

Source millimétrique bi-fréquence

Jean-Pierre Adam, Yannick Béniguel

IEEA, 13, Promenade Paul Doumer, 92400 Courbevoie

1 Introduction

Il est légitime de se demander si l'antenne présentée dans ce chapitre est une antenne non-standard. En effet, elle n'utilise pas un nouveau mécanisme de rayonnement électromagnétique et ne fait même pas partie d'une nouvelle technologie d'antennes. Il s'agit simplement d'un cornet corrugué. Cependant, il s'agit d'un cornet corrugué destiné à être embarqué sur un satellite. Comme beaucoup d'antennes embarquées, il est basé sur une technologie bien connue et bien maîtrisée pour limiter les imprévus. Comme beaucoup d'antennes embarquées, il est soumis à un cahier des charges exigeant allant parfois au-delà de ce qui est habituellement demandé. Pour concilier ces deux tendances antagonistes, il faut parfois avoir recours à des astuces. L'antenne présentée ici en est un bel exemple.

2 Contexte

L'antenne à concevoir fait partie d'un radiomètre embarqué sur un satellite. Cet instrument sera utilisé pour des recherches en climatologie. De nombreuses fréquences sont sondées afin d'extraire des informations sur la température, les nuages, les précipitations, etc.... Les différentes fonctions d'un tel instrument ne sont pas l'objet de ce chapitre. On retiendra simplement la spécification qui a initié le design de la présente antenne : l'instrument doit traiter les fréquences 54 GHz et 118 GHz provenant du même point de l'atmosphère. Pour viser le même point aux deux fréquences, il semble naturel d'utiliser la même ouverture. D'où la demande pour une source millimétrique bi-fréquence. De plus on observe sur la figure 1 que l'instrument est composé de plusieurs autres sources au foyer d'un seul réflecteur. Il peut donc y avoir un problème d'encombrement. Traiter deux fréquences avec une seule source permet aussi de réduire ce problème.

