



**HAL**  
open science

## Exploitation de l'analyse de Floquet pour la réflexion anormale : validation expérimentale d'une méthode d'optimisation de SER

Matthieu Elineau, Renaud Loison, Stéphane Méric, Raphaël Gillard, Pascal Pagani, Geneviève Mazé-Merceur, Philippe Pouliguen

► **To cite this version:**

Matthieu Elineau, Renaud Loison, Stéphane Méric, Raphaël Gillard, Pascal Pagani, et al.. Exploitation de l'analyse de Floquet pour la réflexion anormale : validation expérimentale d'une méthode d'optimisation de SER. JCMM 2023 - 17èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Apr 2023, Tours, France. hal-04136524

**HAL Id: hal-04136524**

**<https://hal.science/hal-04136524>**

Submitted on 21 Jun 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Exploitation de l'analyse de Floquet pour la réflexion anormale : validation expérimentale d'une méthode d'optimisation de SER.

Matthieu Elineau<sup>1,2</sup>, Renaud Loison<sup>1</sup>, Stéphane Méric<sup>1</sup>, Raphaël Gillard<sup>1</sup>,  
Pascal Pagani<sup>2</sup>, Geneviève Mazé-Merceur<sup>2</sup>, Philippe Pouliguen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univ. Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR-UMR 6164, 35000 Rennes

<sup>2</sup>CEA CESTA, 15 Av. des Sablières, 33114 Le Barp

<sup>3</sup>DGA, 60 Bd. du général Martial Valin, 75509 Paris  
matthieu.elineau.scholar@gmail.com

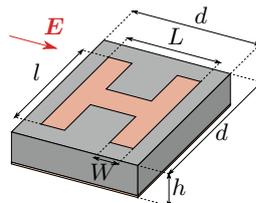
**Résumé**— Cette publication propose une validation expérimentale d'une méthode d'optimisation pour une métasurface périodique. La méthode s'applique dans le cadre de l'analyse de Floquet. Elle consiste dans un premier temps à simuler en environnement infini périodique l'élément invariant de la structure et dans un second temps à exploiter les paramètres de répartition de l'énergie issus de cette simulation pour prédire le comportement en surface équivalente radar (SER) de la structure complète. L'application proposée se concentre sur la réduction de la SER dans une direction de rayonnement d'un mode de Floquet. La surface synthétisée et le dispositif expérimental sont présentés, ainsi que les mesures associées.

**Mots clés**— Métasurfaces, réduction de SER, analyse de Floquet

## I- INTRODUCTION

La surface équivalente radar (SER) d'un objet quantifie la capacité d'un objet à rétrodiffuser une onde reçue dans une direction particulière [1]. Pour des applications de discrétion radar, différents moyens sont employables pour agir sur la SER. Un travail peut être effectué sur la forme des objets, ou l'on peut avoir recours à des matériaux absorbants volumiques. L'émergence récente du domaine des métasurfaces semble apporter une alternative supplémentaire au contrôle de la SER. Ces métasurfaces proposent déjà une grande quantité d'applications de manipulation de front d'onde [2]. Parmi celles-ci, la réflexion anormale permet de rediriger un rayonnement incident dans une direction autre que la direction spéculaire, ce qui est intéressant pour des problématiques de discrétion. Ces métasurfaces consistent en une juxtaposition d'éléments diffractants, les cellules, dont une schématisation est disponible en figure 1. Classiquement, pour la réflexion anormale, ces cellules introduisent un saut de phase variant linéairement à la surface de l'objet.

Toutefois, ces métasurfaces à gradient présentent des niveaux importants de réflexions parasites à cause de la nature périodique du gradient de phase [3]. En effet, les cellules utilisées pour couvrir une période du gradient forment une supercellule (mises en évidence sur la figure 2) qui, une fois répliquée pour créer la surface, excitent des harmoniques de Floquet [4] indésirables. Récemment, une méthode a été proposée pour atténuer ces réflexions parasites à l'aide de l'analyse de Floquet [5]. La simulation d'une supercellule en environnement infini périodique permet le



q	Initiale		Optimisée	
	$l_q$	$L_q$	$l_q$	$L_q$
1	3	9,88	4,42	9,37
2	3	11,08	3,22	11,12
3	3	11,62	3,13	12,19

FIG. 1. La cellule en H. Les paramètres fixés sont  $h = 1,6$  mm,  $d = 14,43$  mm et  $W = 2$  mm. Les dimensions  $l$  et  $L$  sont utilisées comme degré de liberté pour obtenir les réponses en phase.

