

PARABOLE A STRUCTURE GEODESIQUE POUR LE TRAFIC SATELLITE

Matthieu CABELLIC F4BUC

Le principe

Toute mon expérimentation tire son origine de l'idée originale de JA6XKQ d'utiliser les structures à maillage géodésique afin de réaliser des réflecteurs paraboliques. Soulignons que l'utilisation de telles structures géodésiques n'est pas une idée nouvelle puisqu'elles sont largement répandues en architecture dans la construction de dômes, de formes sphériques comme la Géode à la cité des sciences et de l'industrie, mais aussi pour construire des radomes ainsi que des paraboles professionnelles de toutes tailles. Cependant une telle technologie n'a, à ma connaissance, jamais été utilisée dans le monde radioamateur. Le principe géodésique appliqué à la réalisation de nos paraboles apporte des bénéfices principalement sur la facilité de fabrication et la maîtrise de la précision de surface. Enfin une telle réalisation peut être vue comme une réalisation d'un objet mathématique instructif et esthétique.

Nous entendons par géodésique une courbe tracée sur une surface reliant deux points de cette surface et de longueur minimale. Un maillage géodésique consiste à utiliser un faisceau de telles courbes géodésiques de façon à la couvrir de façon homogène. Quadriller une surface plane est très simple, il suffit de dessiner des courbes droites horizontales et verticales. Mais qu'en est-il de quadriller une surface courbée tel un paraboloïde? Le maillage géodésique est justement une solution mathématique à ce problème.

Une grande facilité de réalisation sans besoin d'ajustement

Les éléments de base servant à la construction d'un maillage géodésique sont des lattes plates et assez souples. Ces lattes sont percées avec précision afin de pouvoir les attacher à chaque nœud du maillage.

Ce qui est tout à fait remarquable avec ce type de fabrication vient du fait que la forme parabolique naît d'elle-même au cours de l'assemblage. Il n'y a donc aucun ajustement nécessaire une fois que le maillage est réalisé. La précision de la surface est garantie par la précision du perçage des lattes en alu, c'est tout!

Comparaison des designs de paraboles

Le tableau suivant dresse une comparaison entre le design géodésique et le design traditionnel.

Critères	Construction géodésique	Construction à base de bras paraboliques rigides (maillage étoile)
Facilité de fabrication des éléments de structure	Très facile, ne nécessite que des lattes plates souples en aluminium qu'il faut couper et percer	Chaque bras doit être fabriqué à l'identique mais demande un certain travail car la forme doit être la plus proche possible d'une parabole et rigide. Cela entraîne en générale une structure avec bras de renforts et donc pas mal de découpe, perçage, rivetage, avec des profilés de tailles différentes.
Facilité d'assemblage des éléments de la structure	Très facile, ne demande aucun ajustement mécanique. Il faut juste relier chaque noeud avec une vis et un écrou ou un rivet et la forme parabolique apparaît d'elle même!	L'assemblage de tous les bras demande un contrôle mécanique précis afin qu'ils soient tous bien positionnés, sinon cela entraîne une imprécision importante de la surface. Enfin pour les diamètres important un cerclage intermédiaire est utile.
Nombre d'éléments de structure	Idem	Idem
Précision de la surface	Ne dépend que de la précision du perçage initial et de la souplesse des lattes. Répartition homogène des erreurs sur la surface.	Dépend de la précision de la courbe de chaque bras et de leur fixation à la base. La répartition des erreurs n'est pas homogène car la distance entre les bras augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre du réflecteur.
Robustesse	Robuste	Très robuste
Poids	Léger	Peu augmenter très vite avec la complexité de la structure des bras
Pose du grillage	Facilité par l'homogénéité de la structure géodésique.	Délicate entre les bras surtout lorsque l'on s'éloigne du centre!
Temps de réalisation d'une structure de 1m de diamètre	Quelques heures	Plusieurs jours

De la souplesse naît la rigidité

L'autre propriété intéressante de ce maillage est sa rigidité. En architecture de nombreux dômes et radomes sont fabriqués en utilisant un maillage géodésique car il offre une grande résistance aux efforts mécaniques surtout ceux liés à la gravité.

Dans notre cas, les lattes sont courbées de part leur élasticité, de ce fait toute la structure est en tension mécanique, ce qui garantit une très bonne stabilité. Pour un diamètre de 1m au moins aucune structure de renfort n'est nécessaire, ce qui l'allège considérablement.

