

Sur les procédures de mesure pour l'évaluation du débit d'absorption spécifique (DAS) des équipements cellulaires MIMO ayant des variations rapides des phases relatives

On the Measurement Procedures for the Assessment of the Specific Absorption Rate (SAR) from MIMO Cellular-Equipment of Fast Varying Relative Phases

Mounir Teniou¹, Mehdi Ramdani¹, Ourouk Jawad¹, Thomas Julien¹, Stephane Pannetrat¹, Lyazid Aberbour¹
¹ART-Fi: Orsay, France,
mounir.teniou,mehdi.ramdani,ourouk.jawad,thomas.julien,stephane.pannetrat,lyazid.aberbour@art-fi.eu

Mots clés : DAS, MIMO, Mesures champ proche, Mesures vectorielles de champ.
Key words : SAR, MIMO, Near field measurements, Vector field measurements.

Résumé/Abstract

Résumé en français Cet article propose une méthodologie de mesure pour l'évaluation du débit d'absorption spécifique (DAS) d'une classe de dispositifs de communication à entrées multiples et à sorties multiples (MIMO). Il est dédié aux systèmes MIMO spécifiques dans lesquels les phases relatives entre les antennes changent rapidement et dans des durées très courtes, telles que mises en œuvre à l'aide de la fonction STBC (Space-Time Block Code). En effet, un sujet particulier et nouveau dans ces mesures se pose lorsque l'on considère les systèmes SAR basés sur des mesures vectorielles, exploitant les principes d'équivalence de champ pour la reconstruction de la distribution de champ dans le volume à partir d'échantillons d'un sous-ensemble du champ électrique harmonique, indépendant du temps, et induit dans le milieu interne simulant du corps humain.

Cet article présente des méthodologies de mesure pour adresser ce nouveau cas de transmissions ainsi qu'à contribuer au développement des normes de la commission électrotechnique internationale (CEI) harmonisant les procédures de mesures de l'exposition aux rayonnements électromagnétiques, tout en prenant avantage des systèmes de mesures du DAS basés sur la mesure vectorielle et radiofréquence du champ électromagnétique.

Résumé en anglais This article introduces a measurement methodology for the evaluation of the specific absorption rate (SAR) of a class of multiple-input and multiple-output (MIMO) communication devices. It is dedicated to the specific MIMO systems in which the relative phases between the antennas are rapidly changing and in very courteous durations, as implemented using the STBC (Space-Time Block Code) function. Indeed, a particular and new subject in these measurements arises when we consider the SAR systems that use vector field measurements, and exploiting the principles of field equivalence for the reconstruction of the field distribution in the volume from samples of a subset of the time-independent harmonic-field that is induced in the internal media simulating the human body.

This article presents measurement methodologies to address this new case of transmissions as well as to contribute to the development of standards of the International Electrotechnical Commission (IEC) harmonizing the procedures for measuring the exposure to electromagnetic radiation, while taking advantage of SAR measurement systems that are based on vector and radiofrequency measurement of the electromagnetic fields.

1 Introduction

Les systèmes de communication connaissent une évolution et une complexification qui augmentent de manière drastique, en particulier avec l'avènement du LTE-advanced et de la 5G. Ces technologies sont fondées, entre autres, sur l'introduction de techniques de communication complexes telle que la multiplication des antennes

d'émission et de réception ou MIMO (Multiple-Input Multiple-output) [1]. L'introduction de cette technologie MIMO dans les dispositifs de communications cellulaires soulève de nouveaux défis dans le domaine de l'évaluation expérimentale du débit d'absorption spécifique de l'exposition humaine aux champs radiofréquences [2]. Dans un dispositif MIMO, les niveaux d'exposition doivent être déterminés pour toutes les configurations de phase possibles [3-4]. En considérant par exemple un pas de 10° , cela correspond dans un système à deux antennes à 36 mesures. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature afin de déterminer plus rapidement le DAS dans des configurations MIMO [5-6]. Cependant, ces méthodes supposent un accès direct aux excitations des antennes du système, permettant ainsi d'avoir la même référence de phase pour les antennes d'émission et de mesure. Ceci n'est généralement pas possible dans les cas pratiques.

