prise à 0,25W. Pour certains prototypes et certaines fréquences, des pics de DAS sont observés dans l'œil. Cette étude de faisabilité valide notre approche et nous a donc incité à pousser plus loin nos investigations pour fabriquer de premiers prototypes de lunettes connectées 4G et ainsi les mesurer.

2 Fabrication de prototypes et premières mesures associées

L'étape suivante a donc consisté à concevoir et fabriquer des lunettes et un PCB réalistes. Nous avons tout d'abord sélectionné un procédé de fabrication classique pour le PCB où l'EC allait être simplement imprimé et le circuit d'adaptation associé au plus près de cet EC. Des lunettes où une des branches est remplacée par le PCB incorporé dans un boîtier ont été notamment développées et fabriquées à l'aide d'une imprimante 3D qui utilise un matériau ABS plastique ($\epsilon_r=2,97$, $\delta_{\text{loss}}=0,029$), l'idée étant d'utiliser des solutions de prototypages faible cout et rapides. Nous pouvons voir sur la Figure 6 le modèle conçu et simulé où trois trous ont été incorporés du côté extérieur de la branche en ABS pour laisser passer le câble d'alimentation en connectique WFL selon le prototype mesuré (Figure 7). Le PCB s'insère naturellement dans la branche modifiée et il est maintenu par des ergots de positionnement. Trois prototypes antennaires ont été optimisés, deux d'entre eux étant notamment très proches des prototypes numéro 2 et 3 présentés dans la partie concernant l'étude de faisabilité. Un troisième prototype inédit a été conçu où l'antenne présente un coefficient de réflexion toujours inférieur à -6dB de 700 MHz à 2,7 GHz. La Figure 8 montre le docteur Will Whittow portant les lunettes connectées fabriquées, tandis que la Figure 9 montre ces lunettes positionnées sur un fantôme SAM. En simulation, trois différents cas d'utilisation ont été envisagé : les lunettes positionnées sur la tête (antennes optimisées pour ce cas), lunettes positionnées sur la tête et doigt de la main de l'utilisateur utilisant le touchpad (Figure 10), lunettes en espace libre (Figure 11a, cas où les lunettes doivent pouvoir capter un appel téléphonique entrant). Les mesures des paramètres S_{ij} et des caractéristiques de rayonnement ont été effectués selon les cas de figures présentées sur la Figure 11 a et b, dans une chambre SATIMO.

