XXI[èmes] Journées Nationales Microondes
14-17 mai 2019 – Caen

Réseaux réflecteurs reconfigurables mécaniquement

C. Benteyn[1,2], E. Fourn[1], R. Gillard[1], E. Girard[3], G. Goussetis[2], L. Datashvili[4]
[1] *Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR), Rennes*
[2] *Heriot Watt University (HWU), Edimbourg*
[3] *THALES Alenia Space , Toulouse*
[4] *Large Space Structure (LSS), Munich*
claire.benteyn@insa-rennes.fr ou claire.benteyn@hw.ac.uk

Résumé *– Plusieurs propositions de concepts ont été étudiées pour la reconfigurabilité d'un réseau-réflecteur que celle-ci soit passive ou active, RF ou mécanique. Un nouveau concept est présenté ici et se base sur la déformation du plan de masse par l'utilisation d'actionneurs. La modification de la distance substrat/plan de masse permet de changer la loi de phase avec un seul panneau réflecteur et offre ainsi une reconfigurabilité mécanique de l'antenne. Dans ce document sont présentées : la modélisation du comportement des cellules réfléchissantes par rapport à la distance substrat/plan de masse et la méthodologie de conception du système global.*

1. Introduction

Les réseaux réflecteurs (Reflectarrays - RA) sont des antennes combinant certaines caractéristiques des réflecteurs classiques et des réseaux d'antennes. Dans le domaine spatial, ils ont surtout été étudiés dans l'optique de supplanter les réflecteurs formés notamment grâce à leur faible coût, leur compacité et leur masse.

Les réseaux réflecteurs sont constitués d'une source illuminant un panneau plan sur lequel sont imprimés des éléments réflectifs appelés cellules. Chacune d'entre elles réfléchit l'onde incidente avec une phase dépendant notamment de sa géométrie et de sa distance au plan de masse (notée h_i). Le diagramme de rayonnement souhaité est alors obtenu en combinant l'ensemble des ondes réfléchies par les cellules.

Les technologies permettant une reconfiguration des cellules réfléchissantes pour un RA [1] ou un réflecteur [2] ont fait l'objet de nombreuses études. Par ailleurs, la reconfigurabilité mécanique à l'aide d'actionneurs et d'une membrane déformable a été proposée pour les antennes réflecteurs [2] et expérimentée plus récemment pour les RA [3]. Les objectifs principaux sont de limiter la masse et l'encombrement et de maximiser le nombre de couvertures réalisables.

La méthode de reconfiguration présentée dans cet article se base sur ce principe mais prend en compte le respect de l'intégrité des cellules. Ainsi, la modification de la phase réfléchie par les cellules unitaires est obtenue par déformation du plan de masse et non pas de la membrane sur laquelle sont imprimées les cellules (cf. Figure 1). La modélisation de l'impact de la distance sur la phase réfléchie pour un élément donné et une méthode de sélection d'une configuration optimale pour le système global sont présentées et discutées.

Pour ce faire, le système présenté étant soumis tant à des contraintes RF que mécaniques, son étude nécessite l'identification d'indicateurs de performances. Les deux principaux ainsi définis sont l'erreur de phase moyenne (AVE) le long du réseau et la pente maximale que doit fournir la membrane entre deux cellules consécutives. Lors des premières études, ces indicateurs nous ont permis d'identifier différentes améliorations possibles et contraintes potentielles qui ont pu être ajoutées au système et testées. Les résultats ainsi obtenus sont présentés à la fin de cet article.

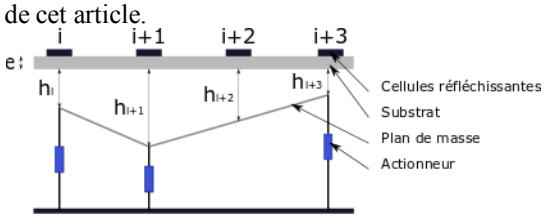


Figure 1. Schéma de principe du réseau reconfigurable proposé.

2. Modélisation du comportement des cellules réflectrices en fonction de h_i

Le changement de couverture réalisée par le réseau réflecteur dépendant directement de la modification de la distance, h_i, entre chaque cellule i et le plan de masse, le comportement de tous les éléments réflecteurs en fonction de celle-ci doit être connu. Afin de pouvoir couvrir la gamme de 360° de phase nécessaire en conservant une structure monocouche, les cellules Phœnix [4] ont été choisies. Pour modéliser l'impact de h_i sur la phase réfléchie, un outil permettant de caractériser analytiquement le comportement d'une cellule a été créé.

