

ANNULATION ADAPTATIVE DU BRUIT AMBIANT POUR LES MESURES EN EMISSION RAYONNEE EN ESPACE LIBRE

R. Wise¹, S. Fabre², F. Hoëppe¹, Y Merle¹, C. Mailhes², T. Jouêtre³, E. Lacam³

¹Nexio, 48 Rue René Sentenac, Toulouse, France, frederic.hoeppe@nexiogroup.com

²TéSA, 7 Bd de la Gare, Toulouse, France, serge.fabre@tesa.prd.fr

³DGA Techniques Aérospatiales, 47 rue Saint-Jean 31130 Balma, France, thomas.jouetre@intradef.gouv.fr

Résumé. Cet article traite de la mise en œuvre d'un système d'annulation active et adaptative du bruit, applicable aux essais d'émission rayonnée de compatibilité électromagnétique (CEM) ainsi qu'à des applications plus larges. Sous certaines conditions, le système peut isoler les différentes sources de bruit et construire des filtres adaptatifs numériques afin d'éliminer ces interférences. Les résultats de mesures en laboratoire et en environnement ouvert montrent la capacité à supprimer différents types de bruit (blanc, à bande étroite ou plus spécifiques d'un environnement réel) et à restituer un signal situé bien en dessous de ce bruit parasite.

I. INTRODUCTION

Notre monde est bruyant. Des sources de rayonnement électromagnétique existent tout autour de nous, des stations de radio aux téléphones portables, en passant par les connexions Internet et bien d'autres encore. Pour compenser, des chambres anéchoïques et blindées ou encore des zones de test ouvertes et éloignées sont construites partout dans le monde afin d'effectuer des essais CEM isolés. Cependant, ces solutions sont imparfaites : le nombre de chambres capables d'accueillir des avions entiers, des navires ou même des véhicules terrestres est limité, et les zones de test en plein air sont par défaut éloignées des grands centres.

Cet article propose une alternative : au lieu d'isoler l'équipement sous test, il s'agit d'éliminer le bruit de la mesure. Si l'information recherchée est présente sur un seul récepteur tandis que tous les récepteurs perçoivent le même bruit corrélé quasiment au même moment, il est alors possible, numériquement, d'extraire l'information émis par la source souhaitée du bruit ambiant grâce au filtrage adaptatif [1].

De manière générale, le filtrage adaptatif est la capacité d'un filtre numérique à s'ajuster à mesure que des données lui sont fournies. C'est essentiel, car le bruit dans un environnement en espace libre est souvent loin d'être constant par nature. L'application de ce filtrage adaptatif au bruit capté par plusieurs sources permettra la suppression numérique de ce bruit tout en préservant simultanément le signal d'intérêt.

II. CONCEPT TECHNIQUE

II.1. Modélisation du problème

Tout d'abord, la situation envisagée est la suivante : il existe une source unique de signal, notée $x(t)$ qui est souhaitée à mesurer et à analyser. Ce signal sera désigné comme le « signal utile » dans la suite du texte. En parallèle, il existe une source de bruit ambiant qui interfère avec la capacité à mesurer ce signal utile, notée $b(t)$.

Pour mesurer le signal utile, nous disposons de deux récepteurs placés à des emplacements choisis : l'un proche de la source du signal utile et l'autre suffisamment éloigné pour supposer ne plus capter le signal utile – ou a minima, supposer sa puissance captée négligeable. Par contre, les deux récepteurs doivent pouvoir mesurer le bruit ambiant. A titre d'exemple, si on souhaite mesurer des émissions produites par les équipements de bord d'un avion sur une antenne de bord dans un environnement ouvert, un des récepteurs connecté à l'antenne de bord de l'avion captera les émissions recherchées mais qui seront polluées par le bruit environnant, tandis que l'autre récepteur sera connecté à une antenne distante de l'avion (de l'ordre de 15 m soit $\lambda/2$ à 10 MHz), dans l'environnement ouvert, permettant de capter le même environnement bruyant mais suffisamment loin pour ne pas mesurer le signal utile.