Dans [7], la notion de DAS local moyenné sur le temps est utilisée afin de déterminer le niveau d'exposition dans le cas des signaux MIMO à forte variation temporelle. Cette méthode de mesure est plus rapide que la méthode classique. Elle nécessite cependant d'intégrer la mesure sur des temps très longs afin de déterminer le DAS moyen. Il est également démontré dans [7], que le facteur déterminant du temps de mesure de cette nouvelle technologie MIMO est la fréquence d'échantillonnage de la mesure du champ-E. Avec une technologie de mesure à détecteur à diode, dont la fréquence d'échantillonnage typique est de quelques kHz, il en résulte une nécessité d'intégrer le signal sur une seconde à chaque point du scan volumique pour atteindre 2% de précision, alors qu'avec une instrumentation vectorielle et radiofréquences, telle qu'introduite dans [8] et dont la fréquence d'échantillonnage est de 250MHz et respectant le théorème de Shannon, le temps d'intégration pourrait être drastiquement réduit.

Dans ce papier, nous proposons une méthodologie de détermination du DAS moyen basée sur l'utilisation de systèmes de mesures vectorielles sur une matrice finie de capteurs du champ électrique et utilisant des méthodes de reconstruction du champ dans le volume. Cette méthodologie est l'extension des travaux présentés dans [9-10] aux cas de systèmes MIMO à forte variation temporelle.

2 Mesure du DAS des systèmes MIMO

2.1 Classification des signaux MIMO

Le taux de variation des phases relatives des signaux transmis par les antennes qui constituent un système MIMO a un impact significatif sur la variation du champ électromagnétique total ainsi que sur la valeur du DAS moyen qui en découle. De ce fait, il est pertinent de classer les systèmes MIMO suivant la vitesse de variation de ces phases relatives. On définira alors deux classes principales de signaux MIMO des générations actuelles des systèmes de communications mobiles.

La première classe comprend les signaux ayant des phases relatives qui restent inchangées pendant une durée relativement longue. Le système MIMO reste alors dans une configuration stable tout au long de cette durée. Cela correspond par exemple au cas des réseaux d'antennes dans lesquels le déphasage est utilisé pour contrôler le diagramme de rayonnement et particulièrement la direction de rayonnement. Dans ce type de configurations, la méthode présentée dans [9-10] permet de déterminer rigoureusement, à partir de $N+1$ mesures uniquement, la valeur de DAS pour toutes les configurations possibles du système MIMO (où N est le nombre d'antennes du système). La rapidité et rigueur de cette méthode, qui nécessite un nombre de mesures aussi réduit, est obtenue grâce à la mesure simultanée de l'amplitude ainsi que de la phase du phaseur du champ-E harmonique, combinée avec une analyse spectrale vectorielle des signaux radiofréquences, pour l'évaluation du SAR.

La seconde classe inclue quant à elle les signaux ayant une forte et rapide variation des phases relatives entre les antennes du système MIMO. Cela est par exemple le cas lors de l'utilisation d'un codage spatio-temporel des signaux (ex : codage STBC (Space-Time Block Code)). Dans ce type de configurations, et du fait de ces changements rapides, la valeur du DAS est très difficile à mesurer. Cependant, il a été démontré que la moyenne temporelle du DAS instantanée converge pour une durée d'intégration suffisamment longue [7], mais qui pourrait être de très courtes durées si le système de mesure du DAS exploite une acquisition dans le domaine temporel des signaux radiofréquences démodulés qui satisfait le théorème de Shannon. En se basant sur la méthodologie développée dans [9-10] ainsi que sur la convergence de la moyenne temporelle du DAS, nous proposons dans cet article une méthode de mesure efficace pour l'évaluation expérimentale du taux d'exposition dans le cas de signaux MIMO à forte variation de phase. Cette méthode est proposée pour le type de système de mesure du DAS qui utilisent un réseau de sondes de champ-E vectorielle, et qui opèrent avec sélectivité en fréquences et une acquisition dans le domaine temporel des signaux radiofréquence démodulés.

2.2 Convergence de la moyenne temporelle du DAS

Le DAS en un point donné (x, y, z) est défini de la manière suivante :

$$DAS(x, y, z) = \frac{\sigma |\mathbf{E}(x, y, z)|^2}{2\rho} \quad (1)$$

où σ et ρ sont la conductivité électrique [S/m] et la densité volumique [kg/m³] du milieu simulant le tissu humain. $\mathbf{E}(x, y, z)$ est le phaseur complexe du champ électrique harmonique.