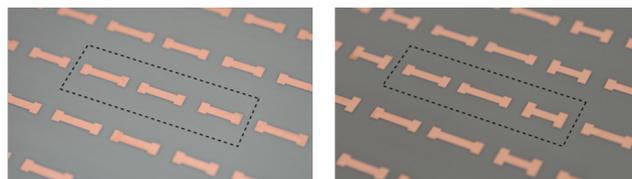


FIG. 2. Vue rapprochée des métasurfaces initiale (à gauche) et optimisée (à droite) réalisées. Une supercellule est représentée.

calcul d'un paramètre  $S_{m,n}$ , rapport entre les amplitudes complexes des champs incidents et réfléchis, pour un couple de modes donné à une fréquence donnée. Les paramètres  $S$  sont incorporés dans un modèle analytique pour prédire la SER de la structure et le modèle est testé et validé en simulation rigoureuse pour plusieurs cas [6]. On montre que les sorties d'une simulation en environnement infini périodique (très faciles à obtenir) sont suffisantes pour décrire correctement le comportement en SER de la structure complète (qui requiert une simulation bien plus lourde). La méthode est exploitée pour optimiser des surfaces réfléchissantes en réduisant le niveau de SER dans la direction parasite.

Cette publication propose la validation expérimentale de la méthode, en comparant en mesure une paire de surfaces constituée d'une surface initiale et d'une surface optimisée.

## II- MÉTASURFACES FABRIQUÉES

L'objectif initial de la métasurface est de réfléchir une onde plane en incidence normale dans la direction  $\theta = 60^\circ$  à l'aide d'un gradient de phase classique. La réflexion a lieu dans un plan normal à la surface et contenant la direction du gradient. Le rayonnement incident est polarisé TM et la fréquence de travail est 8 GHz. Une surface initiale est créée en concevant trois cellules qui produisent la variation linéaire de phase requise sur une période

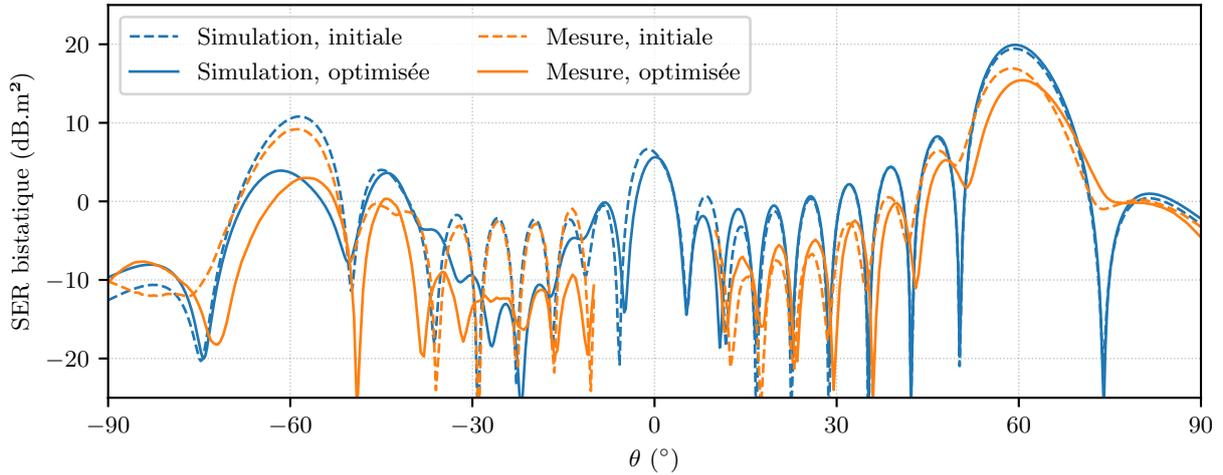


FIG. 3. SER bistatique des surfaces initiales et optimisées, mesurées ou simulées.

de gradient, constituant ainsi une supercellule. Chaque réponse en phase est obtenue à l'aide d'une simulation en environnement infini périodique d'une cellule, éclairée en incidence normale. Les cellules utilisées pour la surface initiale sont représentées sur la figure 1 avec leurs paramètres géométriques (colonne de gauche). La surface est créée en répliquant neuf fois la supercellule dans la direction du gradient pour obtenir un réseau d'environ  $10\lambda$  de long, qui peut être éprouvé en simulation rigoureuse.