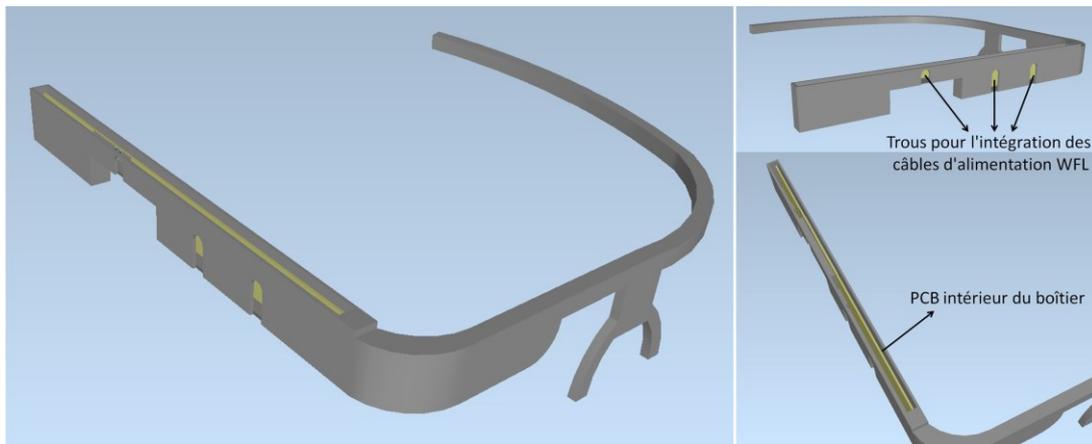


Fig. 6- Modèle de simulation conçu pour les lunettes connectées 4G



Fig. 7- Modèle de lunettes connectées 4G fabriquée à l'aide d'une imprimante 3D

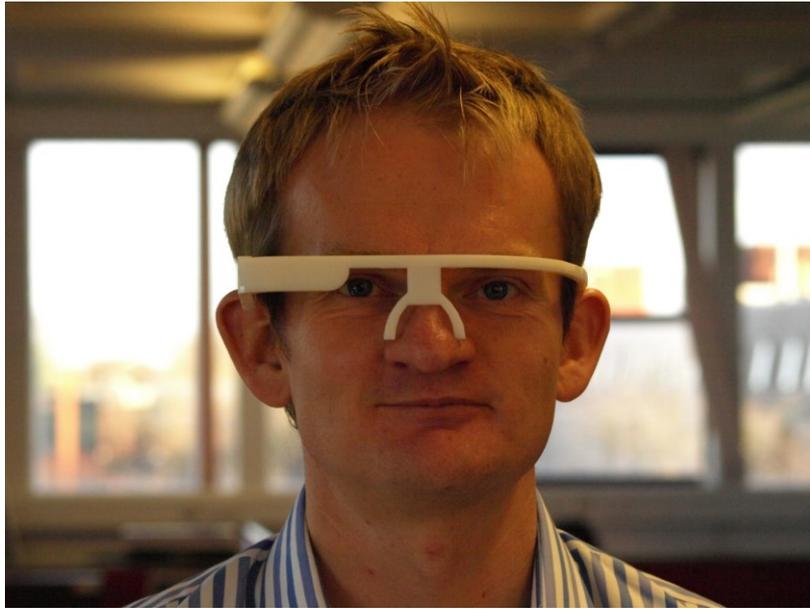


Fig. 8- Lunettes positionnées sur le docteur Will Whittow

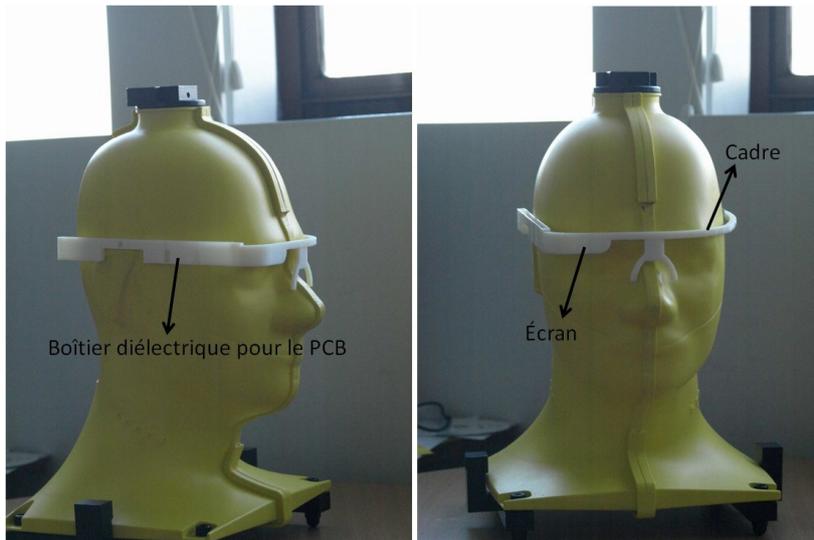


Fig. 9- Lunettes positionnées sur le fantôme SAM

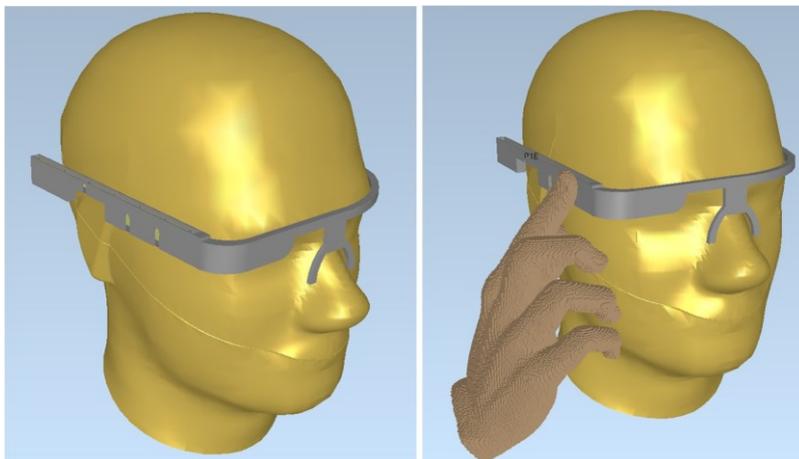


Fig. 10- Lunettes positionnées sur le fantôme SAM pour le cas d'utilisation principal et le cas où le doigt de la main de l'utilisateur est positionné sur le touchpad

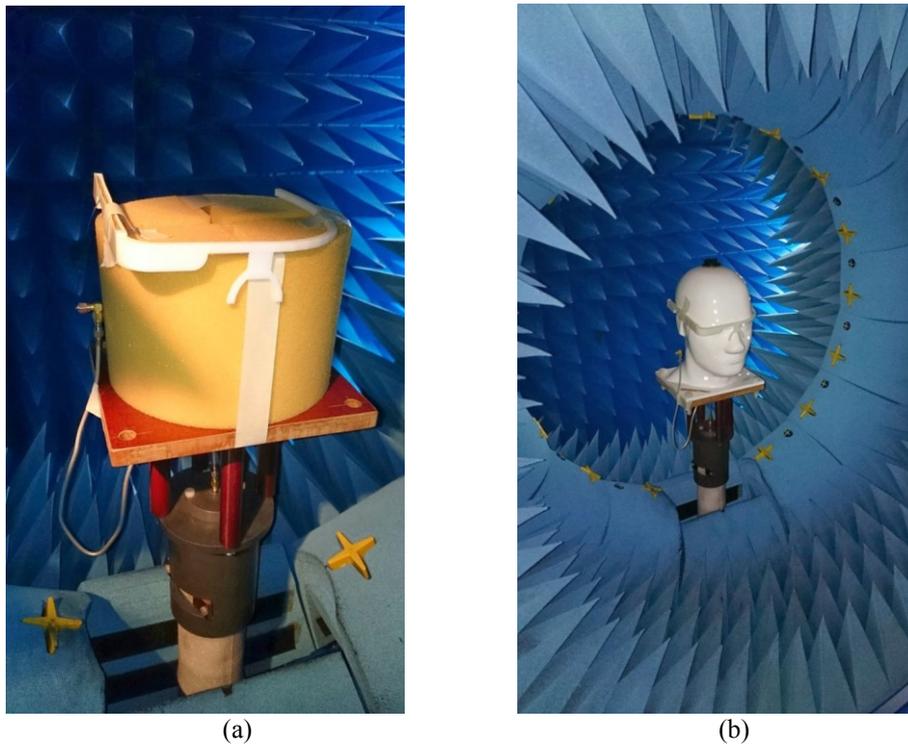


Fig. 11- Lunettes positionnées dans une chambre SATIMO pour mesures de paramètres S_{ij} et de rayonnement
 (a) Lunettes positionnées sur un support en mousse pour utilisation en espace libre
 (b) Lunettes positionnées sur le fantôme SAM pour le cas d'utilisation principal

Le prototype 2 a été optimisé en plaçant l'EC proche de l'œil, avec un circuit d'adaptation à trois éléments pour couvrir les bandes 700-960 MHz et 1,7-2,7 GHz (Figure 12). L'effet du doigt de la main de l'utilisateur sur le coefficient de réflexion peut-être observé sur la Figure 13. Il n'est pas négligeable en bande haute car le doigt est positionné de façon très proche de l'antenne.