La méthodologie mise en place peut être divisée en deux étapes. La première consiste à obtenir la matrice S de la cellule dans un environnement périodique infini, pour un substrat donné et indépendamment de la future distance h_i au plan de masse, à l'aide du logiciel HFSS (cf. Figure 2, gauche). La seconde utilise un circuit électrique équivalent pour obtenir le coefficient de réflexion global en présence d'un plan de masse situé à n'importe quelle distance h_i donnée (cf. Figure 2, droite).

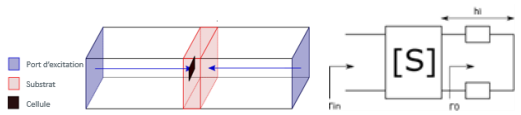


Figure 2. Modèle HFSS (à gauche), et circuit électrique équivalent d'une cellule (à droite).

La Figure 3 présente les résultats obtenus pour des cellules Phoenix de type inductif d'ordre 2 (Fig. 3) pour une longueur d'onde λ de 24 mm et une fréquence *f* de 12.5GHz. Les géométries testées ont un pas de maille *P* égal à λ /3, une largeur de fente *w* fixée à 0.3mm et un paramètre *l* variant entre 1.9mm et 3.5mm pour un pas de 0.05mm. La distance h_i est considérée comme étant la distance entre le centre de la cellule et le plan de masse. Notons que ce dernier est considéré comme plan sous toute la surface de la cellule.

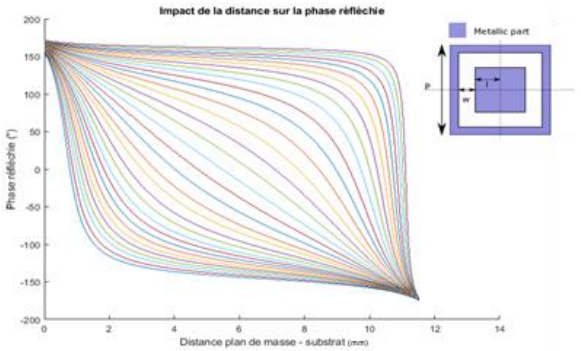


Figure 3. Phase réfléchie en fonction de h_i pour différentes géométries de cellules Phœnix.

La Figure 3 présente des cellules avec des comportements très différents en fonction de la distance au plan de masse. En effet, on remarque qu'en fonction de la valeur de l choisie, l'évolution de la phase peut être plus ou moins linéaire. L'intérêt des cellules à phase linéaire (ex : Figure 3, courbe turquoise : *l*=2.65mm) est qu'elles sont moins sensibles à de possibles erreurs de positionnement. En contrepartie, elles nécessitent de fortes amplitudes de déformation si l'on souhaite changer leur état de phase. Il y a donc un compromis à trouver en fonction de la reconfiguration souhaitée. A titre d'exemple, la plus forte variation (Figure 3, courbe mauve) est obtenue pour la cellule dont le paramètre géométrique *l* est égal à 1.9mm.

La détermination de la phase réfléchie par une cellule donnée en fonction de h_i à fréquence fixe et leur caractérisation peut alors servir de base à la sélection d'une configuration optimale du système global. De plus, étant donné que les lois de phase nous permettent d'identifier pour chaque cellule du réseau les variations de phase que chacune devra fournir, il est possible à l'aide de la base de données (cf. Figure 3) de connaître la plage de valeur de h_i pour chacune d'entre elles. Ceci pourra être utilisé par la suite pour optimiser le choix des cellules et ainsi fournir une meilleure solution en termes de nombre d'actionneurs, de déformation du plan de masse et de lois de phase formées.

3. Méthodologie de conception du réseau réflecteur reconfigurable mécaniquement

Une étude préliminaire a été menée sur un réseau linéaire composé de 38 cellules (ayant les mêmes caractéristiques que celles présentées dans la Figure 3) et devant répondre à trois lois de phase différentes correspondant à trois dépointages du faisceau (0° (S1), 9° (S2) et -9° (S3)) par rapport à la normale au réseau à une fréquence *f* de 12.5GHz. Le réseau linéaire ainsi que la géométrie de l'antenne utilisée sont décrits sur la Figure 4.