La Figure 1 illustre ce dispositif de mesure dont les limitations seront discutées en fin de l'article. La transmission de la source de bruit $b(t)$ vers chacun des deux récepteurs est modélisée par deux fonctions de transfert rationnelles, notées $H_1(f)$ et $H_2(f)$, chacune prenant en compte les éventuels multi-trajets. Les bruits reçus par chacun des récepteurs seront notés $n_1(t)$ et $n_2(t)$, après propagation de la source de bruit. Le signal utile est reçu par le récepteur dénommé « principal ».

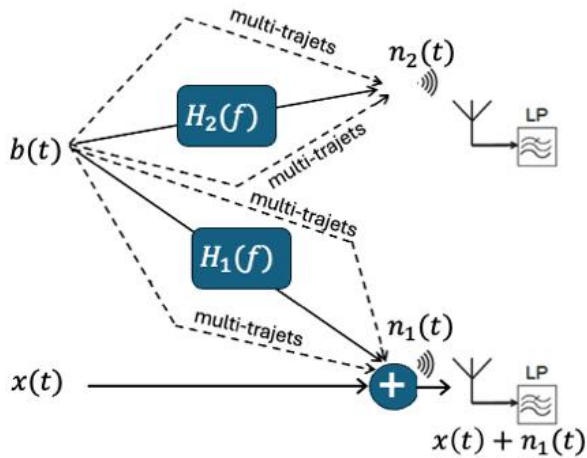


Figure 1: Modélisation du bruit reçu sur chacun des deux récepteurs comme une combinaison de multi-trajets d'une source de bruit $b(t)$ unique et du signal utile $x(t)$ reçu sur le récepteur principal.

En transformant ces représentations dans le domaine fréquentiel, les équations suivantes sont obtenues qui représentent le système :

$$N_1(f) = H_1(f)B(f) \text{ et } N_2(f) = H_2(f)B(f) \quad (1)$$

Ce qui permet de définir la relation suivante :

$$N_1(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} N_2(f) = H(f) N_2(f) \quad (2)$$

L'équation (2) indique qu'il existe une fonction de transfert entre le bruit reçu par le récepteur principal $n_1(t)$ et celui reçu par le récepteur secondaire $n_2(t)$, et que cette fonction permet de traiter le récepteur secondaire recevant uniquement du bruit comme étant la source du bruit elle-même. Il est alors possible, après conversion analogique-numérique, de construire un filtre adaptatif ciblant le bruit « provenant » du second récepteur.

II.2. Une solution : le filtrage adaptatif

La soustraction de bruit dans un cadre non stationnaire est un cas d'application typique du filtrage adaptatif [1]. Le principe est simple et résumé sur la Figure 2 : le bruit supposé non stationnaire $n_1(t)$ polluant le signal utile est lié au bruit $n_2(t)$ par un filtre inconnu (2). Le filtrage adaptatif consiste à construire un filtre variant dans le temps permettant d'estimer le bruit perturbant le signal utile afin de le soustraire.

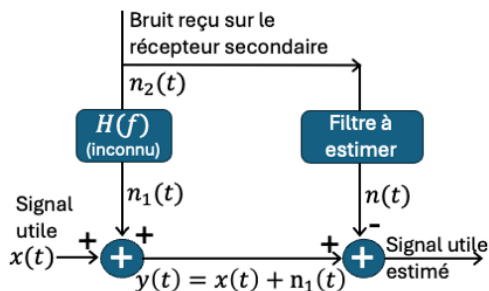


Figure 2 : Principe de la soustraction de bruit par filtrage adaptatif.

Le filtre doit minimiser à chaque instant un critère d'erreur quadratique entre la sortie du filtre $n(t)$ et le signal utile bruité $y(t)$. La solution à ce problème d'optimisation existe, sous la forme des équations de Wiener-Hopf [1], toutefois, elle n'est pas facilement adaptable dans un contexte non stationnaire et est d'un coût calculatoire rédhibitoire pour être utilisée dans le contexte de cet article, nécessitant l'estimation et l'inversion d'une matrice de corrélation. Des approches adaptatives et récursives doivent être privilégiées, parmi lesquelles nous avons choisi des algorithmes à gradient stochastique basés sur une descente de gradient itérative, tels que le N-LMS (*Normalized Least Mean Squares*) [1], [3] et sa version fréquentielle FDAF (*Frequency-Domain Adaptive Filtering*) [4], ainsi qu'un algorithme à moindres carrés récursifs RLS (*Recursive Least Squares*) [1], [3], mettant à jour dynamiquement l'inverse de la matrice de corrélation nécessaire pour appliquer les relations de Wiener-Hopf.