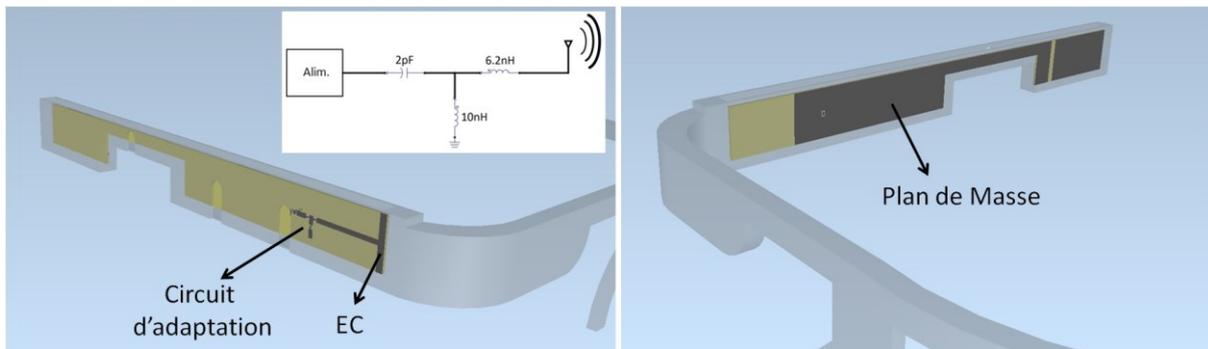


Fig. 12- Prototype optimisé 2

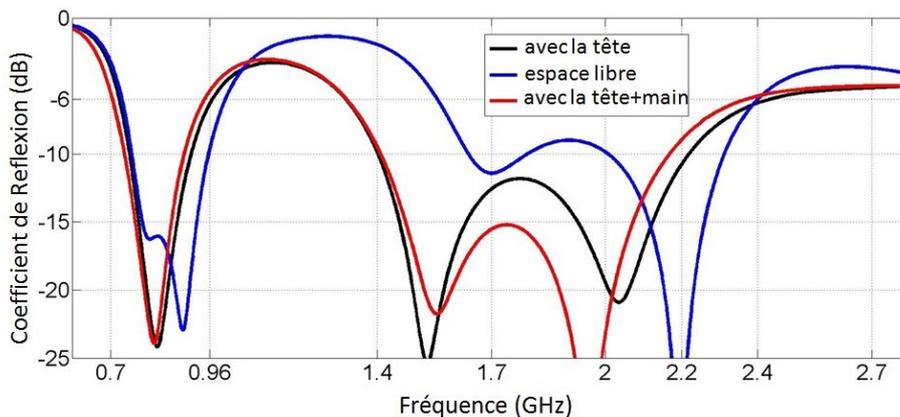


Fig. 13- Coefficient de réflexion du Prototype optimisé 2 dans les trois cas d'utilisation visés

Le PCB fabriqué est présenté sur la Figure 14, côté plan de masse (le circuit d'adaptation et le connecteur WFL sont positionnés sur l'autre face). Les coefficients de réflexion mesurés et simulés en présence du fantôme SAM, pour le prototype 2 sont présentés sur la Figure 15. L'accord est très correct mais les courbes divergent au-delà de 2,2 GHz. L'effet du doigt de la main de l'utilisateur sur le coefficient de réflexion n'a pas encore pu être mesuré car il nécessite un aménagement non trivial du dispositif de mesure. Les courbes d'efficacité mesurées du prototype 2 en espace libre et en présence du fantôme SAM sont présentées sur la Figure 16. Avec le fantôme SAM, les niveaux d'efficacité oscillent de 9 à 15% en bande basse et de 20 à 35% en bande haute.



Fig. 14- PCB fabriqué pour le Prototype 2

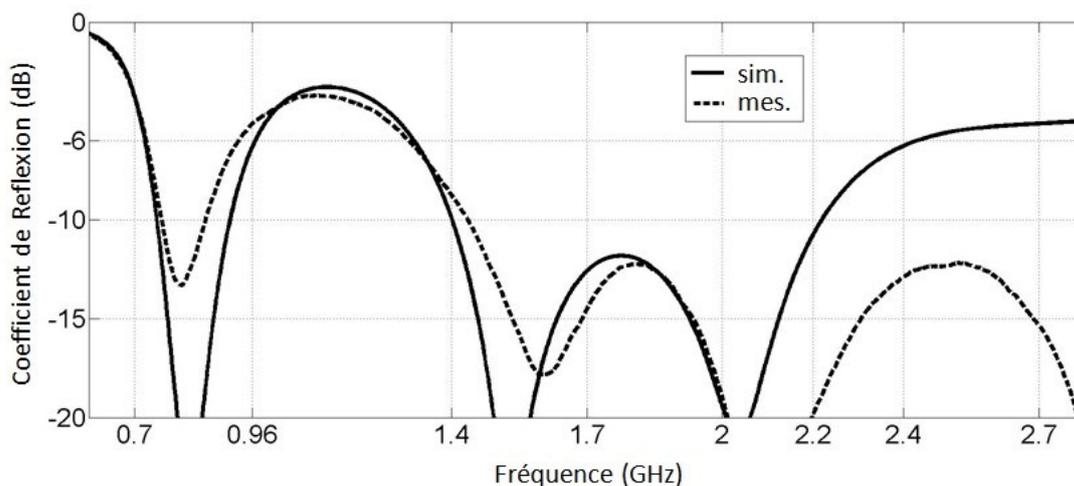


Fig. 15- Coefficient de réflexion simulé et mesuré du Prototype 2 en présence du SAM