Un maillage géodésique favorable pour la précision de surface

Afin de pouvoir monter en fréquence il faut savoir réaliser un réflecteur avec précision, c'est à dire avec le minimum d'erreur de déviation par rapport à une surface parabolique parfaite.

Traditionnellement, nous considérons que la précision nécessaire est de l'ordre de $\lambda/10$ ou $\lambda/20$. Cependant, ces " $\lambda/10$ " renferment plus de subtilités que l'on peut croire. En effet il faut tenir compte non pas seulement de la valeur maximale de l'erreur de la surface mais aussi de

la distribution de cette erreur sur la surface. La distribution la plus importante est la périodicité de l'erreur le long de l'axe du paraboloïde en s'éloignant du centre. La figure suivante tirée du VHF/UHF Manual du RSGB montre comment cette distribution intervient exactement dans la pénalité sur le gain.

VHF/UHF MANUAL

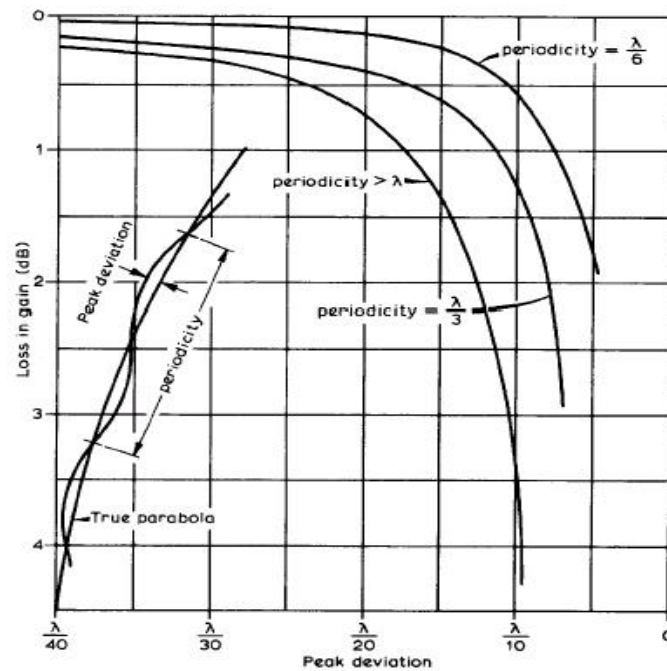


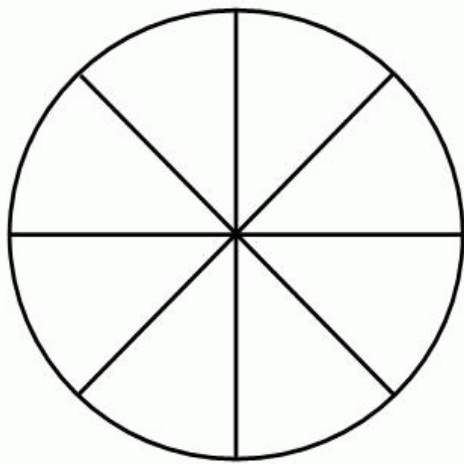
Fig 8.102. The effect of dish inaccuracy on performance

Figure 1 : Pénalité sur le gain en fonction de l'erreur de surface (Source : RSGB VHF/UHF Manual)

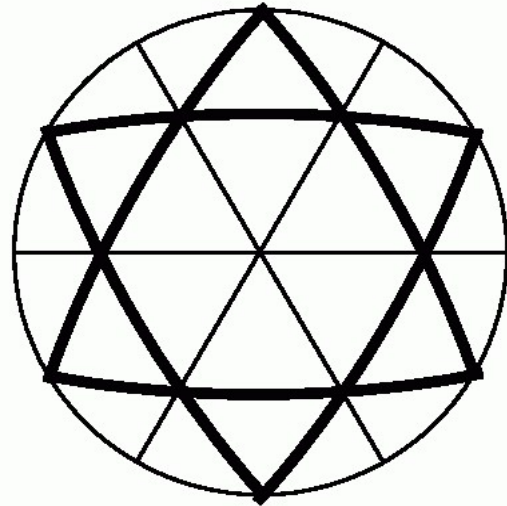
Prenons une erreur de déviation pic de $\lambda/10$. Si la périodicité de l'erreur est de λ alors la pénalité sur le gain est au moins de 3dB ! Par contre, si elle peut être réduite à $\lambda/6$ alors la pénalité n'est plus que de 0.5dB ! Ce qui est négligeable.