Considérons un système MIMO ayant deux antennes d'émission et qui génèrent chacune des champs \mathbf{E}_1 et \mathbf{E}_2 respectivement. En injectant les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ dans ces deux antennes, le champ total \mathbf{E}_t est obtenu tel que :

$$\mathbf{E}_t(x, y, z, t) = s_1(t) \mathbf{E}_1(x, y, z) + s_2(t) \mathbf{E}_2(x, y, z) \quad (2)$$

Le module au carré de l'équation (2) donne alors :

$$|\mathbf{E}_t(x, y, z, t)|^2 = |s_1(t) \mathbf{E}_1(x, y, z)|^2 + |s_2(t) \mathbf{E}_2(x, y, z)|^2 + 2|s_1(t)||s_2(t)||\mathbf{E}_1(x, y, z)||\mathbf{E}_2(x, y, z)|\cos(\phi(t)) \quad (3)$$

où $\phi(t) = \arg(s_1(t)s_2(t) \mathbf{E}_1(x, y, z) \mathbf{E}_2(x, y, z))$

En moyennant l'équation (3) dans le temps, on obtient :

$$\langle |\mathbf{E}_t(x, y, z, t)|^2 \rangle = \langle |s_1(t)|^2 \rangle |\mathbf{E}_1(x, y, z)|^2 + \langle |s_2(t)|^2 \rangle |\mathbf{E}_2(x, y, z)|^2 + 2\langle |s_1(t)||s_2(t)|\cos(\phi(t)) \rangle |\mathbf{E}_1(x, y, z)||\mathbf{E}_2(x, y, z)| \quad (4)$$

où $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \cdot dt$ et T est le temps d'intégration.

Dans le cas de codage spatio-temporel, la phase relative des signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ varie très vite, et le terme $\langle |s_1(t)||s_2(t)|\cos(\phi(t)) \rangle$ tends vers zéro pour un temps d'intégration T suffisamment long. On obtient, à partir de l'équation (4), la moyenne temporelle du DAS instantané $DAS(x, y, z, t)$ comme étant :

$$\langle DAS(x, y, z, t) \rangle = \langle |s_1(t)|^2 \rangle DAS_1(x, y, z) + \langle |s_2(t)|^2 \rangle DAS_2(x, y, z) \quad (5)$$

où $DAS_1(x, y, z)$ et $DAS_2(x, y, z)$ sont les DAS résultant respectivement des deux antennes lorsqu'elle sont excitées individuellement l'une après l'autre. Le résultat obtenu dans l'équation (5) pourra ensuite être généralisé au cas de N antennes MIMO.

2.3 Méthode de mesure proposée

Dans cette section, nous proposons une méthode afin de déterminer le DAS dans le cas de signaux MIMO à forte variation temporelle. A partir de l'équation (5), on remarque que la détermination de la moyenne temporelle du DAS d'un système MIMO revient à déterminer les DAS individuels, résultants des antennes excités individuellement, ainsi que les moyennes $\langle |s_i(t)|^2 \rangle$ des carrés des signaux d'excitation du système.

A la lumière de ces constatations, nous proposons une méthode de mesure composée de deux étapes, permettant de déterminer le DAS moyen d'un système MIMO à N antennes.

1- Étape 1 - Configuration à faible variation temporelle :

- a. Forcer le DUT à opérer dans une configuration à faible variation temporelle.
- b. Suivre la méthode présentée dans [9-10] afin de déterminer, à partir de $N+1$ mesures, les DAS individuels $DAS_i(x, y, z)$ résultant de l'excitation séparée des antennes MIMO, et ce, en tout point (x, y, z) du domaine de mesure.

2- Étape 2 - Configuration à forte variation temporelle :

- a. Mettre le DUT dans sa configuration nominale de forte variation temporelle des phases relatives et pour laquelle la mesure du DAS doit être effectuée.

- b. Mesurer le DAS local instantané $DAS(x_k, y_k, z_k, t)$ en K points (x_k, y_k, z_k) ($K \geq N$) de la grille du réseau de capteurs, et sur une durée T suffisamment longue afin d'atteindre la convergence de la moyenne temporelle $\langle DAS(x_k, y_k, z_k, t) \rangle$.
- c. A partir de ces moyennes de DAS $\langle DAS(x_k, y_k, z_k, t) \rangle$ et des DAS individuels $DAS_i(x, y, z)$ déterminés dans la phase 1, déterminer la valeur moyenne des carrés des signaux d'excitation $\langle |s_i(t)|^2 \rangle = \alpha_i$, et ce, en minimisant l'expression suivante :

$$\min_{\alpha_i} \sum_{k=1}^K \left| \langle DAS(x_k, y_k, z_k, t) \rangle - \sum_{i=1}^N \alpha_i DAS_i(x_k, y_k, z_k) \right| \quad (6)$$

- d. A partir des α_i , déterminer la valeur de la moyenne temporelle du DAS en tout point de l'espace (x, y, z) à l'aide de l'équation suivante :

$$\langle DAS(x, y, z, t) \rangle = \sum_{i=1}^N \alpha_i DAS_i(x, y, z) \quad (7)$$

3 Validation numérique

Afin de valider la méthode de mesure proposée, une configuration MIMO composée de deux antennes dipôles est considérée, et ce, pour une fréquence de travail de 750MHz. Le champ E généré par un dipôle horizontal placé au-dessus d'un Phantom de paramètres diélectriques $(\epsilon_r; \sigma) = (42.8; 0.85 \text{ S/m})$ a été simulé à l'aide du logiciel FDTD EMPIRE XPU [11], puis utilisé afin de déterminer le champ généré par la configuration MIMO à 2 dipôles.