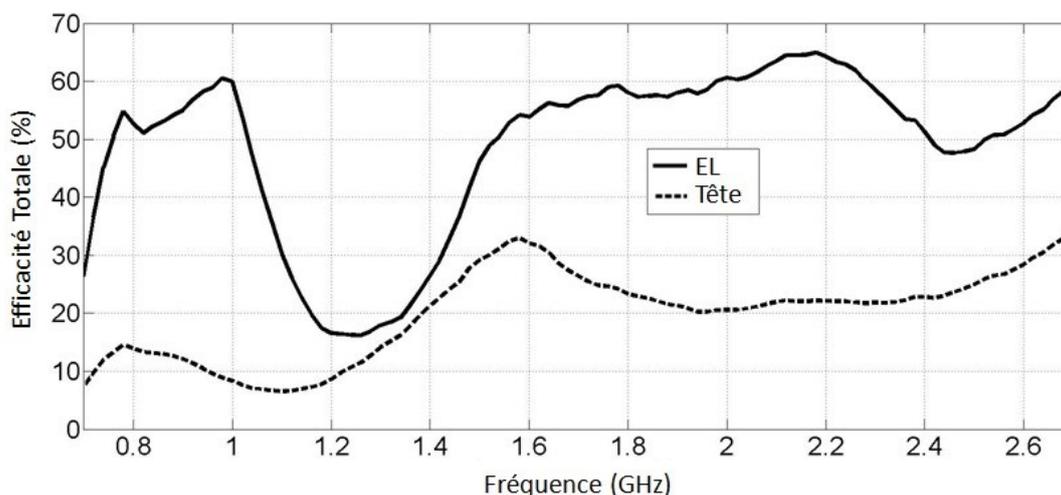


Fig. 16- Efficacité mesuré du Prototype 2 en espace libre (EL) et en présence du SAM (tête)

Le prototype 3 a été optimisé en plaçant l'EC entre l'oreille et l'œil, avec un circuit d'adaptation à trois éléments pour couvrir les bandes 700-960 MHz et 1,7-2,7 GHz (Figure 17). L'effet du doigt de la main de l'utilisateur sur le coefficient de réflexion peut-être observé sur la Figure 18. Il est presque négligeable en bande haute. Les coefficients de réflexion mesurés et simulés en présence du fantôme SAM, pour le prototype 3 sont présentés sur la Figure 19. L'accord est vraiment très correct même si les courbes divergent légèrement au-delà de 2,2 GHz. Les courbes d'efficacité mesurées du prototype 3 en espace libre et en présence du fantôme SAM sont présentées sur la Figure 20. Avec le fantôme SAM, les niveaux d'efficacité oscillent de 7 à 12% en bande basse et de 9 à 18% en bande haute.

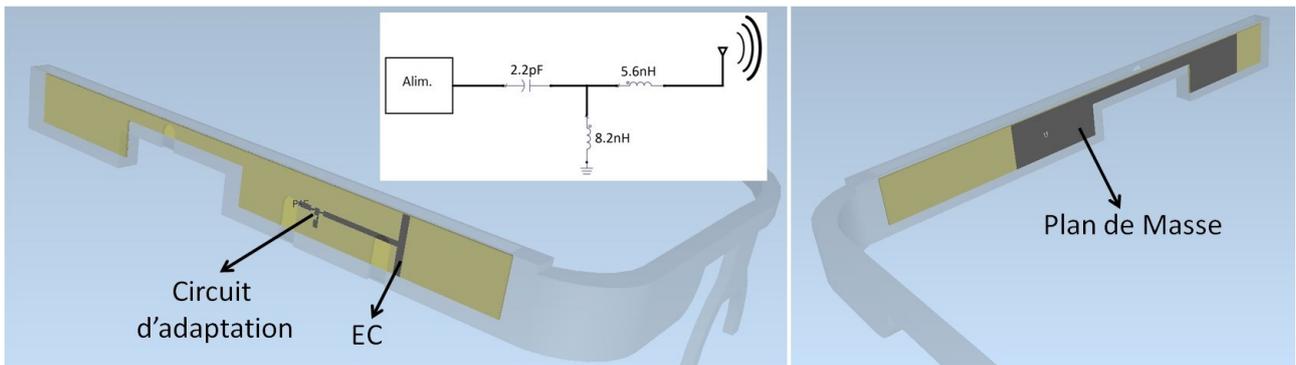


Fig. 17- Prototype optimisé 3

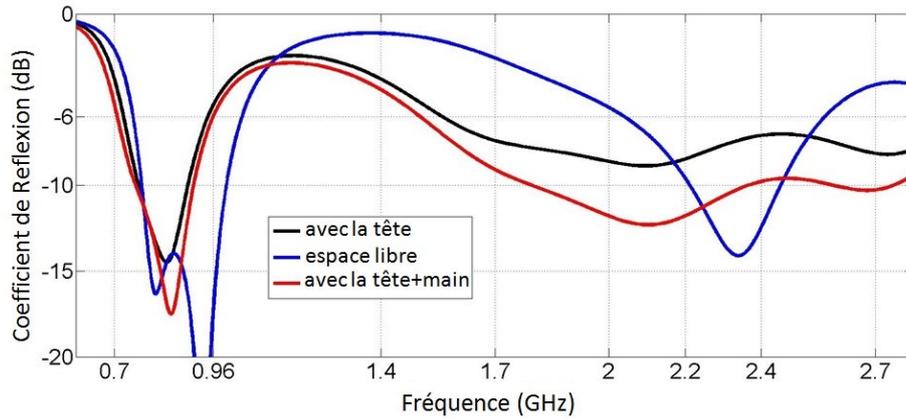


Fig. 18- Coefficient de réflexion du Prototype optimisé 3 dans les trois cas d'utilisation visés

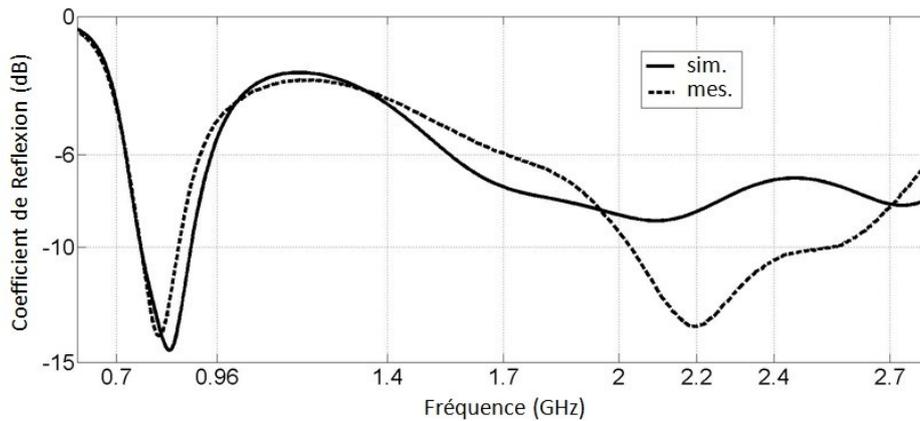


Fig. 19- Coefficient de réflexion simulé et mesuré du Prototype 3 en présence du SAM