Nous voyons donc immédiatement l'intérêt de fabriquer une structure de réflecteur avec un maillage distribué de façon plus homogène.

Justement, le maillage géodésique le permet car chaque point de maille couvre de façon homogène le réflecteur. Chaque point de maille est exactement un point de paraboloïde par construction, ainsi la périodicité spatiale de l'erreur de surface se trouve considérablement réduite par rapport à d'autres structures employées, en particulier celles utilisant classiquement le maillage en étoile.



Maillage en étoile



Maillage géodésique

Ainsi le maillage géodésique est favorable vis à vis de la pénalité de gain liée à l'erreur de surface car elle permet une répartition plus homogène des erreurs de surface. Cette remarque est générale. Nous voyons d'après les courbes de la figure que le bénéfice est réel pour des erreurs pic de plus de $\lambda/20$ et pour une périodicité d'erreur de $\lambda/3$. Sur 2400MHz une telle périodicité correspond à $13\text{cm}/3 = 4\text{cm}$, ce qui commence à représenter un maillage très dense! Il faut donc tempérer nos conclusions.

Nous pouvons dire qu'un maillage géodésique permet de maîtriser mieux la surface parabolique par rapport à un maillage en étoile car elle s'obtient de façon "spontanée" et naturelle avec une précision mathématique. De plus la répartition des erreurs est plus homogène que la structure en étoile. Ces deux aspects ne peuvent être que bénéfiques sur le gain. Enfin la reproductibilité des performances est assurée.

Réalisation d'un parabole géodésique de 90cm de diamètre

Cette réalisation est basée sur la description de JA6XKQ.

Le diamètre est de 90cm, ce qui est tout à fait suffisant pour viser des applications comme le trafic troposphérique jusqu'à 5.7GHz car le gain est suffisant et l'angle d'ouverture n'est pas encore trop étroit. Un petit faisceau haut débit sur 2.4GHz ou 5.7GHz peut très bien être imaginé en utilisant une telle parabole des deux côtés. Enfin pour une application satellite pour AO-51 et plus tard P3E ce diamètre est parfait.

La parabole prototype possède les caractéristiques suivantes:

- **F/D = 0.35**, Ce f/d convient bien à une source de type patch.
- **Diamètre : 917 mm**
- **Focale = 320 mm**
- **Poids : 1.8 kg**
- **Gain estimé : 24dBi @ 2400 MHz; 30dBi @ 5700 MHz**

Réalisation du maillage géodésique

Matériel nécessaire

Désignation	Quantité
Lattes plates de 15mm de largeur, 2mm épaisseur, 1m de longueur	9
Lattes plates de 10mm de largeur, 2mm épaisseur, 1m de longueur	3
Profilé carré ou en U de 15mm, 1m de longueur	2
Rivets alu de diamètre 4mm et prévus pour une épaisseur de 6mm	16
Vis + écrous de 4mm longueur 10mm	9
Ecuelle en inox diamètre 20cm, env 8cm de profondeur	1
Grillage en alu type moustiquaire	1
Brides de fixation	2
Colle thermique en bâtonnets	

Tout ce matériel se trouve sans difficulté dans les magasins de bricolages.

La photo suivante représente la structure terminée avec le repérage des dimensions des mailles.