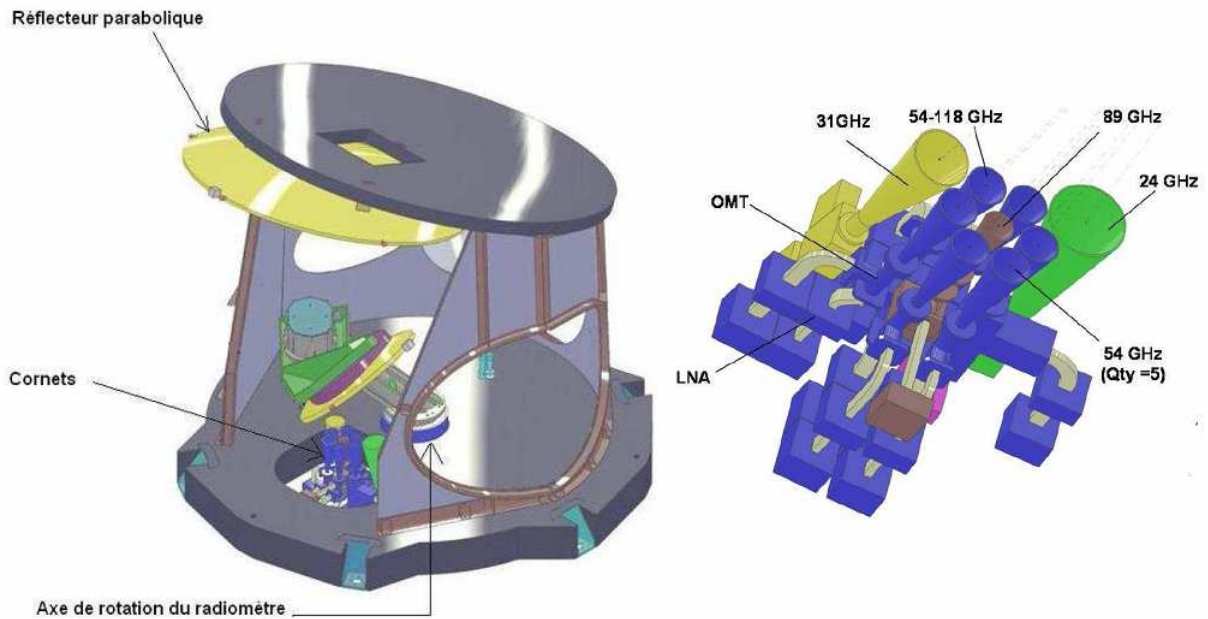


figure 1 : Vue d'ensemble de l'instrument (à gauche) et zoom sur les cornets placés au foyer du réflecteur parabolique (à droite).

3 Technologie choisie et premier design

Comme les coefficients de réflexion sur l'atmosphère, sur le sol ou sur toute autre structure éclairée dépendent de la polarisation, les antennes de radiomètres doivent avoir une faible polarisation croisée. La solution classique est l'utilisation d'un cornet corrugué. La figure 2 montre le fonctionnement schématique d'une telle source. Le mode HE₁₁ qui est généré par une telle source permet d'obtenir une polarisation très pure. Afin de permettre la propagation d'un tel mode, les corrugations doivent avoir une profondeur de $\lambda/4$ (λ étant la longueur d'onde).

La grande majorité des cornets corrugués en reste là. Cependant, si on ajoute un multiple entier de $\lambda/2$ à la profondeur des corrugations, la surface obtenue se comporte de la même façon et peut propager le mode HE₁₁. Ainsi, on pourrait utiliser des corrugations de $3\lambda/4$ de profondeur. D'où l'idée d'utiliser les mêmes corrugations pour propager le mode HE₁₁ à deux fréquences : la profondeur des corrugations correspondra à $3\lambda/4$ à la plus haute fréquence et $\lambda/4$ à la plus basse fréquence. Il apparaît un facteur 3 entre les deux fréquences. Dans le cas présent, le facteur est $118/54 = 2.2$. On espère donc que les bandes de fréquence de fonctionnement sont suffisamment larges pour couvrir celles imposées par les spécifications. D'après la littérature, la bande de fréquence haute est plus étroite (cf. réf. [1]). On centre donc le design sur cette bande. Autrement dit, les corrugations feront exactement $3\lambda/4$ à 118 GHz, c'est-à-dire 1.9 mm. Cette longueur correspond à $\lambda/4$ à une fréquence de 40 GHz, ce qui est raisonnablement proche de 54 GHz.

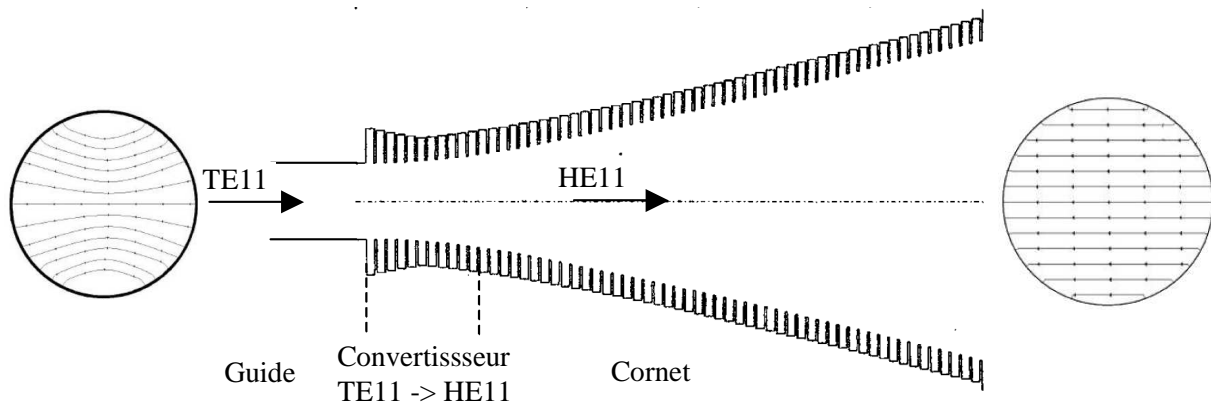


figure 2 : Vue de coupe d'un cornet corrugué. Il supporte le mode HE11 qui permet d'obtenir des lignes de champs presque parallèles à la sortie (vue de face à droite). Le raccord à un guide lisse et à son mode TE11 (vue de face à gauche) nécessite un convertisseur de mode.