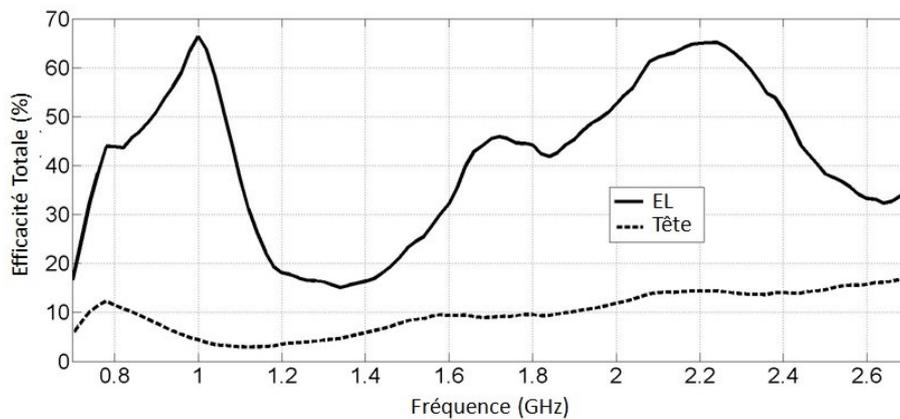


Fig. 20- Efficacité mesuré du Prototype 3 en espace libre (EL) et en présence du SAM (tête)

Le nouveau prototype 1 a été optimisé en plaçant l'EC derrière l'oreille et l'œil, avec un circuit d'adaptation à trois éléments pour couvrir la bande 700-2700 MHz de façon continue (Figure 21). L'effet du doigt de la main de l'utilisateur sur le coefficient de réflexion peut-être observé sur la Figure 22. Il est complètement. Le PCB fabriqué est présenté sur la Figure 23, côté EC où l'on peut voir le circuit d'adaptation et le connecteur miniature WFL. Les coefficients de réflexion mesurés et simulés en présence du fantôme SAM, pour le prototype 1 sont présentés sur la Figure 24. Un bon accord est observé même si les courbes divergent encore au-delà de 2,2 GHz. Les courbes d'efficacité mesurées du prototype 1 en espace libre et en présence du fantôme SAM sont présentées sur la Figure 25. Avec le fantôme SAM, les niveaux d'efficacité restent entre 15 et 16% en bande basse et entre 16 à 21% en bande haute.

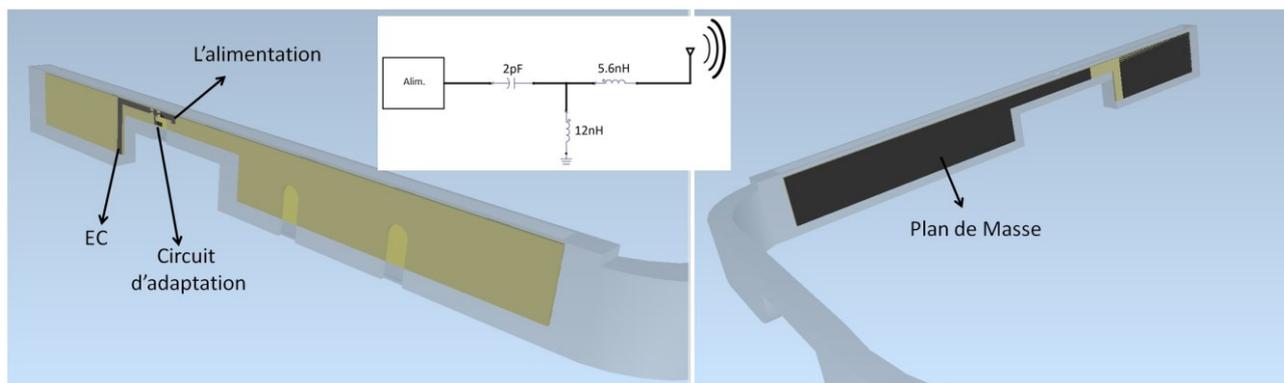


Fig. 21- Prototype optimisé 1

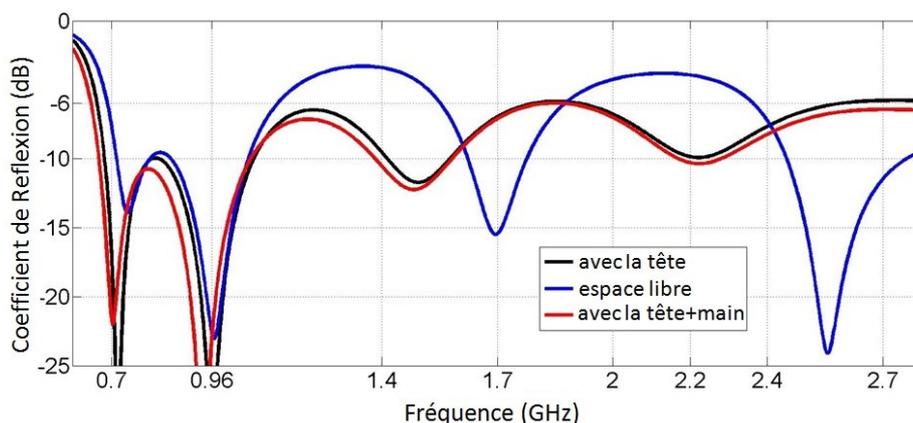


Fig. 22- Coefficient de réflexion du Prototype optimisé 1 dans les trois cas d'utilisation visés