Afin d'avoir une forte variation temporelle de phase, des signaux temporels STBC ont été générés en suivant le schéma bloc décrit dans la Figure 1. Les signaux obtenus sont ensuite combinés avec les simulations des champs E afin de simuler le système de mesure dans une configuration MIMO à forte variation temporelle.

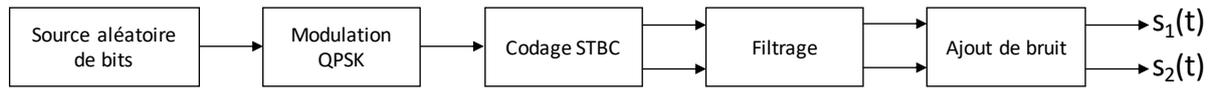


Figure 1: Schéma bloc du système de transmission MIMO avec codage STBC.

3.1 Convergence de la moyenne temporelle du DAS

Une première étape de validation est dédiée à la vérification de la convergence de la moyenne temporelle du DAS ainsi que de la validité de l'équation (5). Cela permettra aussi de déterminer le temps d'intégration T nécessaire à la mesure. Pour cela, des signaux QPSK aléatoires sont générés en suivant le schéma bloc de la Figure 1. Le signal généré a les caractéristiques suivantes :

Débit symbole : 10^6 symbole/s (soit une durée symbole de $1\mu\text{s}$)

Modulation : QPSK

Codage : STBC

Filtre de mise en forme : Cosinus surélevé (Facteur de rolloff : 0.25)

SNR : 30 dB

La fréquence d'échantillonnage du bloc de numérisation des signaux démodulés du système de mesures de DAS est considérée égale à 50 MHz, soit 5 fois la fréquence maximale du signal. Il est à noter que dans la pratique, il est financièrement très abordable d'acquérir un convertisseur analogique-numérique de fréquences d'échantillonnage de plusieurs centaines de MHz.

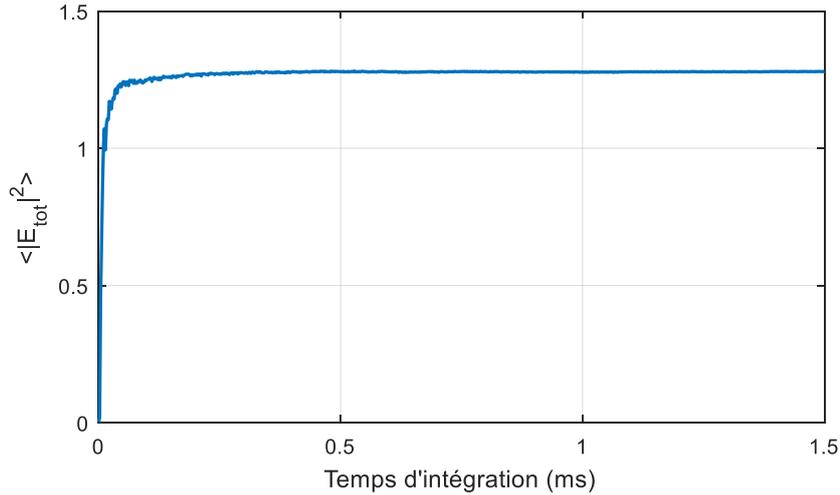


Figure 2: Variation de la moyenne temporelle du carré d'amplitude du champ en fonction du temps d'intégration en (ms).

Les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ générés à l'issue de cette étape sont combinés afin d'obtenir le champ total $E_t(t) = c_1 s_1(t) + c_2 s_2(t)$ (c_1 et c_2 sont deux nombres complexes représentant les champs générés par les deux antennes). Le carré d'amplitude du champ total obtenu est ensuite moyenné dans le temps en faisant varier le temps d'intégration. Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure 2. On remarque à partir de cette dernière figure que la convergence de carré de l'amplitude du champ est atteinte après une durée d'intégration très courte de quelques fractions de la milliseconde.