La figure 2 fait apparaître un élément important du cornet corrugué : le convertisseur de mode. En effet, passage du mode TE11 du guide lisse au mode HE11 du cornet corrugué ne peut pas être immédiat. Pour éviter une réflexion trop importante à la jonction des deux sections, une transition progressive est nécessaire. Une corrugation de $\lambda/2$ de profondeur est identique à un guide lisse. La transition est donc réalisée en faisant varier la profondeur des corrugations de $\lambda/2$ à $\lambda/4$. Cette méthode est classique. Mais comme précédemment, on remarque qu'on peut ajouter $\lambda/2$ à la profondeur pour obtenir le même comportement. Ainsi, la première corrugation peut apparaître comme une surface lisse à deux fréquences : sa profondeur correspondra à λ à la plus haute fréquence et $\lambda/2$ à la plus basse fréquence. Le rapport entre les fréquences est maintenant de 2, ce qui est proche du rapport des deux fréquences de fonctionnement de l'antenne à réaliser.

Pour valider ce concept, une simulation numérique est nécessaire. On a utilisé un logiciel basé sur la méthode des moments pour les objets à symétrie de révolution (cf. réf. [2]). Les grandeurs simulées sont le coefficient de réflexion vu par l'onde provenant du guide d'alimentation et le diagramme de rayonnement. Pour estimer la qualité du diagramme de rayonnement, on se contente pour le moment de la valeur maximale de la polarisation croisée. Quelques tâtonnements ont été nécessaires pour obtenir les résultats présentés sur la figure 3. On remarquera que la transition entre le guide lisse et le cornet corrugué présente des corrugations non seulement de profondeur variable, mais aussi de largeur variable. Cette variation de largeur est généralement utilisée pour augmenter la bande passante de l'antenne. La figure 3 montre en effet une bande de fréquence haute relativement large et avec peu de marges. Ce convertisseur de mode large bande est cependant irréalisable : la première corrugation est trop fine et trop profonde. Si on la modifie en tenant compte des contraintes de fabrication, les performances de l'antenne sont dégradées. Cependant, l'antenne ainsi dégradée est un bon point de départ pour la suite de l'étude.