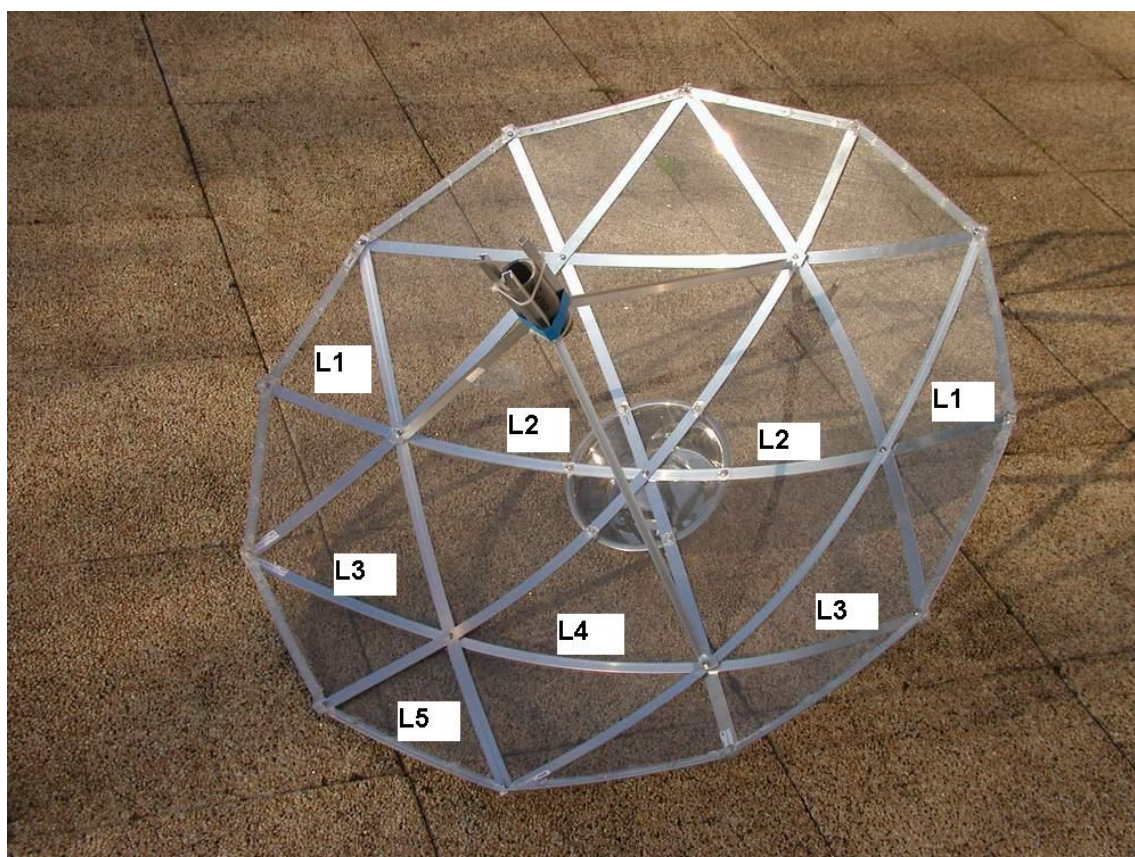


Figure 2 : Repérage des jeux de latte et des dimensions du maillage

Le premier travail consiste à préparer les jeux de lattes à assembler pour le maillage et le support de la source.

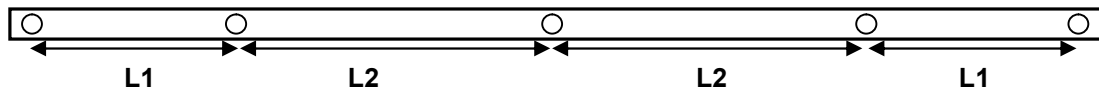
Pour garantir un bon résultat, il est nécessaire de percer au demi millimètre

Premier jeu de lattes.

Quantité : 3

Latte en aluminium : largeur 15mm, épaisseur 2mm

Trous de 4mm.



L1 = 174 mm

L2 = 321mm

Deuxième jeu de lattes.

Quantité : 6

Latte en aluminium : largeur 15mm, épaisseur 2mm

Trous de 4mm.



L3 = 262 mm

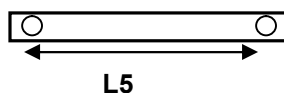
L4 = 312mm

Lattes de cerclage

Quantité : 12

Latte en aluminium : largeur 10mm, épaisseur 2mm

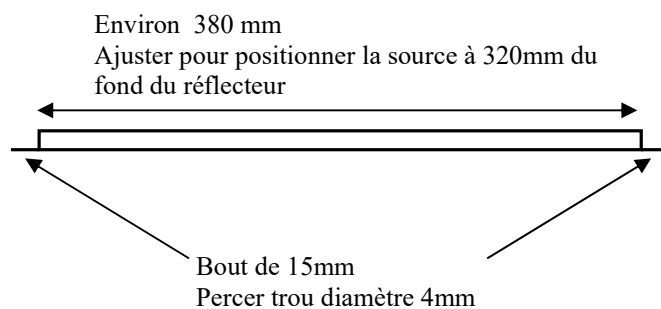
Trous de 4mm.