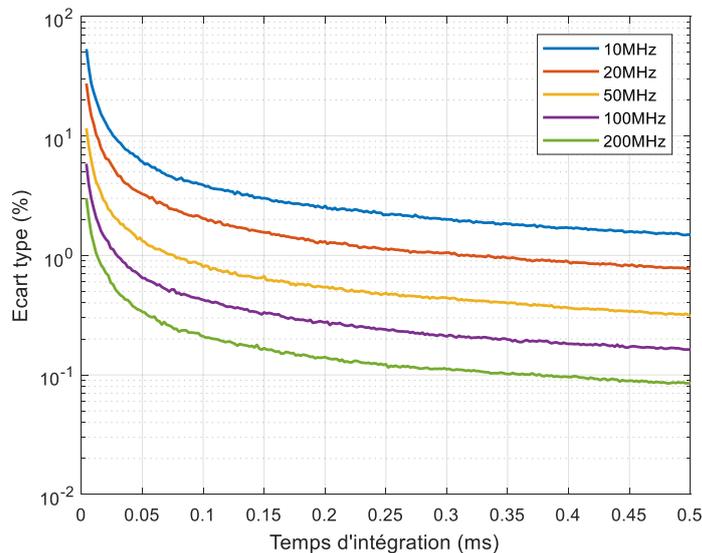


Figure 3: Variation de l'écart type de la moyenne du DAS local en fonction du temps d'intégration pour différentes fréquences d'échantillonnage avec 1000 réalisations par point.

L'opération est répétée un grand nombre de fois (1000 fois) pour différentes fréquences d'échantillonnage F_e , dont les résultats sont présentés en Figure 3. On y remarque que la fréquence d'échantillonnage du signal a un effet significatif sur la vitesse de convergence de la moyenne temporelle. Il est plus vrai pour les cas où le choix de la fréquence d'échantillonnage ne respecte pas le théorème de Shannon, tel que pour $F_e = [10, 20, 50]$ MHz qui mènent à une augmentation drastique du temps d'intégration assurant moins de 1% d'erreur. A la fréquence d'échantillonnage considérée (50 MHz), l'écart type est inférieur à 1% pour un temps d'intégration supérieur à 80 μ s. C'est ce temps d'intégration qui sera utilisé pour la suite de cet article.