En plus de la capacité à identifier et à supprimer le bruit, l'aspect adaptatif de l'algorithme permet au filtre de s'ajuster en fonction des variations ou des caractéristiques différentes du bruit au cours de la mesure. En particulier, le système peut prendre en compte la présence de plusieurs sources de bruit présentes dans la même bande fréquentielle, comme illustré sur la Figure 3 dans le cas des sources 1 et 2. Dans ce cas, le filtre adaptatif s'adaptera au cours du temps pour les annuler successivement.

Par contre, le cas de sources de bruit émettant simultanément dans des bandes fréquentielles différentes (sources 1 et 3 de la Figure 3) nécessite un prétraitement qui est détaillé dans la section suivante.

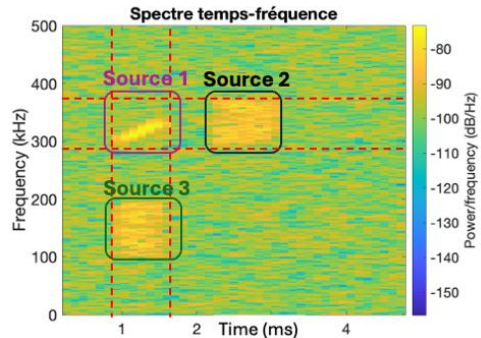


Figure 3: Illustration temps-fréquence de multiples sources de bruit : les sources 1 et 2 apparaissent à des moments différents dans la même bande fréquentielle, tandis que les sources 1 et 3 émettent simultanément mais dans des bandes fréquentielles différentes.

II.3. Prétraitement en sous-bandes

Lorsqu'au moins deux sources distinctes sont présentes dans l'environnement en émettant simultanément dans des bandes fréquentielles distinctes (comme illustré sur la Figure 3 pour les sources 1 et 3), l'expression (1) du signal reçu par chaque antenne doit être modifiée pour prendre en compte la contribution de chaque source via son propre canal de propagation, sous forme d'une combinaison linéaire de filtres équivalents. Dans ce cas, il n'est plus

possible de décrire la relation entre les bruits reçus par les antennes par un filtre linéaire, comme décrit par (2), ce qui rend le filtrage adaptatif inapplicable.

Une solution est d'introduire un prétraitement avec un banc de filtres [5] construits pour découper le signal à traiter en plusieurs sous-bandes fréquentielles, isolant chacune des sources de bruit. Le filtrage adaptatif peut ainsi être appliqué en sortie de chaque sous-bande de manière efficace pour annuler le bruit présent dans la sous-bande. Le schéma global de la solution d'annulation de bruit est présenté dans la Figure 4.

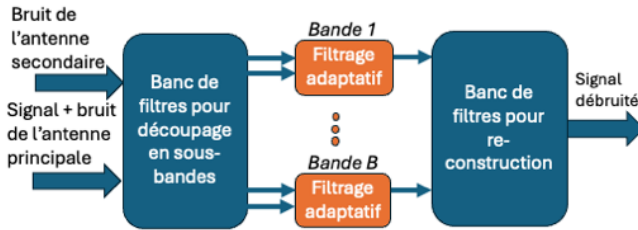


Figure 4 : Banc de filtres en prétraitement pour assurer un filtrage adaptatif efficace dans chaque sous-bande,

III. IMPLANTATION

L'idée de coupler le filtrage adaptatif et un banc de filtres en prétraitement n'est pas nouvelle [6] mais l'intérêt de la solution présentée dans cet article réside dans les choix d'implantation qui ont été faits pour un traitement efficace et rapide.

Le système d'annulation de bruit de la Figure 4 repose sur deux éléments essentiels : le banc de filtres et le filtrage adaptatif. Chacun de ces deux éléments a été optimisé pour assurer une annulation du bruit significative, tout en garantissant un temps de traitement acceptable.

III.1. Le banc de filtres

Planter un banc de filtres impose plusieurs choix à faire. Un exemple du système utilisant $B = 4$ sous-bandes est représenté dans la Figure 5.