L5 = 237 mm

Supports de la source

Quantité : 3



Assemblage du maillage géodésique

Commencer par disposer sur le sol trois lattes parallèles, celle du milieu étant une latte du premier jeu de lattes et les deux autres étant deux lattes du deuxième jeu de lattes.

Ensuite superposer à 60 degrés trois autres lattes de la même façon. Enfin superposer trois autres lattes à 120 degrés de la même façon.

Vous devez avoir l'impression de vous retrouver face à un jeu de mikados !

Attacher le centre des trois lattes du premier jeu de latte (c'est le centre du réflecteur).

Ensuite attacher les autres nœuds du maillage en rivetant afin d'obtenir le maillage sur la photo suivante. Attention! Ne pas riveter les trois nœuds servant à l'attache des trois bras supportant la source mais utiliser pour cela des vis et écrous.

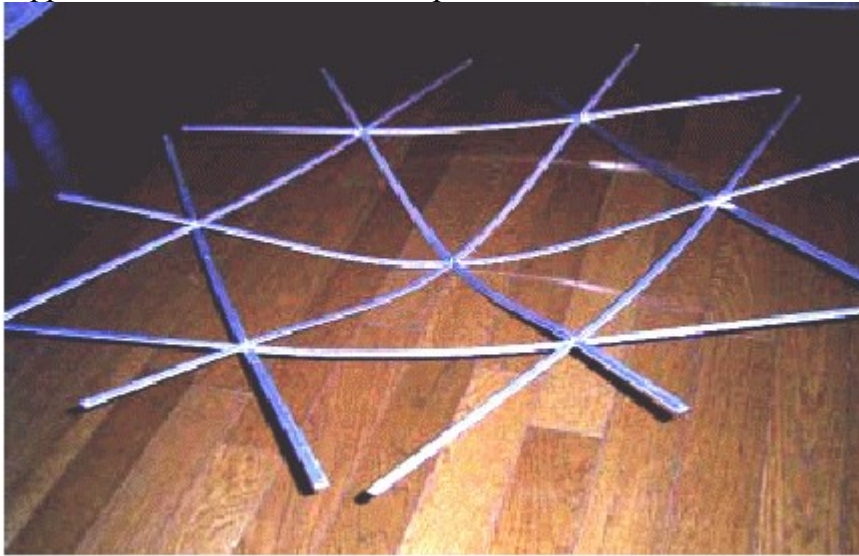


Figure 3 : Premier assemblage des lattes

Un bombage apparaît, la forme parabolique commence à naître.

Enfin terminer la périphérie du réflecteur en assemblant les petites lattes du troisième jeu de lattes en rivetant. Vous devez sentir la tension de la structure augmenter et voir la forme parabolique apparaître.

Le maillage géodésique du réflecteur est terminé!

Précision de surface obtenu sur la structure maillée

Une telle structure, nous l'avons vu, a la propriété intéressante de répartir de façon plus homogène les erreurs de surface.

Les chiffres suivants sont ceux obtenus en mesurant une structure non grillagée et selon une des trois lattes passant par le sommet du paraboloïde.

distance du centre (cm)	45,00	41,25	37,50	33,75	30,00	26,25	22,50	18,75	15,00	11,25	7,50	3,75	0,00
hauteur théorique (cm)	16,60	13,95	11,53	9,34	7,38	5,65	4,15	2,88	1,84	1,04	0,46	0,12	0,00
mesure prototype (cm)	16,6	14,1	11,9	9,7	7,6	5,8	4,5	3	2	1	0,4	0	0
Erreur (mm)	0,0	-1,5	-3,7	-3,6	-2,2	-1,5	-3,5	-1,2	-1,6	0,4	0,6	1,2	0,0

Erreur moyenne (mm)	Erreur écart-type (mm)	max (mm)	min (mm)
-1,3	1,7	1,2	-3,7
Lambda/20 -> fréquence max		9,0 GHz	

Comme nous pouvons le voir, la précision de surface obtenue est excellente et la fréquence d'utilisation maximale prédite est importante. Dans la réalité, nous pouvons affirmer que le réflecteur est utilisable jusqu'à 5.7GHz.