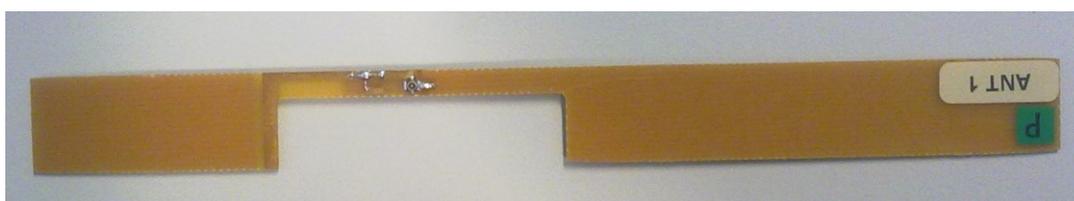


Fig. 23- PCB fabriqué pour le Prototype 1

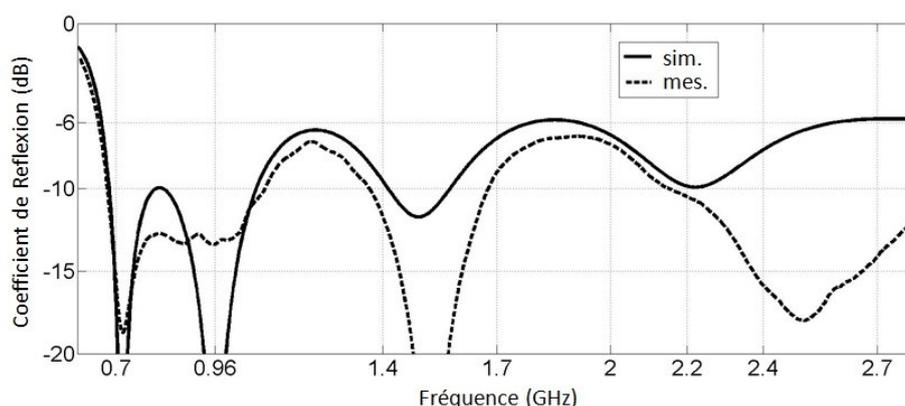


Fig. 24- Coefficient de réflexion simulé et mesuré du Prototype 1 en présence du SAM

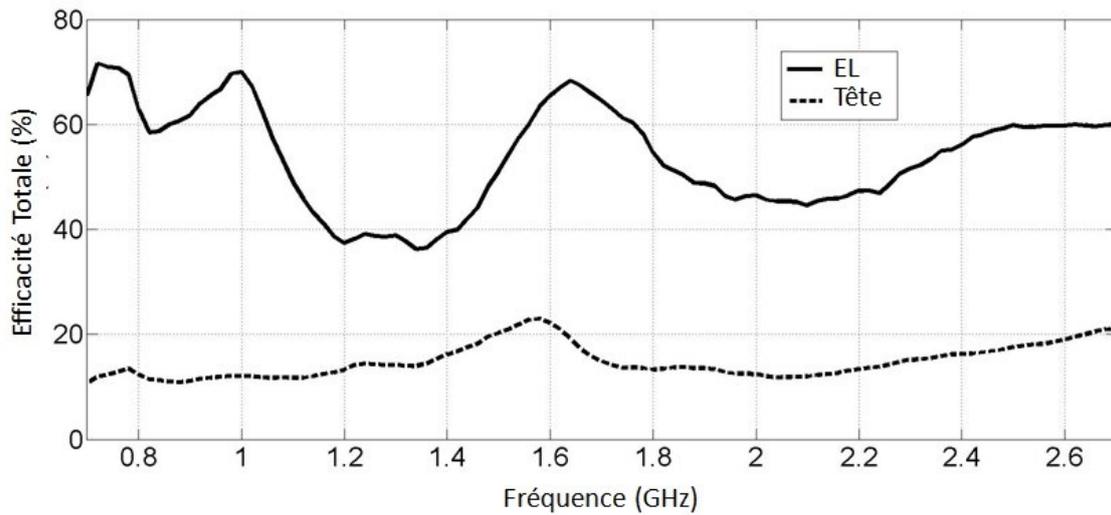


Fig. 25- Efficacité mesuré du Prototypé 1 en espace libre (EL) et en présence du SAM (tête)

Sur ce même prototype 1, nous avons effectué plusieurs mesures du coefficient de réflexion lorsque les lunettes étaient portées par des utilisateurs réels (Figure 26). Ces coefficients de réflexion sont assez similaires pour deux utilisateurs différents (Figure 27). Ils restent réellement en dessous de -6dB de 700 MHz à 2700 MHz. La comparaison avec le coefficient de réflexion simulé en présence du fantôme homogène SAM démontre un accord modéré.

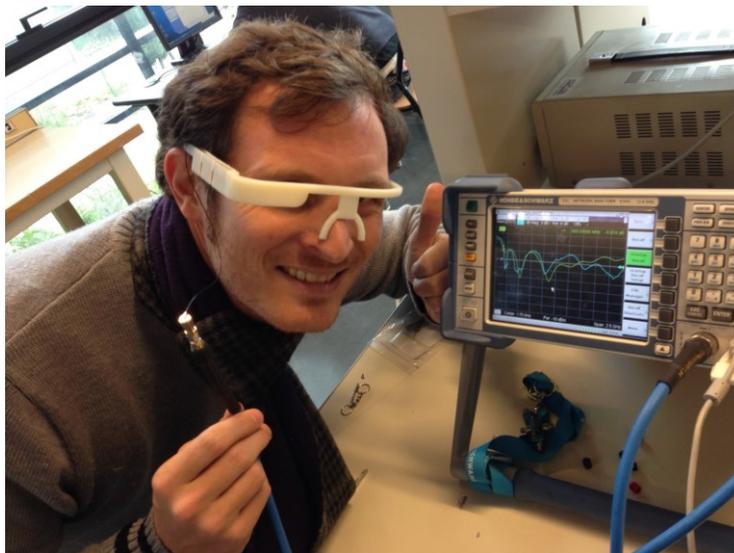


Fig. 26- Coefficient de réflexion mesuré du Prototypé 1 en présence de la tête du docteur Fabien Ferrero