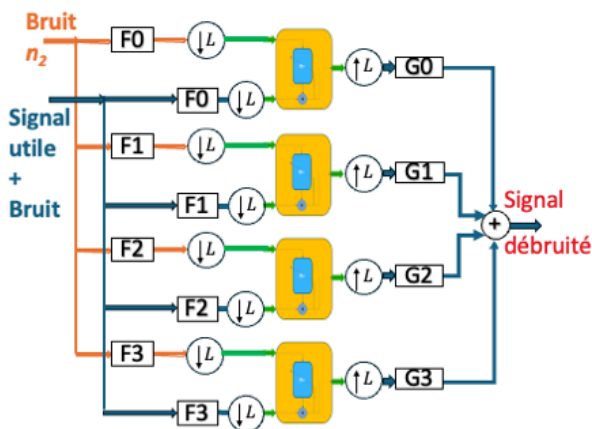


Figure 5 : Exemple de système d'annulation de bruit avec un découpage en $B=4$ sous-bandes (filtres F_0 à F_3), suivi du filtrage adaptatif (rectangles oranges) et des filtres de synthèse (G_0 à G_3) pour construire le signal débruité.

Chaque sous-bande est obtenue grâce à un filtre passe-bande F_i correspondant à la bande i , pour $i = 0, \dots, B-1$, B correspondant au nombre de sous-bandes souhaitées. Si on considère B filtres de largeur identique, disjoints mais recouvrant ensemble toute la bande spectrale du signal d'entrée de $-F_e/2$ à $+F_e/2$, F_e étant la fréquence d'échantillonnage du signal mesuré, la bande fréquentielle de chaque sous-bande est diminuée d'un facteur B par rapport à la bande spectrale initiale. Ceci permet de sous-échantillonner le signal de chaque sous-bande par un facteur L ($\downarrow L$ dans la Figure 5), avec une limite maximale de $L = B$ correspondant à l'échantillonnage critique.

Une fois le découpage en sous-bandes effectué, les signaux issus des sous-bandes, rééchantillonnés à une fréquence d'échantillonnage de F_e/L , sont traités par filtrage adaptatif afin de réduire le bruit ambiant dans chacune des sous-bandes (rectangle orange dans la Figure 5).

La reconstruction du signal débruité se fait en combinant les signaux issus de chacune des sous-bandes : dans un premier temps, on se ramène à la fréquence d'échantillonnage F_e par un interpolateur d'un facteur L qui insère $L-1$ zéros entre deux échantillons ($\uparrow L$ dans la Figure 5) puis on applique le filtre de synthèse G_i qui permet d'éliminer les artéfacts produits par l'interpolateur et de retrouver le signal échantillonné à F_e .

Dans l'implantation du banc de filtres, il faut non seulement choisir le nombre B de sous-bandes et le facteur L de sous-échantillonnage mais aussi les filtres d'analyse F_i et de synthèse G_i . Le choix du couple (B, L) résulte d'un compromis : plus B est faible, plus on pourra isoler des sources de bruit proches fréquentiellement mais plus les filtres seront difficiles à construire. De même, choisir $L = B$ permet de diminuer le coût calculatoire au maximum mais rend la construction des filtres d'analyse complexe. La construction des filtres d'analyse et de synthèse doit permettre une reconstruction parfaite (ou suffisamment parfaite pour l'application visée) pour garantir que la décomposition en sous-bandes et la reconstruction soient transparentes et n'induisent aucune distorsion.

Parmi toutes les approches possibles pour construire le banc de filtres [5], nous avons fait des choix successifs permettant de simplifier la définition des filtres et de les planter de manière efficace en termes de coût calculatoire. Tout d'abord, nous avons choisi un banc de filtres modulés qui permet de synthétiser tous les filtres du banc à partir d'un filtre passe-bas prototype F_0 . Non seulement cela simplifie la construction des filtres mais aussi leur implantation. En effet, l'expression des filtres d'un tel banc fait apparaître un facteur lié à la transformée de Fourier discrète, conduisant à une implantation utilisant la FFT (*Fast Fourier Transform*), ce qui la rend efficace en termes de coût calculatoire. Pour profiter de l'efficacité de la FFT, deux choix sont possibles : soit une décomposition polyphase des filtres [5], soit une implantation WOLA (*Weighted-OverLapped and Add*) [7]. Nous avons choisi l'implantation WOLA qui a un coût calculatoire minimal équivalent à l'implantation polyphase mais qui permet de choisir $L < B$, contrairement

à la version polyphase qui impose d'être à l'échantillonnage critique.