Pose du grillage

L'étape suivante (et souvent la plus longue !) consiste à poser le grillage sur la structure géodésique.

Le grillage utilisé pour le prototype est de la moustiquaire en aluminium, facile à trouver dans les grands magasins de bricolage. Ces principales qualités sont sa souplesse et sa capacité légèrement élastique.

Le grillage est posé à l'arrière et repose sur les lattes.

Pour grillager correctement le réflecteur, il faut découper la surface par secteurs. La figure suivante illustre la décomposition de la surface de grillage.

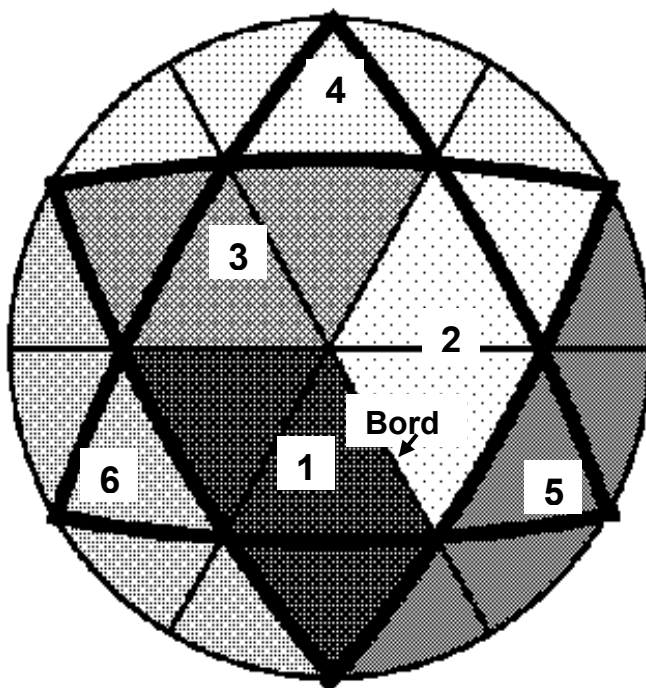


Figure 4 : Découpage du grillage en secteurs

Pour attacher les bords d'un secteur à un autre, j'ai utilisé de la colle chaude au pistolet. L'intérêt de cette méthode vient du fait que la colle, étant liquide lorsqu'elle est chaude (attention aux doigts, ça chauffe !) imprègne bien les mailles du grillage. Ensuite, quelques secondes après, lorsqu'elle refroidit, elle se durcit et les deux grillages des deux secteurs sont alors parfaitement bien attachés.

Commencer par le secteur 1 en repliant les bords du grillage sur les lattes tout en tendant bien le grillage.

Ensuite, continuer avec le secteur 2 : coller le grillage sur le bord avec la colle puis étirer afin de couvrir le secteur et replier le grillage sur les lattes des 3 autres bords du secteur 2. Recommencer avec le secteur 3. La technique est la même : coller un bord avec le secteur 2, étirer, coller l'autre bord avec le secteur 1, étirer et replier les deux autres bords du secteur 3 sur les lattes.

Idem ensuite avec les secteurs 4, 5 et 6.



Figure 5 : Détail d'un raccordement de grillage entre deux secteurs

Une fois le travail de pose du grillage terminé, découper les bouts de grillage qui dépassent à l'aide d'une petite paire de ciseaux. Terminer si possible la fixation aux lattes avec du fil fin à quelques endroits.

Support de la source

Les bras supports de la source

Couder les extrémités des trois bras supports de la source et les attacher aux nœuds du maillage correspondant. La photo suivante montre l'assemblage.



Figure 6 : Détail sur la fixation d'un bras support de source

Positionnement de la source

La source est attachée aux extrémités des trois bras supports. Selon la forme de la source il faut adapter la fixation, mais le plus important est de respecter la distance focale pour bien positionner la source.

Le F/D de ce réflecteur entraîne l'utilisation d'une source de type patch. Il est intéressant de monter la source sur un morceau de tube en PVC afin de pouvoir le faire coulisser sur les extrémités des bras et donc ajuster finement la position de la source.