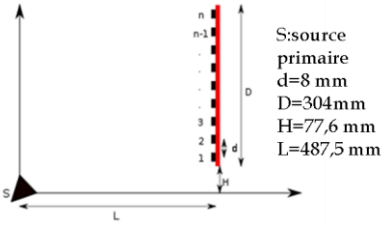


Figure 4. Géométrie de l'antenne étudiée.

A chaque cellule du RA, sont associées trois phases et donc trois hauteurs de plan de masse (h_i) correspondant à chacun des dépointages désirés. Les lois de phase à fournir sont présentées sur la Figure 5. On peut remarquer que chaque loi de phase présente de nombreux sauts de phases et que certaines cellules devront être capables de fournir une gamme de phases très importante. Ainsi, le choix de cette mission permettra une première approche du problème mais ne constitue pas le cas le plus favorable pour notre système. En effet, la variation de phase moyenne (VPM) à produire sur le réseau est importante, égale à 165°.

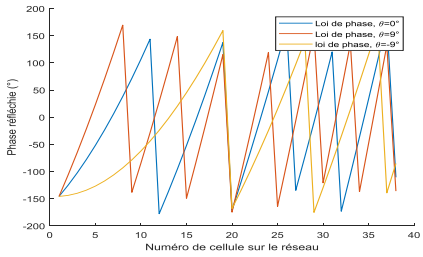


Figure 5. Lois de phase.

Une première méthode permettant de sélectionner les cellules pour l'initialisation du réseau tout en simplifiant le problème a été identifiée. Celle-ci consiste à choisir une distribution adéquate des cellules permettant de réaliser une des trois lois de phase sans déformer le plan de masse. Les deux autres lois de phase seront alors réalisées par déformation de ce dernier. Cette méthode a pour avantages principaux d'avoir au minimum une couverture optimisée et de réduire le nombre de déformations à gérer.

Les résultats présentés par la suite sont obtenus en considérant une distribution de cellules optimisée pour un dépointage de –9° sans déformation du plan de masse et pour une hauteur initiale h_0 = 6mm. En utilisant la base de données de cellules présentée Figure 3 et en considérant la distribution cellulaire définie lors de l'initialisation du réseau, on obtient deux déformations du plan de masse

correspondant aux deux autres dépointages. Celles-ci sont considérées par la suite comme les déformations idéales.

Une fois ces déformations idéales à appliquer connues, il est nécessaire d'identifier le nombre et la position des actionneurs à utiliser ainsi que la forme prise par la membrane entre deux d'entre eux. L'hypothèse considérée ici est que la membrane a une forme linéaire entre deux actionneurs consécutifs, ceux-ci ayant une action ponctuelle au centre de la cellule. Notons que le positionnement des actionneurs aura un impact sur la forme du plan de masse et sur la qualité de l'approximation de la loi de phase à synthétiser.

La masse et la complexité du système global devant être également prises en compte, le nombre d'actionneurs doit être minimisé. En première approximation, la distance h_i peut-être définie à λ/2 près sans impact sur la phase réfléchie. Ce degré de liberté peut être exploité pour lisser la déformation du plan de masse en cherchant à obtenir une évolution aussi monotone que possible. Il a été également remarqué qu'il était possible d'envisager cette optimisation des déformations pour maximiser le nombre de pics de déformation communs aux deux couvertures et ainsi simplifier le positionnement des actionneurs le long du réseau. Les déformations ainsi obtenues sont appelées déformations optimales.

A titre d'illustration préliminaire, la Figure 6 présente les déformations idéales puis optimisées pour les deux dépointages nécessitant une déformation du plan de masse (0° et 9°). Les points verts matérialisent les actionneurs nécessaires pour le cas non-optimisé tandis que les flèches bleues correspondent au cas optimisé. Notons que leur nombre a été réduit au maximum et leur position testée afin d'obtenir le meilleur compromis entre les deux déformations en termes d'erreur de phase moyenne et de pente maximale entre deux cellules consécutives.

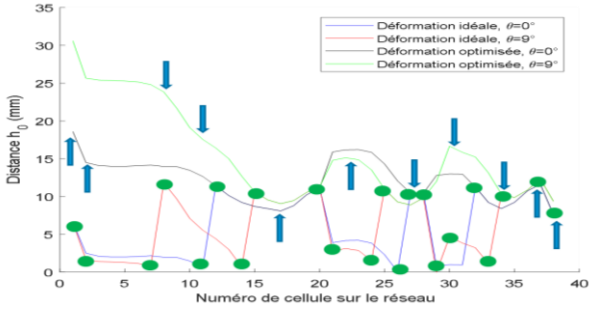


Figure 6. Distances idéales et optimales pour deux cas canoniques θ=0° et θ=9° avec un dépointage de référence sans déformation de θ=-9°.