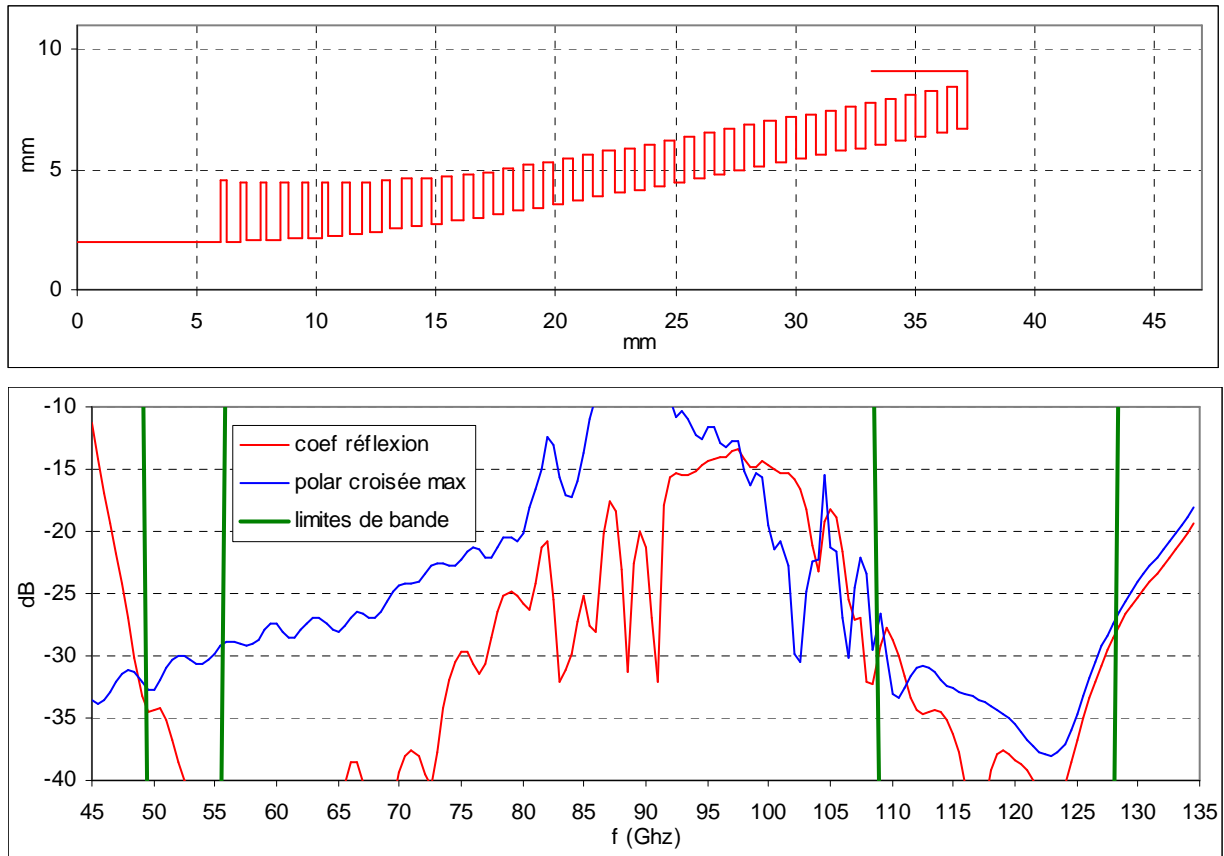


figure 3 : Profil interne (en haut) et performances simulées (en bas) du cornet corrugué obtenu par tâtonnements. La bande de fréquence basse est 49.5 GHz – 55.5 GHz. La bande de fréquence haute est 109 GHz – 128 GHz.

4 Optimisation et design final

En partant de la géométrie du cornet présenté sur la figure 3, une optimisation est appliquée pour atteindre les performances exigées : un faible coefficient de réflexion et une faible polarisation croisée, sur l'ensemble des deux bandes de fréquence de fonctionnement. Ces grandeurs sont utilisées pour calculer une fonction coût qu'il faudra minimiser. Quelques tâtonnements ont été nécessaires pour trouver des coefficients de pondération pour chaque grandeur et chaque point de fréquence. Les variables du problème d'optimisation sont les paramètres géométriques des corrugations. Il y a 4 variables par corrugation : distance à l'axe, profondeur, largeur de la corrugation et largeur de la dent. Pour limiter le nombre de variables, seules les corrugations du convertisseur de mode sont libres. On se concentre ainsi sur cette partie sensible de l'antenne. Toutes les autres corrugations du cornet sont identiques. Après plusieurs essais, on est arrivé à un convertisseur composé de 9 corrugations. On a donc 36 variables dans le convertisseur et 4 dans le reste du cornet, soit un total de 40 variables. Le domaine d'excursion de ces variables est donné par les contraintes de fabrications. L'algorithme d'optimisation choisi est simplement un gradient conjugué. Comme le point de départ fournissait de bonnes performances, un tel algorithme est plus efficace qu'un algorithme génétique. La figure 4 montre la géométrie optimisée. Le nombre important de variables et les différentes mises au point ont nécessité une durée de calcul de plusieurs semaines sur un ordinateur standard.