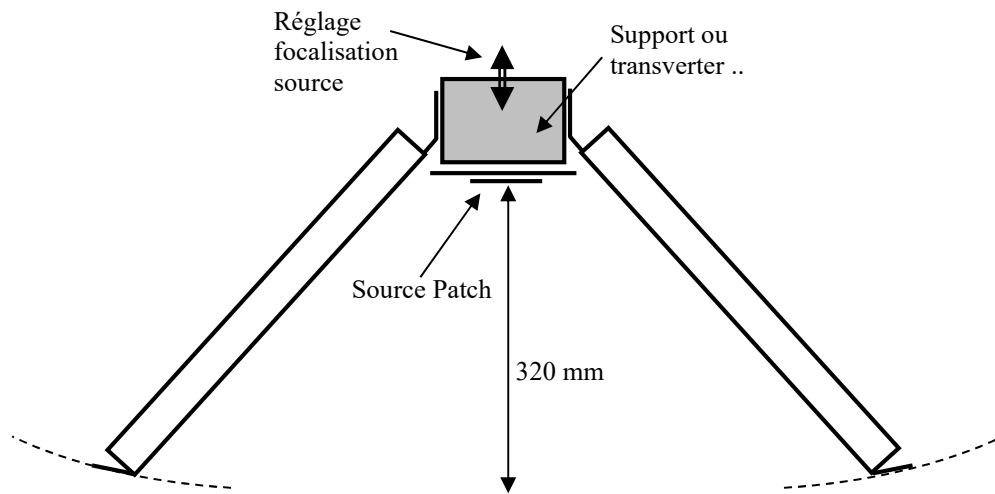


Figure 7 : Positionnement de la source

Il est tout à fait possible de positionner un préamplificateur ou un transverter au niveau de la source. Cependant, il faut veiller à ce que le poids reste raisonnable. La limite à ne pas dépasser semble être de 400 grammes afin de ne pas trop déformer le réflecteur lorsque ce dernier est positionné verticalement.



Figure 8 : Exemple de réalisation avec une antenne patch (le convertisseur est monté sur la prise N).

La figure 8 montre un exemple de réalisation. L'antenne patch sur la figure est positionnée précisément au point focal en faisant coulisser le tube PVC. Le câble coaxial est maintenu à l'intérieur du profilé en U d'un des bras support.

Fixation arrière du réflecteur

La fixation de l'antenne sur un tube se fait en utilisant une écuelle en inox fixée derrière le réflecteur.

Des petites calles sont disposées à chaque point de fixation entre l'écuelle et les lattes afin de compenser l'effet d'épaisseur des lattes. En effet, la fixation de l'écuelle ne doit pas déformer les lattes. Ainsi les écrous ne sont pas vissés à fond mais juste suffisamment pour que les calles reposent sur le bord de l'écuelle. De la colle chaude est ensuite appliquée pour assurer la rigidité de chaque fixation.

Il est recommandé de percer d'abord les 6 trous sur l'écuelle, puis de l'apposer sur le réflecteur afin de dessiner exactement le points de perçages correspondant sur les lattes.



Figure 9: Fixation arrière du réflecteur

Le montage ne pose pas de difficultés particulières. Les deux tiges filetées en "U" des brides sont montées sur l'écuelle en perçant deux trous pour chaque. Attention à ne pas oublier de les monter avant de fixer l'écuelle sur le réflecteur!

Finition et autres idées

Il est recommandé de protéger l'ensemble de la structure contre l'effet de la corrosion en utilisant un vernis adéquat pour l'aluminium. En particulier le grillage, du fait de sa finesse, doit être protégé.

L'écuelle utilisée pour la fixation arrière offre un certain volume qu'il est possible d'utiliser pour abriter par exemple un transverter, un préamplificateur, un relais coaxial etc...

Conclusion

Nous venons de décrire ici le principe et l'intérêt du maillage géodésique dans la réalisation de réflecteurs paraboliques. L'antenne qui est décrite ici est en principe utilisable jusqu'à 5.7GHz

et son gain, ses dimensions, sa facilité de réalisation et d'utilisation en fait une antenne de choix pour le trafic sur les bandes centimétriques avec les satellites en orbite Molnya, en particulier pour le futur satellite P3E.

Liens

Site Internet de JA6XKQ (en Japonais): <http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/>

Site Internet de F4BUC : http://f4buc.chez.tiscali.fr/parabole_geodesique2.htm

Bonne réalisation et bons QSO

F4BUC

Matthieu.cabellic@tiscali.fr