III.2. Les algorithmes de filtrage adaptatif

Nous avons testé les différents algorithmes de filtrage adaptatif. La solution RLS à moindres carrés récurrents a rapidement été écartée, en raison de son coût calculatoire. La solution FDAF, proposée dans [1], est séduisante par son efficacité calculatoire basée sur la FFT, avec un coût en $N \log_2 N$ opérations, N étant la taille du filtre adaptatif. Sa limitation vient de son traitement par bloc qui conduit à une mise à jour de l'ensemble des coefficients du filtre tous les N échantillons, ce qui correspond en moyenne à l'adaptation d'un coefficient par échantillon. L'algorithme N-LMS a, quant à lui, un temps de calcul théoriquement proportionnel à N et dans sa version originale, met à jour l'ensemble des coefficients du filtre à chaque échantillon. Nous avons modifié l'algorithme N-LMS pour ne mettre à jour qu'un coefficient par échantillon, ce qui permet de se ramener à un rythme de mise à jour similaire à celui du FDAF et d'obtenir ainsi des temps de calcul acceptables. Cette version simplifiée du N-LMS ouvre la possibilité de diminuer encore le coût calculatoire en « ralentissant » la mise à jour des coefficients du filtre qui peut ne pas être faite à chaque échantillon du signal. La Figure 6 montre que, grâce à cette mise à jour progressive des coefficients, le N-LMS simplifié atteint des temps de calcul comparables, voire inférieurs, à ceux du FDAF. Il offre également la flexibilité d'utiliser des filtres adaptatifs dont la longueur n'est pas contrainte à une puissance de deux, contrairement à FDAF. C'est donc cet algorithme qui a été utilisé par la suite.

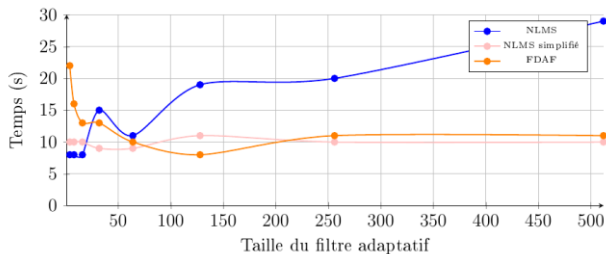


Figure 6 : Temps de calcul du filtrage adaptatif en fonction de sa taille (nombre de coefficients du filtre).

IV. RÉSULTATS

IV.1. En conditions idéales

Le système d'annulation de bruit et les récepteurs corrélés décrits dans les sections précédentes ont été mis en œuvre dans une plage de fréquences allant de 10 MHz à 6 GHz. Des mesures ont été réalisées dans des environnements contrôlés avec différentes sources de bruit. Ces sources de bruit comprenaient du bruit en peigne et du bruit blanc, ainsi que divers signaux tels que des signaux intermittents et permanents, ou encore des signaux à bande large et à bande étroite.

La Figure 7 illustre une situation où un signal utile (à 1.53 GHz) est présent parmi de nombreux signaux de bruit à bande étroite. Sans affecter le signal principal d'intérêt, la

majeure partie du bruit provenant des autres sources a été éliminée grâce au système proposé.

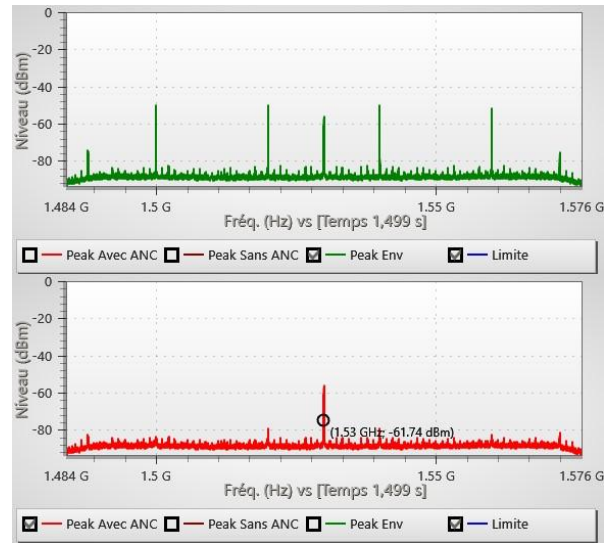


Figure 7: Cas d'un signal utile + un bruit avant (courbe du haut) et après (courbe du bas) filtrage adaptatif.