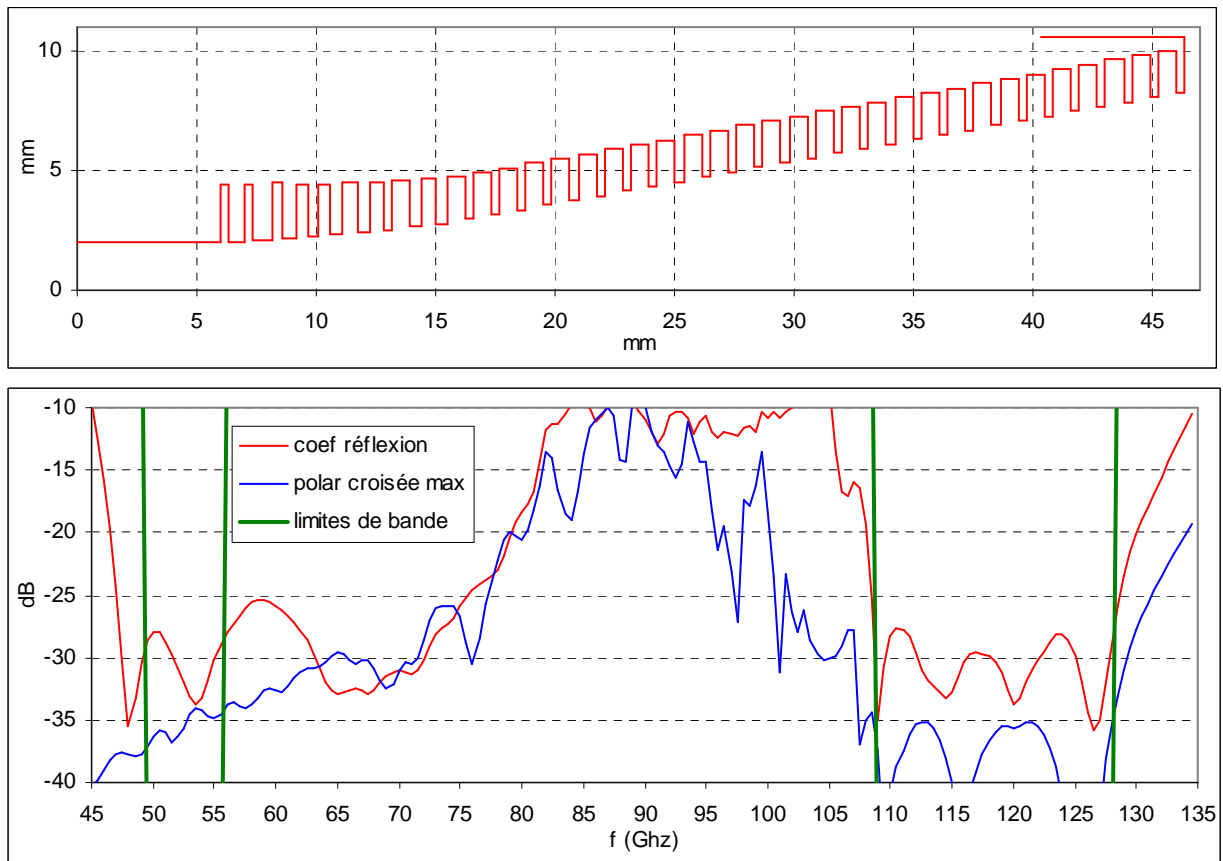


figure 4 : Profil interne (en haut) et performances simulées (en bas) du cornet corrugué obtenu par optimisation.