La figure 3 présente la SER simulée de cette surface initiale, en trait pointillé bleu. La surface rayonne majoritairement dans la direction  $\theta = 60^\circ$  souhaitée, mais présente aussi un niveau de SER élevé dans la direction de Floquet  $\theta_m = -60^\circ$ . Une surface optimisée est obtenue en suivant la procédure décrite dans la référence [6]. L'optimisation consiste en la maximisation de la différence entre les modules des paramètres  $S_{1,0}$  et  $S_{-1,0}$ , en utilisant la géométrie des patches comme degré de liberté. Cette optimisation est menée uniquement à la fréquence de travail, 8 GHz. Elle exploite donc les paramètres associés aux modes, d'une part  $m = 1$ , dans lequel on souhaite que la structure rayonne et d'autre part  $m = -1$  dans lequel on ne souhaite pas que la structure rayonne. Le fruit de ce processus est une nouvelle supercellule, dont les dimensions sont aussi listées sur la figure 1 (colonne de droite). La supercellule est à nouveau répliquée en un réseau de neuf supercellules, lui aussi éprouvé en simulation rigoureuse. La SER obtenue est reportée en figure 3, en trait plein bleu, et montre diminution de SER de 6,80 dB dans la direction  $\theta_m = -60^\circ$ .

Les deux surfaces, initiale et optimisée, sont synthétisées à l'aide d'une gravure de cuivre sur un substrat Neltec NY9217 sur plan de masse. Des surfaces de  $27 \times 27$  cellules sont fabriquées (soit environ  $10\lambda \times 10\lambda$ , ou environ  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup>). Une vue rapprochée de chaque surface est disponible dans la figure 2 où une supercellule est mise en évidence à chaque fois.

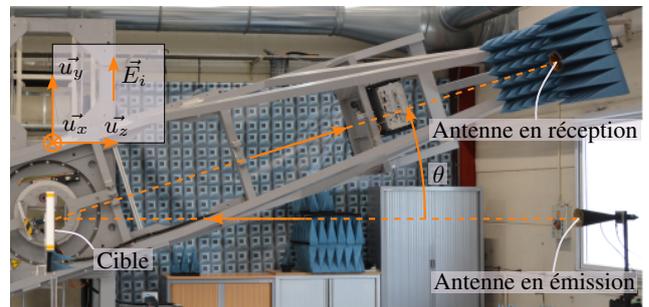


FIG. 4. Mesure de SER de la cible sous test. Antennes d'émission et de réception, angle de bistatisme  $\theta$  et polarisation étudiée.

### III- DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les mesures en SER ont été conduites à l'aide de la plateforme de mesure Arche 3D du CEA-CESTA [7]. L'arche consiste en une antenne sur une armature, montée sur un axe de rotation. Un moteur entraîne la rotation de l'ensemble pour donner accès aux angles de bistatisme  $\theta$ . Ce dispositif est habituellement utilisé en configuration monostatique, une antenne d'émission a donc été ajoutée au sol pour illuminer la surface en incidence normale. La situation est alors celle décrite dans la figure 4, chaque antenne est à une distance  $r = 4$  m de la cible. Pour des raisons évidentes d'encombrement, les angles de bistatisme pour lesquels  $|\theta| < 10^\circ$  sont inaccessibles. Ce n'est pas un problème puisque les directions d'intérêt sont  $\theta = \pm 60^\circ$ . La configuration donne donc accès aux incidences de  $10^\circ$  à  $90^\circ$ . La cible est retournée après une première mesure pour donner accès aux  $\theta$  négatifs. Les mesures sont effectuées sur une bande fréquentielle de 2 GHz à 18 GHz. Outre le fait de donner accès au comportement en fréquence des surfaces étudiées, car l'optimisation n'est menée qu'à une fréquence, la mesure large bande permet surtout le filtrage temporel et donc spatial des surfaces mesurées. Ce filtrage évite de recueillir dans le signal des effets associés à l'environnement de mesure.

### IV- RÉSULTATS

Les SER mesurées des surfaces initiales et optimisées sont reportées en figure 3 avec les SER simulées. La SER

mesurée dans la direction  $\theta = -60^\circ$  est de 9,05 dB pour la surface initiale et de 2,20 dB pour la surface optimisée. La réduction de SER observée en mesure dans la direction  $\theta = -60^\circ$  est donc de 6,85 dB pour une réduction anticipée par la simulation de 6,80 dB. L'accord entre la réduction mesurée et la réduction simulée est excellent. Globalement, la simulation surestime légèrement les niveaux de SER. Le nombre d'approximations effectuées pour la synthèse est important (hypothèse de périodicité locale, finitude, caractérisation avec seulement une réponse en phase et à une seule incidence). C'est ce nombre important d'hypothèses qui rend la méthode d'optimisation efficace. Vis à vis de la mesure, l'approximation qui est la plus importante est certainement au sujet de l'aspect champ lointain. Le calcul de SER, que ce soit avec le modèle en tant que support pour la synthèse ou lors de la simulation rigoureuse de l'objet complet, est effectué en champ lointain. Avec une antenne disposée à 4 m d'une plaque de 40 cm, la mesure n'est assurément pas en champ lointain. La cause des écarts observés en mesure serait à chercher en priorité sous cet aspect.