La Figure 8 illustre le cas d'un bruit blanc intense qui enfouit complètement le signal utile, lequel est néanmoins présent sur le récepteur principal. Dans ce cas, le filtrage adaptatif a permis d'éliminer plus de 30 dB de bruit et de faire émerger le signal utile.

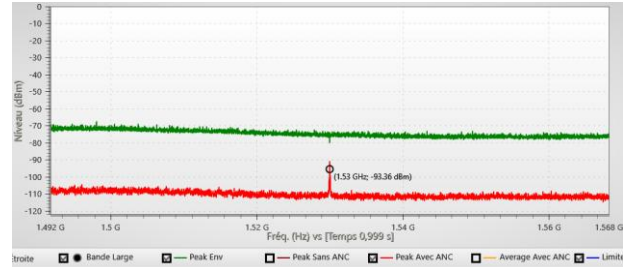


Figure 8: Cas d'un signal utile + du bruit blanc avant (courbe verte) et après (courbe rouge) filtrage adaptatif.

IV.2. En conditions réelles

Après la vérification du système dans les conditions parfaites, l'étape suivante a été de vérifier le système dans les conditions réelles. De nombreuses mesures ont été faites en environnement ouvert, avec des bruits environnants de natures diverses, dans des conditions variées.

La Figure 9 montre un résultat d'une mesure dans une plage de fréquences entre 170 et 230 MHz où sont présents des signaux DAB (*Digital Audio Broadcasting*). Ces signaux sont un exemple illustratif de bruit ambiant que les deux antennes peuvent capter et qui pourrait perturber une analyse de signaux utiles faite dans ces bandes fréquentielles. Sur la figure, la densité spectrale du bruit mesuré sur l'antenne principale est représentée en bleu, tandis que la sortie du système d'annulation proposé est en

rouge. On observe une atténuation conséquente des principales composantes, jusqu'à 18 dB.

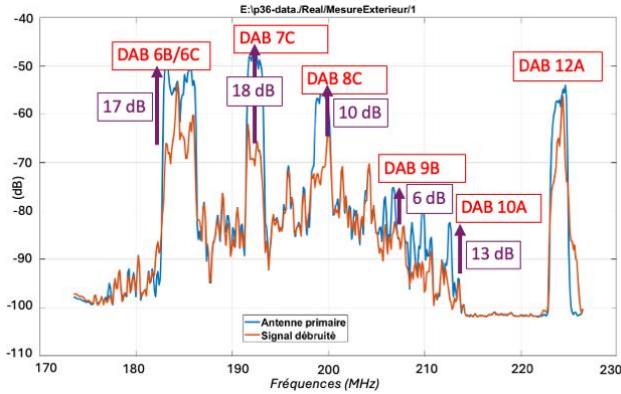


Figure 9: Cas d'une mesure en environnement ouvert, atténuation du bruit causé par les DAB.

Le cas des perturbations dans les bandes de fréquences des radios FM a aussi été analysé. La Figure 10 illustre les résultats en entrée et en sortie du système d'annulation de bruit : une atténuation moyenne de 20 dB de la pollution engendrée par les radios FM peut être obtenue, ce qui est très satisfaisant.

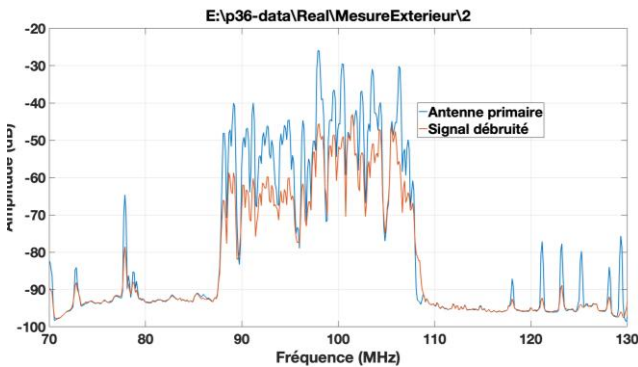


Figure 10 : Cas d'une mesure dans la bande FM.