Le tableau 1 présente les résultats obtenus avec cette configuration. On considère (cf. Figure 6) 22 actionneurs pour les déformations idéales et 11 pour le cas optimisé.

Une nette diminution du nombre d'actionneurs peut être remarquée lorsque l'on compare les résultats avec ou sans optimisation de la distance. Néanmoins, il est important de noter qu'elle repose sur l'hypothèse que l'ajout d'une distance égale à λ/2 à la distance idéale ne modifie pas la phase réfléchie, ce qui implique un fonctionnement relativement faible bande. Notons cependant que ce point n'a pas été pris en compte dans ces premières études.

Le Tableau 1 présente les valeurs maximales obtenues, considérant les cas θ=0° et θ=9° avec actionneurs, en termes d'erreur de phase moyenne (AVE) et de pente maximale de déformation (MS) pour les déformations idéale et optimale. Afin de réaliser cette étude, on considère que la déformation de la membrane est linéaire entre deux actionneurs consécutifs. La distance des cellules au plan de masse n'est alors plus idéale. Ainsi, l'erreur de phase moyenne n'est plus nulle et la pente maximale peut avoir été modifiée.

On remarque que malgré le nombre bien moindre d'actionneurs pour le cas optimisé, les indicateurs de performances AVE et MS présentent un meilleur compromis malgré une légère augmentation de l'erreur de phase moyenne d'environ 10°. Néanmoins, la pente maximale est quant à elle réduite de presque deux tiers. Ces résultats bien qu'encourageants présentent une pente maximale encore trop importante si l'on considère les limitations liées aux caractéristiques des matériaux. Aux vues des matériaux disponibles, selon notre partenaire LSS, la pente maximale est limitée à 15%. De plus, afin de pouvoir réellement évaluer les performances du système une étude des diagrammes de rayonnement est nécessaire. Celle-ci permettra de mieux définir la plage de valeurs acceptables pour l'AVE et de prouver la pertinence de cet indicateur.

Déformation idéale		**Déformation optimisée**	
Erreur de phase moyenne	**Pente maximale**	**Erreur de phase moyenne**	**Pente maximale**
24.5°	138%	31.2°	32.4%

Tableau 1. Résultats obtenus pour un dépointage de référence sans déformation θ=-9° à h_0=6mm.

La Figure 7 montre l'impact relativement important des erreurs de phase et de la déformation réelle de la membrane (considérant l'ajout des actionneurs le long du réseau) sur la directivité maximale et l'amplitude des lobes secondaires pour chaque dépointage. Seuls les diagrammes de rayonnement obtenus dans le cas des déformations optimisées sont présentés. On remarque que le diagramme de rayonnement pour le cas de référence correspond bien à un dépointage de -9°.

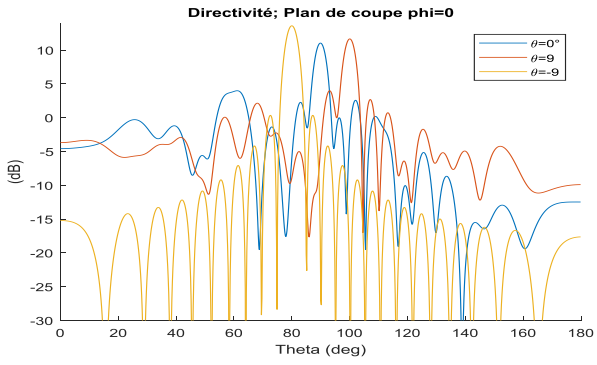


Figure 7. Comparaison des diagrammes de rayonnements obtenus pour les trois dépointages.

4. Perspectives d'améliorations et nouvelles contraintes identifiées

Les résultats obtenus en considérant trois dépointages du faisceau soulignent la nécessité d'optimiser le choix initial des cellules et la position des actionneurs afin de réduire l'AVE et le MS.

Le cas présenté comme première approche étant défavorable du fait des fortes et nombreuses variations de loi de phase (VPM=165°), un nouveau cas test moins contraignant a été identifié pour évaluer les capacités de la méthode décrite précédemment dont la valeur de phase moyenne à produire le long du réseau (VPM) est de 145°. Ainsi, la nouvelle mission consiste en trois couvertures à fréquence fixe, f=12.2GHz, dont les lois de phase sont présentées Figure 8. Pour notre cas une configuration Cassegrain avec un sous-RA linéaire constitué de 38 cellules est considérée.