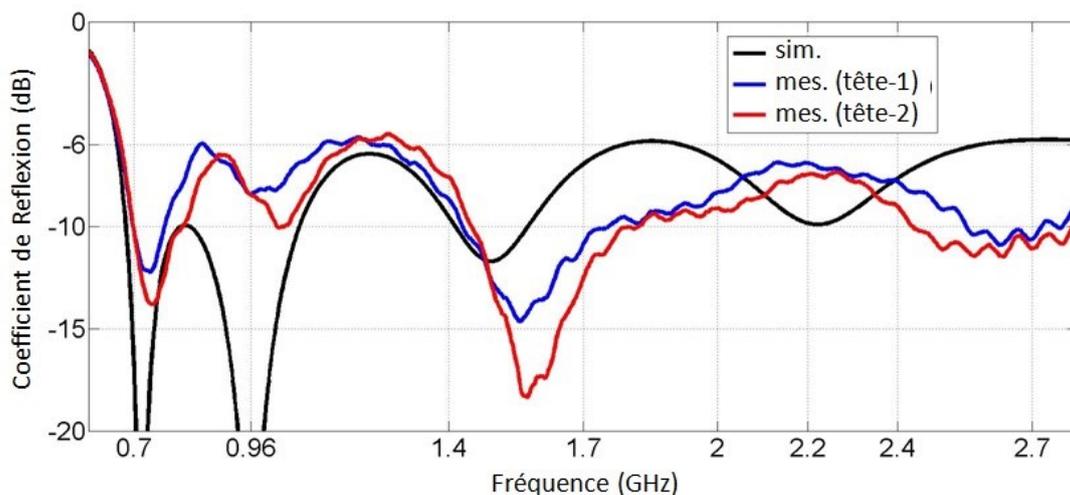


Fig. 27- Coefficient de réflexion mesuré du Prototypé 1 en présence de deux têtes d'utilisateur. La simulation est effectuée avec le fantôme homogène SAM.

Enfin, la Figure 28 montre une mesure de coefficient de réflexion lorsque un câble WFL court un câble WFL long est utilisé (la calibration effectuée prend en compte les pertes dans ces câbles). De petites différences non significatives sont observées même si la mesure effectuée avec le câble court semble présenter moins d'oscillations. Le dispositif en cours de développement pour les mesures en présence de la main de l'utilisateur est présenté sur la Figure 29. Ces mesures seront effectuées très prochainement.

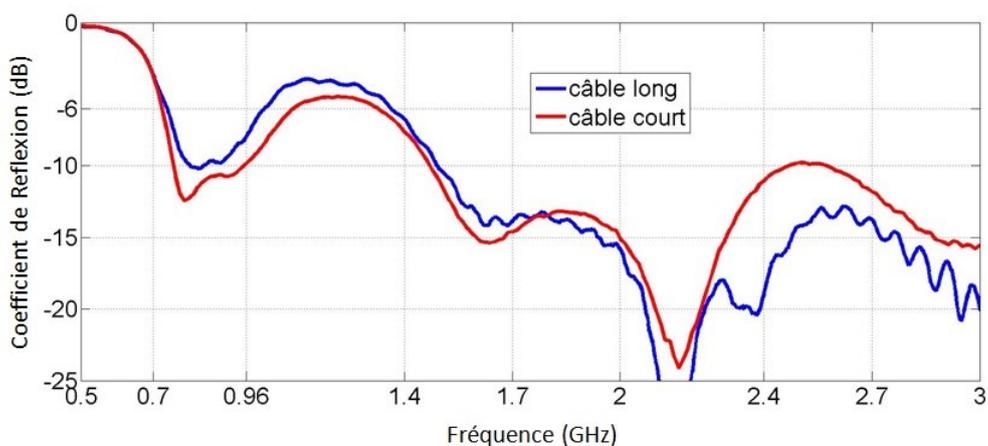


Fig. 28- Coefficient de réflexion mesuré du Prototype 1 en présence de deux têtes d'utilisateur.



Fig. 29- Dispositif en cours de développement (Orange Labs) pour des mesures en présence de la main de l'utilisateur

Enfin, les niveaux de DAS n'ont pas pu encore être mesurés. Ils le seront très prochainement à l'Université de Loughborough. Des simulations ont bien évidemment été effectuées avec les nouveaux prototypes de lunettes et d'antennes. Les mêmes comportements observés dans l'étude de faisabilité ont été obtenus : globalement, des niveaux de DAS 1g supérieurs à la norme et des niveaux de DAS 10g inférieurs à la norme. Le plan de coupe utilisé est présenté sur la Figure 30a et une des distributions obtenue à 700 MHz sur la Figure 30b (non normalisée) où l'on constate une très forte distribution au niveau de l'œil.

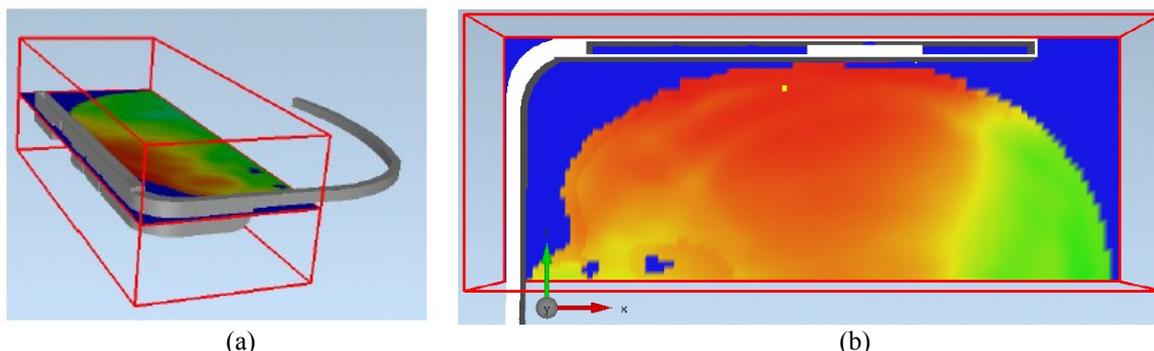


Fig. 30- Distribution de DAS 1g simulées dans le fantôme VH à 700 MHz pour un des nouveaux prototypes