La figure 5 montre l'évolution de  $\Delta\text{SER}$ , la performance de l'optimisation. Elle est définie telle que  $\Delta\text{SER}(f, \theta) = \text{SER}_{\text{opti.}}(f, \theta) - \text{SER}_{\text{init.}}(f, \theta)$  où  $f$  est la fréquence de travail et  $\theta$  la direction d'observation ou l'angle de bistatisme. L'évolution de  $\Delta\text{SER}(f, \theta = -60^\circ)$  est en orange, trait épais, en figure 5. L'optimisation est effective dans une bande très fine de fréquence. La performance est en fait perdue à  $\pm 200$  MHz autour de la fréquence de travail. Il faut garder en tête qu'aucune règle de synthèse n'a été suivie dans le sens de la création d'un dispositif large bande. De manière générale, les aspects large bande sont une difficulté importante des métasurfaces, étant constituées d'éléments résonants. Les performances larges bandes sont souvent obtenues au prix d'une complexification importante des synthèses, comme avec la mise en place de structures multicouches où encore à plusieurs ordres de périodicité. On note également une amélioration des performances autour de 9 GHz sur une bande d'environ 1 GHz. Par ailleurs,  $\Delta\text{SER}(f, \theta = \theta_{-1})$  a aussi été calculé, où  $\theta_{-1}$  est la direction du mode de Floquet  $m = -1$ , variant avec la fréquence. Ce tracé est en trait fin, gris, sur la même figure. Son comportement est similaire au premier tracé.

## V- CONCLUSION

L'étude démontre expérimentalement la pertinence de la méthode d'optimisation en proposant une mesure d'une surface optimisée. La simulation et la mesure mettent en lumière une réduction de près de 7 dB de la SER dans la direction du lobe parasite. Cela est rendu possible par la simplicité de la simulation de Floquet et l'utilisation de ses sorties pour prédire le comportement en SER des surfaces étudiées. Enfin, on peut noter que la méthode n'est pas limitée à la réduction de la SER dans une direction

particulière. Le choix d'une répartition de la puissance rayonnée arbitraire et la considération d'autres directions (éventuellement multiples) reste libre, tant que la structure est descriptible dans le cadre de l'analyse de Floquet.

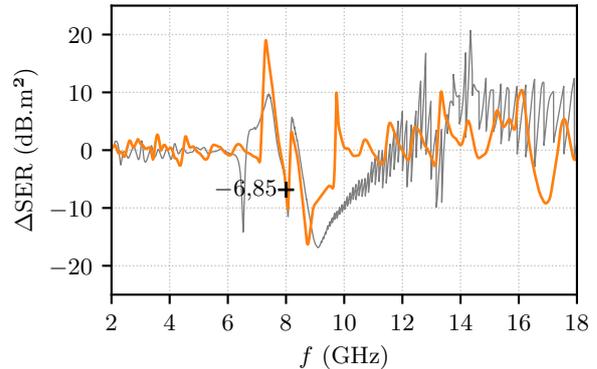


FIG. 5. Évolution de la performance en fréquence dans la direction  $\theta = -60^\circ$  (tracé orange épais) ou dans la direction  $\theta = \theta_{-1}$  (tracé gris fin).

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Guillaume Cartesi et Olivier Raphael pour leurs contributions lors de l'exploitation de la base de mesure Arche 3D.

## RÉFÉRENCES

- [1] E. F. KNOTT, J. F. SHAEFFER et M. T. TULEY, *Radar cross section*. 2004.
- [2] S. B. GLYBOVSKI, S. A. TRETYAKOV, P. A. BELOV, Y. S. KIVSHAR et C. R. SIMOVSKI, "Metasurfaces : From microwaves to visible," *Physics Reports*, 2016.
- [3] A. DIAZ-RUBIO, V. S. ASADCHY, A. ELSAKKA et S. A. TRETYAKOV, "From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors," *Science advances*, 2017.
- [4] A. BHATTACHARYYA, *Phased Array Antennas*. 2006.
- [5] M. ELINEAU, R. LOISON, S. MÉRIC et al., "Multi-mode scattering matrix optimisation for the mitigation of harmonics in anomalous reflection metasurfaces," *51st European Microwave Conference (EuMC)*, 2022.
- [6] M. ELINEAU, R. LOISON, S. MÉRIC et al., "RCS prediction and optimisation for anomalous reflection metasurfaces using Floquet analysis," *International Journal of Microwave Technologies*, 2023.
- [7] P. MASSALOUX, P. MINVIELLE et J. F. GIOVANNELLI, "Indoor 3D spherical near field RCS measurement facility : Localization of scatterers," *8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2014.