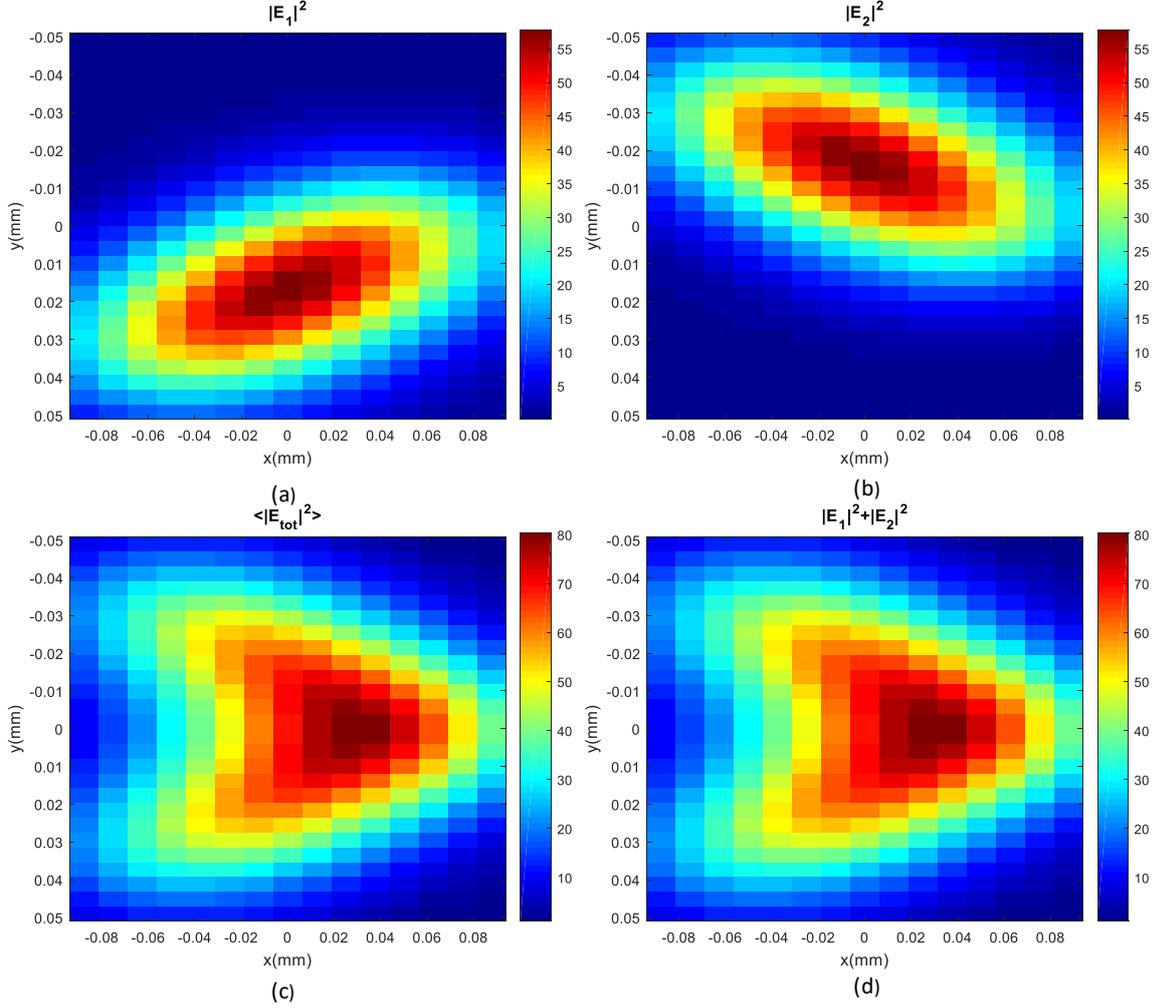


Figure 4: Variations de la moyenne temporelle des carrés d'amplitude des champs : (a) $|E_1|^2$. (b) $|E_2|^2$. (c) $\langle |E_{tot}|^2 \rangle$. (d) $|E_1|^2 + |E_2|^2$.

Les signaux STBC générés sont appliqués sur des champs-E internes au fantôme et calculés par simulations numériques de deux dipôles horizontaux, et ce, afin de simuler un système de mesure de DAS exploitant la mesure du champ vectoriel sur une grille fine et utilisant la reconstruction du champ dans le volume interne pour l'évaluation du DAS. Dans l'exemple considéré, les deux dipôles sont centrés à $(x, y) = (0, 30)$ mm et $(x, y) = (0, -30)$ mm et inclinés de $+45^\circ$ et -45° par rapport à l'axe $y = 0$, respectivement. Les signaux d'excitations utilisés sont d'amplitude unité de façon à avoir : $\langle |s_1(t)|^2 \rangle = \langle |s_2(t)|^2 \rangle = 1$. Les variations de la moyenne temporelle des carrés d'amplitude des champs sont représentées dans la Figure 4, où on remarque en Figure 4.(c) et Figure 4.(d) que les variations de $\langle |E_1|^2 \rangle$ et de la somme $|E_1|^2 + |E_2|^2$ sont pratiquement identiques, avec une erreur quadratique inférieure à 3%. Cela confirme que le terme $\langle |s_1(t)| |s_2(t)| \cos(\phi(t)) \rangle$ tends vers zéro pour un temps d'intégration suffisamment long et valide ainsi l'équation (5) sur laquelle se base la méthode de mesure proposée.

3.2 Validation numérique de la méthode proposée pour la mesure de DAS du MIMO rapide

Afin de valider la méthode de mesure proposée dans cet article, les étapes décrites dans la section 2.3 sont appliquées sur des distributions de champs similaires à celles utilisées dans les sections précédentes. Les dipôles considérés ont des orientations de -15° et de 45° respectivement. Les amplitudes des signaux d'excitations générés sont paramétrées de manière à avoir $\langle |s_1(t)|^2 \rangle = 0.5$ et $\langle |s_2(t)|^2 \rangle = 0.75$.