3 Conclusion

Dans ce papier, nous avons tout d'abord présenté une étude de faisabilité d'antennes 4G (700-960MHz et 1,7-2,7GHz) intégrables dans des lunettes qui sont destinées à être connectées aux réseaux de communication cellulaires de dernière génération ainsi qu'aux réseaux personnels de type WLAN. Le concept antennaire d'Élément de Couplage imprimé associé à un circuit d'adaptation est ainsi évalué pour trois prototypes possibles en termes de coefficient de réflexion et d'efficacité rayonnée lorsque les lunettes sont positionnées sur la tête de l'utilisateur. Nous avons également présenté l'analyse dosimétrique des prototypes optimisés pour le fantôme homogène SAM et le fantôme évolué Visible Human (VH) : les niveaux de DAS dans ces deux fantômes sont simulés et comparés aux normes en vigueur. Dans un second temps, nous avons présenté les premiers résultats expérimentaux obtenus à travers la fabrication de prototypes utilisant une imprimante 3D pour la réalisation des lunettes et utilisant des procédés de réalisation classique pour les PCB avec élément de couplage antennaire imprimé et circuit d'adaptation associé. Les valeurs théoriques et expérimentales concernant les coefficients de réflexion et les efficacités totales des antennes sont en très bon accord attestant ainsi d'efficacité rayonnée variant de 7 à 16% en bande basse et de 9 à 35% en bande haute. Cependant, les simulations dosimétriques révèlent des niveaux de DAS qui peuvent dépasser les normes en vigueur du fait des fortes efficacités rayonnées obtenues avec les antennes conçues, notamment avec des pics préoccupant observés au niveau de l'œil. Des mesures dosimétriques vont très prochainement démarrer à l'Université de Loughborough pour confirmer ces faits. Si ces valeurs sont confirmées, il faudra ainsi envisager des techniques de réduction de niveau de DAS pour protéger les utilisateurs de lunettes connectées. A notre connaissance c'est la première fois qu'une telle étude est effectuée pour des lunettes connectées. Des développements en cours concernent notamment l'effet de lunettes métalliques sur les performances des prototypes conçus ainsi que la possibilité d'incorporer un deuxième PCB dans la seconde branche pour l'implémentation de techniques MIMO.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le COST VISTA 1102 pour son support, le CREMANT pour l'aide effectuée lors des mesures, Frédéric Devillers d'Orange Labs pour la conception des supports de mesure des lunettes et Joe Wiart pour le prêt des fantômes homogènes de tête et de main.

Références bibliographiques

- 1- <http://www.google.com/glass/start/>
- 2- H. Jidhage, A. Stjernman, "Hooked loop antenna concept for bluetooth headset applications," *IEEE Antennas and Propagation Conference 2004 (AP-S 2004)*, July 2004, pp. 3521-3524.
- 3- J-H. Chou, S-W. Su, "Matching a bluetooth headset antenna on a small system ground by using a conductive wire," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 12, December 2009, pp. 2802- 2805.
- 4- K-L. Wong, M-R. Hsu, W-Y. Li, S-W. Su, A. Chen, "Study of the bluetooth headset antenna with the user's head," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 1, January 2007, pp. 19- 23.
- 5- J. Anguera, A. Andújar, C. Picher, L. González, C. Puente, S. Kahng, "Behavior of several antenna topologies near the human head at the 2.4-2.5 GHz band," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 8, August 2012, pp. 1911- 1916.
- 6- P. Vainikainen, J. Ollikainen, O. Kivekas, I. Kelander, "Resonator-Based Analysis of the Combination of Mobile Handset Antenna and Chassis," *IEEE Trans. on Antennas and Prop.*, vol. 50, no. 10, pp. 1433-1444, Oct. 2002.
- 7- G. Bellanca, G. Caniato, A. Giovannelli, P. Olivo, S. Trillo, "Effect of field enhancement due to the coupling between a cellular phone and metallic eyeglasses," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 1, January 2006, pp. 63- 65.
- 8- W. G. Whittow and R. M. Edwards, "A study of changes to specific absorption rates in the human eye close to perfectly conducting spectacles within the radio frequency range 1.5 to 3.0GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 12, pp. 3207-3212, 2004.
- 9- <http://www.optenni.com/>
- 10-IEC, "Human Exposure to Radio Frequency Fields From Hand-Held and Body- Mounted Wireless Communication Devices—Human Models, Instrumentation, and Procedures—Part 1: Procedure to Determine the Specific Absorption Rate (SAR) for Hand-Held Devices Used in Close Proximity to the Ear (Frequency Range of 300 MHz to 3 GHz)," *IEC 62209-1:2005*, 2005.
- 11-IEEE, "IEEE recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human head from wireless devices: Measurement techniques," *IEEE Std 1528*, 2003.
- 12-B. Beard, et al., "Comparisons of Computed Mobile Phone Induced SAR in the SAM Phantom to That in Anatomically Correct Models of the Human Head," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 2, pp. 397-407, 2006.
- 13-M. Siegbahn et al., "An International Interlaboratory Comparison of Mobile Phone SAR Calculation With CAD-Based Models," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 4, pp. 804-811, 2010.
- 14-V. Singh, A. Qusba, A. Roy, R. A. Castro, K. McClure, R. Dai, R. J. Greenberg, J. D. Weiland, M. S. Humayun, and G. Lazzi, "Specific Absorption Rate and Current Densities in the Human Eye and Head Induced by the Telemetry Link of an Epiretinal Prosthesis," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 3110-3118, 2009.
- 15-W.G. Whittow, C.J. Panagamuwa, R.M. Edwards and J.C. Vardaxoglou, "On the effects of straight metallic jewellery on the specific absorption rates resulting from face-illuminating radio communication devices at popular cellular frequencies," *Phys. Med. Biol.*, Vol. 53, pp. 1167-1182, 2008.