5 Antenne complète

Jusqu'à présent, on a considéré que l'antenne se résume au cornet corrugué. La figure 1 rappelle que le cornet est utilisé pour éclairer un réflecteur parabolique. L'une des spécifications de l'ensemble cornet + réflecteur est une efficacité très importante. Autrement dit, la plus grande partie du rayonnement émis par le cornet doit atteindre le réflecteur, ce qui est possible avec un cornet directif, c'est-à-dire un cornet à grand diamètre d'ouverture. Cette information était déjà connue aux étapes précédentes, mais elle a été ignorée afin de pouvoir simuler un petit cornet nécessitant moins de temps de calcul. En fait, on a supposé que le coefficient de réflexion et la polarisation croisée étaient principalement influencés par le convertisseur de mode et par la géométrie des corrugations dans le cornet. La figure 5 montre la version rallongée du cornet de la figure 4. La première moitié est identique au cornet court. Le reste est obtenu en répétant la dernière corrugation autant de fois que nécessaire pour obtenir le diamètre d'ouverture voulu. Les performances obtenues vérifient *a posteriori* que le cornet plus court était un bon intermédiaire de calcul : son coefficient de réflexion et sa polarisation croisée majorent celles du cornet long. On remarque cependant que la polarisation croisée de la version longue est parfois plus importante, notamment dans la bande haute. Le niveau obtenu reste acceptable.

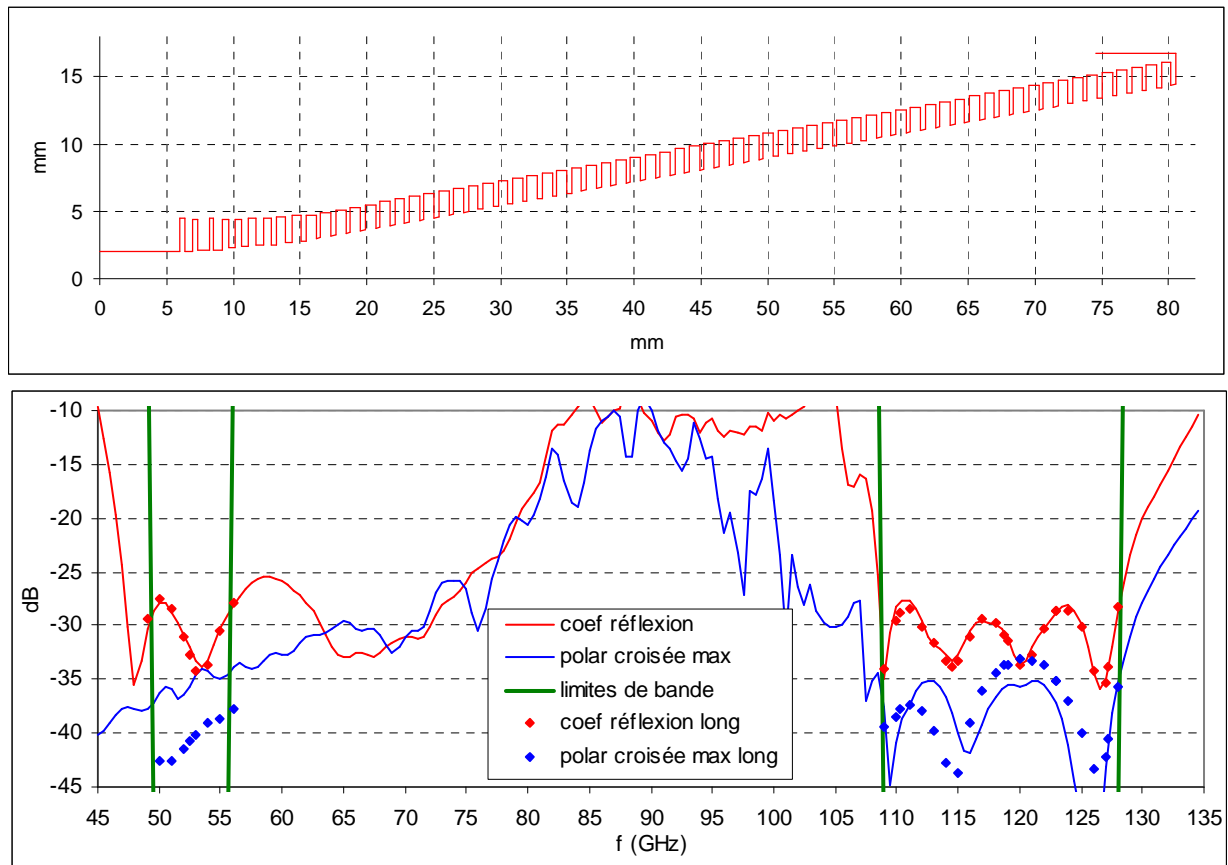


figure 5 : Profil interne (en haut) et performances simulées (en bas) du cornet corrugué obtenu par optimisation et rallongé pour obtenir la taille d'ouverture requise. On a rappelé les résultats de la version courte du cornet.