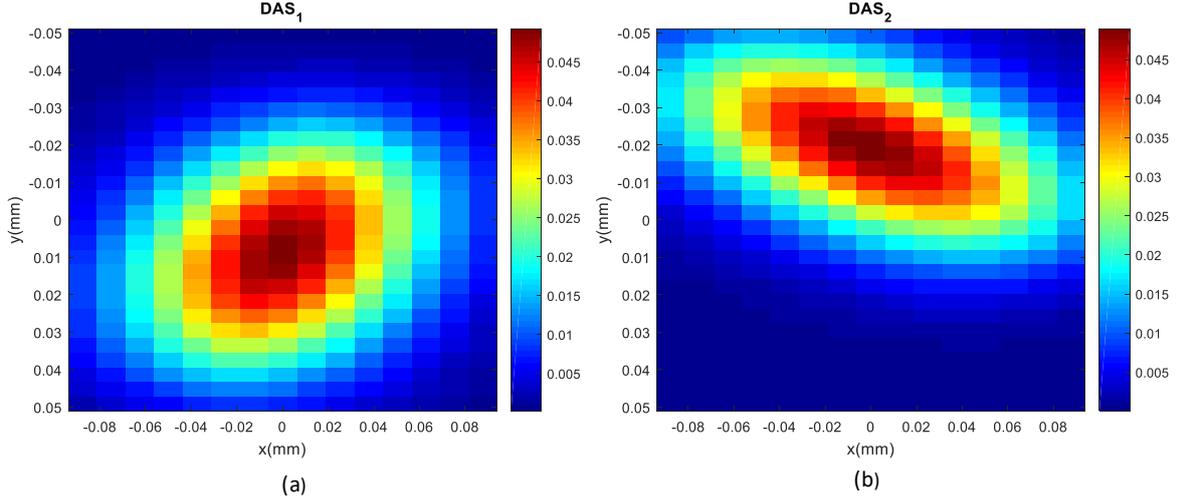


Figure 5: Variations du DAS local simulé. (a) antenne 1 seule. (b) antenne 2 seule.

L'étape 1 de la méthode de mesure ayant été validée dans [8-9], on supposera que les valeurs du DAS local $DAS_1(x, y, z)$ et $DAS_2(x, y, z)$ des deux antennes sont connues en tout point de l'espace de mesure. Les variations du DAS local correspondantes sont représentées dans la Figure 5.

A partir des signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ ainsi que des simulations de champs E, la moyenne temporelle du DAS $\langle DAS(x_k, y_k, z_k, t) \rangle$ est déterminée pour deux points de mesures (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_2, z_2) (par exemple les maximums des DAS locaux).

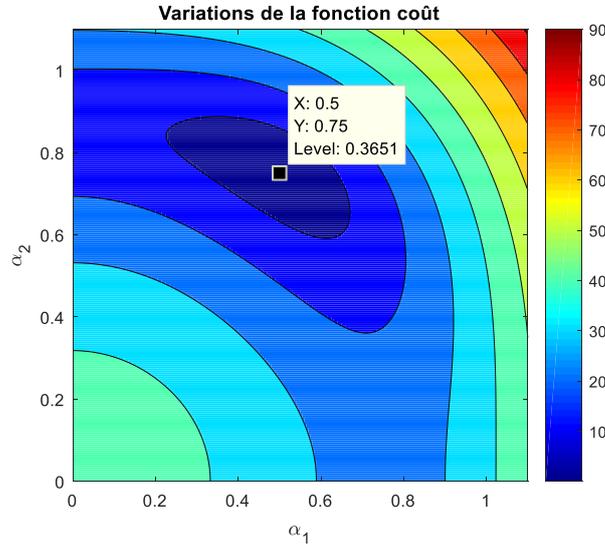


Figure 6: Variations de la fonction coût définie dans l'équation (8).

Une fonction coût $f(\alpha_1, \alpha_2)$ est alors définie de la manière suivante :

$$f(\alpha_1, \alpha_2) = \sum_{k=1}^2 \left| \langle DAS(x_k, y_k, z_k, t) \rangle - (\alpha_1 DAS_1(x_k, y_k, z_k) + \alpha_2 DAS_2(x_k, y_k, z_k)) \right| \quad (8)$$

En faisant varier les valeurs des α_i , les variations de la fonction coût définie dans l'équation (8) sont représentées dans la Figure 6. On remarque que le minimum de la fonction coût correspond aux valeurs $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.75)$.

Cela correspond bien aux moyennes temporelles $\langle |s_1(t)|^2 \rangle$ et $\langle |s_2(t)|^2 \rangle$ initialement imposées. A partir de ces valeurs,

on pourra déduire les variations de la moyenne temporelle du DAS $\langle DAS(x, y, z, t) \rangle$ en tout point de l'espace de mesure, et ce, à l'aide de l'équation (7). Les résultats obtenus sont représentés dans la *Figure 7*.

Pour résumer, la détermination du DAS moyen (en tout point de l'espace) dans le cas d'un système MIMO à 2 antennes aura nécessité trois mesures vectorielles de DAS (d'une durée moyenne de 15s chacune) ainsi que deux mesures de DAS moyenné dans le temps en deux points de l'espace (avec une durée de 80 μ s par mesure).

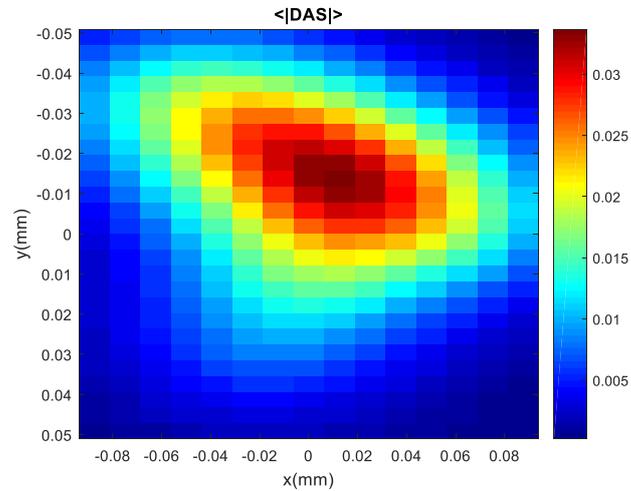


Figure 7 : Distribution du DAS local moyenné dans le temps et retrouvées avec la méthode de mesure proposée.