V. LIMITATIONS

Cette solution présente des limitations.

Un aspect important concerne la présence de plusieurs sources de bruit émettant depuis des emplacements différents, ce qui sera le cas en pratique, en conditions réelles. Si ces sources émettent sur des intervalles de temps disjoints, le filtrage adaptatif se mettra à jour pour annuler efficacement les sources de bruit successives. Si les sources émettent en même temps sur des bandes de fréquences différentes, le banc de filtres positionné en prétraitement permet d'isoler les bandes fréquentielles et de rendre efficace le filtrage adaptatif appliqué à chaque sous-bande. Le seul cas qui ne pourra pas être adressé par le système proposé est le cas de sources de bruits, émettant depuis des emplacements différents, en même temps et dans la même bande de fréquence (ou dans des fréquences trop proches pour être séparées par le banc de filtres). à la même fréquence. Comme expliqué dans la Section II.3,

l'analyse de la théorie sous-jacente montre immédiatement pourquoi cela peut poser un problème. La solution repose sur l'idée qu'il existe une seule fonction de transfert reliant le bruit perçu exclusivement par n_1 à n_2 . Cependant, s'il existe en réalité deux sources de bruit indépendantes, ce n'est plus possible de modéliser le système par une unique fonction de transfert entre ces deux récepteurs. Une solution peut être trouvée en rajoutant autant de récepteurs additionnels que de sources de bruit posant problème afin de résoudre un système de fonctions de transfert représentant les sources simultanées [8], [9]. Enfin, si le signal utile se produit à la même fréquence, au même instant et avec la même forme qu'un signal parasite, il n'est pas possible de différencier le bruit du signal utile.

Une autre limitation pourrait venir des hypothèses faites : dans la solution développée, nous supposons que le signal utile est capté par le récepteur principal mais non présent dans le récepteur secondaire, ce qui constitue une hypothèse de base de l'efficacité du filtrage adaptatif. Nous avons étudié la robustesse du système proposé à cette hypothèse en étudiant un scénario test en 5 phases :

- Phase 1 : seul le bruit de fond de l'antenne est présent,
- Phase 2 : un signal utile est émis, en absence de bruit ambiant,
- Phase 3 : au signal utile, on rajoute l'émission d'un bruit ambiant perturbateur,
- Phase 4 : l'émission du signal utile est stoppée, seul le bruit ambiant perturbateur est présent,
- Phase 5 : les émetteurs sont éteints (comme en phase 1).

Les deux antennes sont suffisamment proches pour que l'antenne secondaire reçoive du signal utile. La Figure 11 représente l'amplitude reçue par chacune des deux antennes au cours des 5 phases : le signal utile est présent sur l'antenne secondaire durant les phases 2 (clairement visible) et 3 (noyé sous le bruit).

La Figure 12 illustre l'amplitude du signal en sortie du système d'annulation de bruit proposé au cours des 5 phases. Durant la phase 2 où seul le signal utile est présent et capté par les deux antennes, il subit une atténuation (-27 dB) – c'est le principe du filtrage adaptatif qui va essayer d'annuler les signaux corrélés entre les deux antennes et donc, durant cette phase 2, va affecter le signal utile qui est seul présent. Mais durant la phase 3, lorsque le signal utile est capté par l'antenne secondaire et noyé sous le bruit, le filtrage adaptatif fonctionne : il permet de préserver le signal utile tout en atténuant le bruit de -22 dB. Cette expérience permet de montrer l'efficacité du système, même si l'antenne secondaire capte une portion du signal utile, l'essentiel étant qu'elle soit de puissance suffisamment faible pour être masquée par le bruit. En pratique, cela revient à éloigner les antennes, sans forcément devoir isoler l'antenne secondaire de la mesure du signal utile.

Enfin, il existe une limite imposée par le bruit de fond de chacun des récepteurs. En effet, ces bruits de fond sont intrinsèques à chaque antenne et ne sont pas corrélés. S'ils sont prédominants, les performances sont dégradées car

ces bruits ne peuvent être annulés par le système proposé, comme on peut le constater durant les phases 1 et 5 du scénario des Figure 11 Figure 12.