Par ailleurs, l'antenne complète (cornet + réflecteur) doit observer le même point de l'atmosphère aux deux fréquences de fonctionnement de l'antenne. Ce critère est quantifié par une grandeur qu'on nommera recouvrement. On considère les diagrammes de rayonnement de l'antenne complète à 54 et 118 GHz. En fait, on ne considère que le lobe principal et on se limite à -3dB . L'intersection de cette limite et du lobe conduit à un contour dans le plan des coordonnées sphériques. Ce contour permet de définir une surface. L'intersection de cette surface à 54 GHz avec celle à 118 GHz fournit une nouvelle surface. Le rapport de cette surface divisé par la plus grande des deux premières surfaces est le recouvrement. La figure 6 illustre cette définition peu courante. Cette figure montre aussi le résultat obtenu lorsque le cornet est au foyer du réflecteur. Dans ce cas, le recouvrement est presque parfait. Il s'agit ici d'un résultat normal. En effet, le cornet est directif et n'éclaire pas entièrement le réflecteur pour obtenir une très bonne efficacité. Par conséquent, l'angle d'ouverture du diagramme de rayonnement du réflecteur n'est pas donné par son diamètre, mais par le diamètre de la partie éclairée. Le lien entre le diamètre d et l'angle d'ouverture à -3dB HPBW (de l'anglais « Half Power BeamWidth ») est approximativement $\text{HPBW} = 70^\circ \lambda/d$ (cf. réf [3]). Or le diamètre de la partie éclairée est déterminé par l'angle d'ouverture du diagramme du cornet. Cet angle est déduit du diamètre du cornet par la même formule. On peut alors montrer facilement que l'angle d'ouverture du diagramme de rayonnement de l'antenne complète ne dépend pas de la fréquence. Ces considérations sont basées sur des approximations, mais elles permettent de comprendre pourquoi le résultat obtenu est aussi bon.