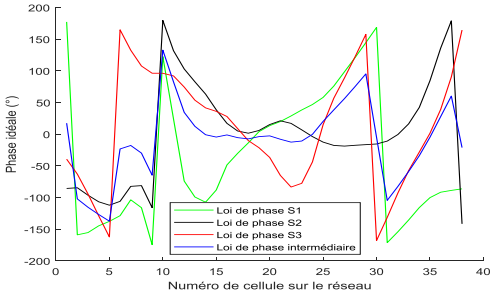


Figure 8. Nouvelles lois de phase.

Afin d'améliorer le choix initial des cellules sur le réseau, l'utilisation d'une loi de phase dite intermédiaire est envisagée. L'objectif fixé est de pouvoir améliorer la sélection des cellules et réduire la pente entre deux cellules consécutives. En première approche la phase intermédiaire est considérée comme étant la moyenne des trois lois de phase à fournir. Il est important de noter que l'utilisation de cette dernière peut complexifier le problème puisqu'elle nécessitera trois déformations et non deux comme précédemment.

Le placement des actionneurs optimisé, bien qu'intéressant d'après les premiers résultats obtenus, peut réduire la capacité de reconfiguration du système. Ainsi, celui-ci sera remplacé par une répartition uniforme.

5. Utilisation d'une loi de phase intermédiaire

La même étude que celle réalisée pour la mission correspondante à un changement de dépointage a été réalisée avec les nouvelles lois de phase, une base de données cellulaires plus importante, une répartition homogène des actionneurs et sans optimisation de la déformation. Ainsi, les résultats présentés sont obtenus pour des conditions moins favorables que précédemment.

On peut observer, à nombres égaux de cellules sur le réseau et d'actionneurs (cf. Tableau 1, déformation optimisée) une nette amélioration de l'AVE de près de 20° et une augmentation de la pente maximale.

	h_0 initial	10.0
	Nbre d'actionneurs	11
AVE (°)	S1	9.0
	S2	11.8
	S3	12.5
	MS (%)	58.3

Tableau 2. Résultats obtenus pour une loi de phase intermédiaire de référence avec une répartition homogène des actionneurs.

6. Conclusion

Une méthodologie analysant la modélisation du comportement des cellules réflectrices de RA en fonction de la distance substrat/plan de masse a été présentée dans ce document. Celle-ci a servi de base à un outil développé pour la sélection de la configuration optimale d'un réseau réflecteur reconfigurable, dont la mise en place a également été détaillée. Suite à l'étude réalisée sur les résultats obtenus, deux points majeurs semblent nécessaires à optimiser : le choix initial des cellules et celui de la position des actionneurs déformant le plan de masse.

Afin de mieux répondre aux réels besoins nécessitant ce type de système, de nouvelles lois de phase ont été étudiées. Celles-ci présentant moins de sauts de phase importants ont permis de limiter la pente à fournir entre certaines cellules consécutives. De plus, certaines hypothèses ont été reformulées et comparées à de nouvelles comme l'utilisation d'une loi de phase intermédiaire comme référence, la répartition homogène des actionneurs le long du réseau ou encore la limitation de l'amplitude maximale de déformation. De nombreuses perspectives d'amélioration sont envisagées.

Références

[1] S.V.Hum, J.Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable Reflectarrays and Array Lenses for Dynamic Antenna Beam Control : A review », IEEE Trans on Antennas and Propagation, vol.62, n°1, Jan 2014.

[2] L.Datashvili, H.Baier, B.Wei, S.Endler, L.Schreider, "*Design of a morphing skin using flexible fiber composites for space-reconfigurable reflectors*", Proc. of the 54th Structures, Structural dynamics, and Materials Conference, Avril 2013.

[3] X.Yang, S.Xu, F.Yang, M.Li, H.Fang, Y.Hou, S.Jiangs, L.Liu, "A Mechanically Reconfigurable Reflectarray with Slotted Patches of Tunable Height", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, n°4, pp555-558, 2018.

[4] L.Moustafa, R.Gillard, F.Peris, R. Loison, H.Legay, E. Girard,"The Phoenix Cell: A New Reflectarray Cell With Large Bandwidth and Rebirth Capabilities", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.10, pp 71 – 74, 2011.