4 Conclusion

Cet article présente une méthode innovante, pratique et rigoureuse pour l'évaluation expérimentale de l'exposition électromagnétique des dispositifs de communication sans fil qui exploitent la technologie MIMO utilisant la variation rapide des phases relatives entre les antennes du réseau MIMO. Pour un système à N antennes, la méthode proposée se base sur les mesures du champ-E vectoriel pour N+1 états d'interférences connus du réseau, couplées avec des mesures de moyennes temporelles, sur de très courtes durées de l'ordre de millisecondes, du DAS local en un nombre très limité de points sur le réseau de capteurs du champ E, permettant alors de s'affranchir de l'intégration temporelle du DAS instantané en tous points de l'espace d'évaluation du DAS.

En plus de sa rapidité et son caractère pratique, cette méthode est compatible avec le cas d'une distribution non aléatoire des phases d'excitation du réseau d'antennes ainsi qu'avec le cas de configurations MIMO à faible variation temporelle. On pourra alors traiter toutes les configurations possibles d'un système MIMO à partir du même jeu de mesures initiales.

Finalement, il est démontré dans ce papier que l'utilisation de la méthode proposée sur la nouvelle génération de systèmes de mesures vectorielles du DAS, qui intègrent une acquisition des signaux radiofréquences dans le domaine temporel avec une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée (quelques centaines de MHz pour un signal en bande de base ou en fréquence intermédiaire) permet d'envisager de ramener à quelques dizaines de secondes seulement la mesure du DAS MIMO-rapide, alors qu'il est de plusieurs dizaines de minutes sur un système de mesure utilisant une technologie traditionnelle de détecteur à diode qui souffre d'une limitation de fréquence d'échantillonnage à quelques kHz seulement.

5 Remerciements

Nous tenons à remercier Joe Wiart, Directeur de la Chaire C2M, Telecom ParisTech, pour nos échanges très instructifs sur le sujet de la mesure du DAS MIMO.

Références bibliographiques

- [1] Z. Ying, "Antennas in cellular phones for mobile communications," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2286-2296, Jul. 2012.

- [2] ICNIRP Guidelines Draft Ed. (2018). Draft Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). [Online]. Available: <https://www.icnirp.org/en/activities/public-consultation/consultation-1.html>
- [3] "Guidance for evaluating exposure from multiple electromagnetic sources," IEC, Tech. Rep. 62 630, Oct. 2010.
- [4] Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Part 3: Vector measurement-based systems (Frequency range of 600 MHz to 6 GHz), 1st ed., Standard IEC 62209-3, 2019.
- [5] N. Perentos, S. Iskra, A. Faraone, R. J. McKenzie, G. Bit Babik and V. Anderson, "Exposure Compliance Methodologies for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Enabled Networks and Terminals," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 2, pp. 644-653, Feb. 2012.
- [6] D. T. Le, L. Hamada, S. Watanabe and T. Onishi, "A Fast Estimation Technique for Evaluating the Specific Absorption Rate of Multiple- Antenna Transmitting Devices," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 4, pp. 1947-1957, April 2017.
- [7] D. T. Le, and al. "Averaging time required for measuring the specific absorption rate of a MIMO transmitter." IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine 3.1 (2014): 57-64.
- [8] B. Derat et al., "A novel technology for fast and accurate specific absorption rate measurement," 2013 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Karlsruhe, 2013, pp. 363-366.
- [9] L. Aberbour, O. Jawad, M. Ramdani, P. Giry and T. Julien, "Efficient Experimental Assessment of The Specific Absorption Rate (SAR) Induced by MIMO Wireless Communication Devices; Application of Vector Near-Field Measurement System," 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Vasteras, 2018, pp. 1-4.
- [10] M. Teniou, O. Jawad, S. Pannetrat and L. Aberbour, "A Fast and Rigorous Assessment of the Specific Absorption Rate (SAR) for MIMO Cellular Equipment Based on Vector Near-Field Measurements," 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Vasteras, 2018, pp. 1-4.
- [11] EMPIRE XPU : <https://www.empire.de/>