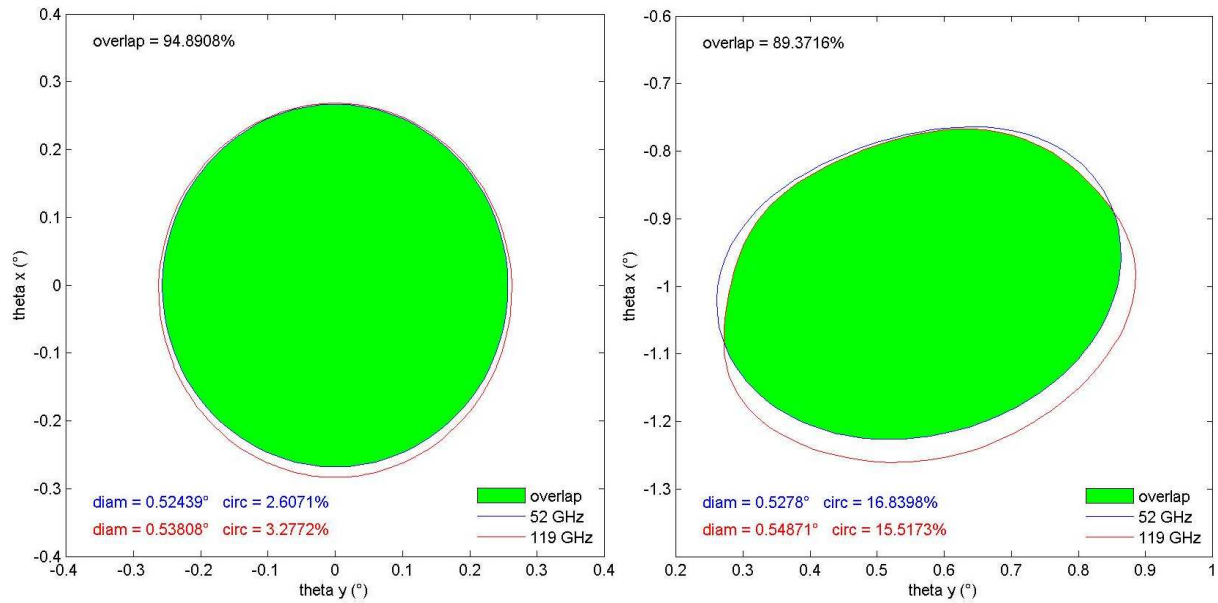


figure 6 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne complète (cornet + réflecteur). En fait, il s'agit seulement du contour du diagramme à -3dB dans le plan des coordonnées sphériques θ et ϕ (notées theta x et theta y ici). La fréquence centrale basse est représentée en bleu. La fréquence centrale haute est en rouge. Le recouvrement (noté overlap ici) représente l'intersection des deux surfaces formées par les contours. La figure de gauche est obtenue avec le cornet placé au foyer du réflecteur (recouvrement de 95%). La figure de droite correspond à la position réelle du cornet (recouvrement de 89%).

Lorsqu'on éloigne le cornet du foyer du réflecteur, la validité des approximations précédentes se dégrade. La figure 6 prouve que le recouvrement en est légèrement affecté. La valeur obtenue est légèrement inférieure à la spécification qui exige un recouvrement de 90%. L'écart est cependant acceptable. Différentes solutions sont envisageables pour améliorer le recouvrement. La plus évidente est de rapprocher le cornet du foyer. Or le foyer est déjà occupé par d'autres sources comme le montre la figure 1. Une autre approche consisterait à retoucher le cornet pour obtenir un diagramme de rayonnement qui compenserait la dégradation due à la défocalisation. En effet, tout comme on a considéré que le coefficient de réflexion et la polarisation croisée du cornet sont dues à la géométrie des corrugations, on peut considérer que le diagramme de rayonnement est principalement influencé par la forme du cornet. On pourrait donc réutiliser le résultat précédent, figer la géométrie des corrugations et du convertisseur de mode, introduire seulement quelques variables définissant la forme du cornet et relancer une optimisation en incluant le diagramme de l'ensemble cornet + réflecteur dans la fonction à optimiser. Des essais encourageants ont été réalisés. Mais la forme conique du cornet initial possède un avantage important : elle est très facile à réaliser par usinage. En effet, il est facile de percer un cône dans une pièce métallique (les corrugations sont creusées après le perçage du cône).

Conclusion

L'antenne présentée ici est non-standard. Elle est basée sur une astuce qui permet d'utiliser un cornet corrugué au-delà de son domaine d'application habituel. Mais cette astuce n'est applicable que dans le contexte particulier de la mission de l'antenne. Autrement dit, il est très peu probable de voir cette antenne devenir une antenne standard un jour. Cependant, on peut considérer les contraintes qui ont conduit à son développement : une seule source pour fonctionner à plusieurs fréquences, elle-même devant partager un réflecteur avec d'autres sources. Ces contraintes de conception sont non-standard et proviennent du domaine des antennes embarquées sur satellites. Mais il est très probable que ces exigences deviennent plus courantes dans de futurs systèmes devant remplir de plus en plus de fonctions avec de moins en moins de volume disponible.

6 Références

- [1] Christophe Granet and Graeme L. James, "Design of Corrugated Horns : a Primer", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 76–84, April 2005.
- [2] A.Berthon, R.Bills, "Integral Equations Analysis of Radiating Structures of Revolution", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 159-170, February 1989.
- [3] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves & Antennas*, www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa, p. 497, June 2004