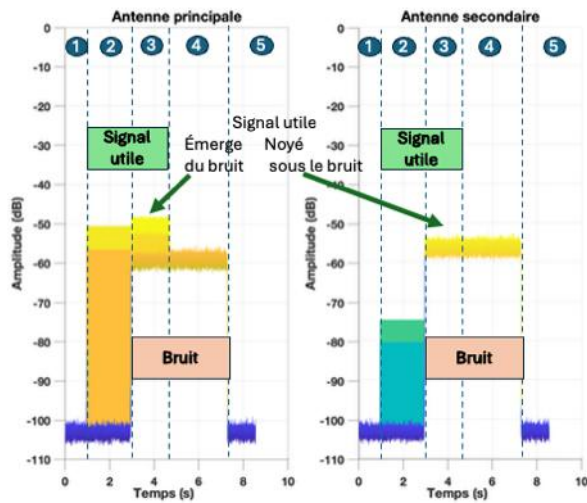


Figure 11 : Amplitude du signal reçu sur chaque antenne au cours du scénario à 5 phases.

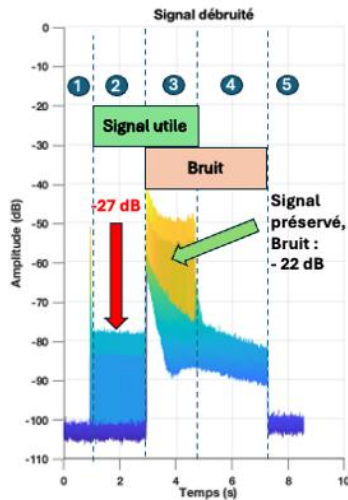


Figure 12 : Amplitude du signal en sortie du système d'annulation de bruit au cours des 5 phases.

VI. CONCLUSION

La solution proposée présente un potentiel significatif dans le domaine des solutions CEM. De plus, cette méthode est largement applicable et personnalisable selon les besoins des utilisateurs. Si un utilisateur ne requiert qu'une plage de fréquences étroite mais avec plusieurs sources de bruit concurrentes connues, un chemin de réception robuste avec de nombreuses antennes pourrait être développé en utilisant la stratégie d'annulation adaptative décrite ici. En revanche, si les sources de bruit concurrentes sont uniques ou dans des bandes fréquentielles suffisamment éloignées,

alors la solution à large bande de fréquences utilisant deux antennes, présentée dans cet article, s'adapte parfaitement à ces conditions.

REFERENCES

- [1] A. Frech, A. Zakaria, S. Braun and P. Russer, "Ambient Noise Cancellation with a Time-domain EMI Measurement System using Adaptive Filtering," *2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 2008, pp. 534-537, doi: 10.1109/APEMC.2008.4559930.
- [2] M. Bellanger, F. Michaud et al., *Filtrage adaptatif : théorie et algorithmes*, Traité IC2, Editions Hermes-Lavoisier, 2005.
- [3] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive signal processing*. USA: Prentice-Hall, Inc., 1985.
- [4] A. Frech and P. Russer, "Real-time Ambient Noise Cancellation for EMI Measurements on Open Area Test Sites," *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 2012, pp. 213-216, doi: 10.1109/APEMC.2012.6238010.
- [5] P. P. Vaidyanathan, *Multirate systems and filter banks*. USA : Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [6] J. J. Shynk, "Frequency-domain and Multirate Adaptive Filtering," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 14-37, Jan. 1992, doi: 10.1109/79.109205.
- [7] <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8382-D.PDF>
- [8] Z. -H. Lu, J. -B. Liu and P. -G. Liu, "A Novel Method of Ambient Interferences Suppressing for In Situ Electromagnetic Radiated Emission Test," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 6, pp. 1205-1215, Dec. 2012, doi: 10.1109/TEM.2012.2201945.
- [9] Z. -H. Lu, L. Ding, X. -H. Lin and M. -T. Lin, "An Innovative Virtual Chamber Measurement Method Based on Spatial Domain Cancellation Technique for Radiation Emission In Situ Test," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 2, pp. 342-351, April 2017, doi: 10.1109/TEM.2016.2612401.