

Parabole à structure géodésique

Matthieu Cabelllic F4BUC

(Article paru dans le proceeding de CJ 2007)

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 radômes 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 paraboloid ? 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 fixer 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 en connectant les mailles entre elles au fur et à mesure 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 CONCEPTIONS DE PARABOLES

Le tableau ci-après dresse une comparaison entre la conception géodésique et la traditionnelle.



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 général 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 nœud 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	Peut 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 1 m de diamètre	Une journée	Plusieurs jours

DE LA SOUPLESSE NAÎT LA RIGIDITÉ

L'autre propriété intéressante de ce maillage est sa rigidité.

En architecture, de nombreux dômes et radômes 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 par leur élasticité ; de ce fait, toute la structure est en tension mécanique, ce qui garantit une très bonne stabilité. Pour un diamètre de 1 m 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, donc 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 dégradation du gain.

Prenons une erreur de déviation maximum de $\lambda/10$. Si la périodicité de l'erreur est de λ alors la perte en gain est au moins de 3 dB !

Par contre, si elle peut être réduite à $\lambda/6$ alors la perte n'est plus que de 0,5 dB ! Ce qui est bien souvent négligeable..

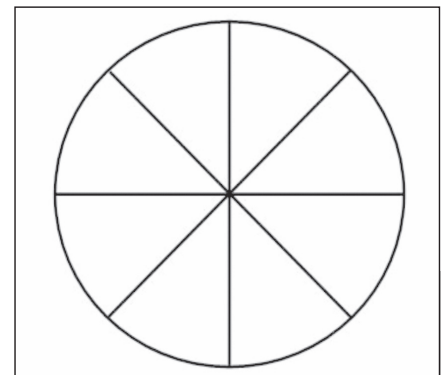


Figure 2 : maillage en étoile

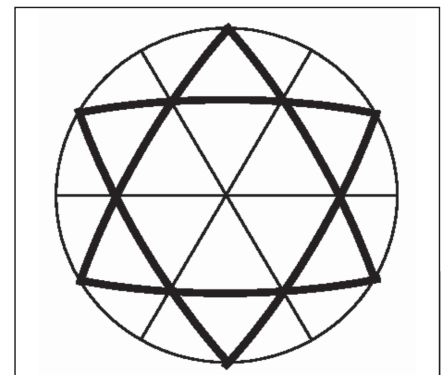


Figure 3 : maillage géodésique

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

Le maillage géodésique le permet car chaque point de maille couvre de façon homogène le réflecteur.

Chaque point de maille est 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 le classique maillage en étoile.

Ainsi le maillage géodésique est favorable vis à vis de la perte 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, par exemple, d'après les courbes de la figure que le bénéfice est réel pour des erreurs supérieures à $\lambda/20$ et pour une périodicité d'erreur de $\lambda/3$.

Sur 2400 MHz 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.

VHF/UHF MANUAL

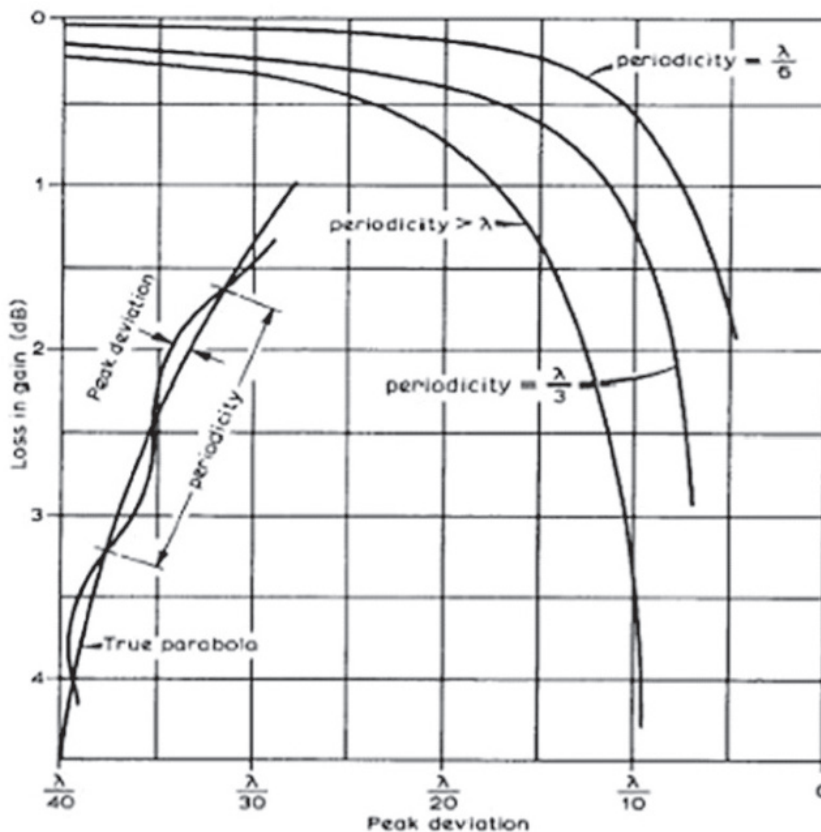


Fig 8.102. The effect of dish inaccuracy on performance

Figure 1 : dégradation du gain en fonction de l'erreur de surface (Source : RSGB VHF/UHF Manual)

Nous pouvons dire qu'un maillage géodésique permet de mieux maîtriser 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'UNE PARABOLE GÉODÉSIQUE DE 90 CM DE DIAMÈTRE

Cette réalisation est basée sur la description de JA6XKQ. Nous la reproduisons ici.

Le diamètre est de 90 cm, ce qui est tout à fait suffisant pour viser des applications comme le trafic troposphérique jusqu'à 5,7 GHz car le gain est suffisant et l'angle d'ouverture n'est pas encore trop étroit.

Un petit faisceau haut débit sur 2,4 ou 5,7 GHz peut très bien être imaginé en utilisant une telle parabole des deux côtés.

Pour une application satellite, 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** : 24 dBi à 2400 MHz et 30 dBi à 5700 MHz

Réalisation du maillage géodésique :

Matériel nécessaire

Voir tableau ci-après

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

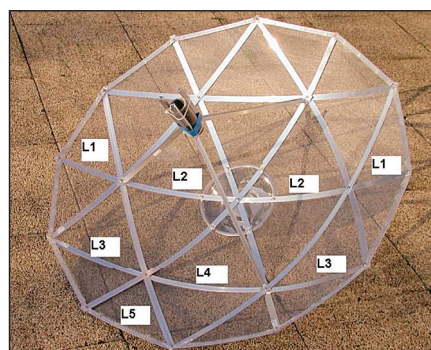
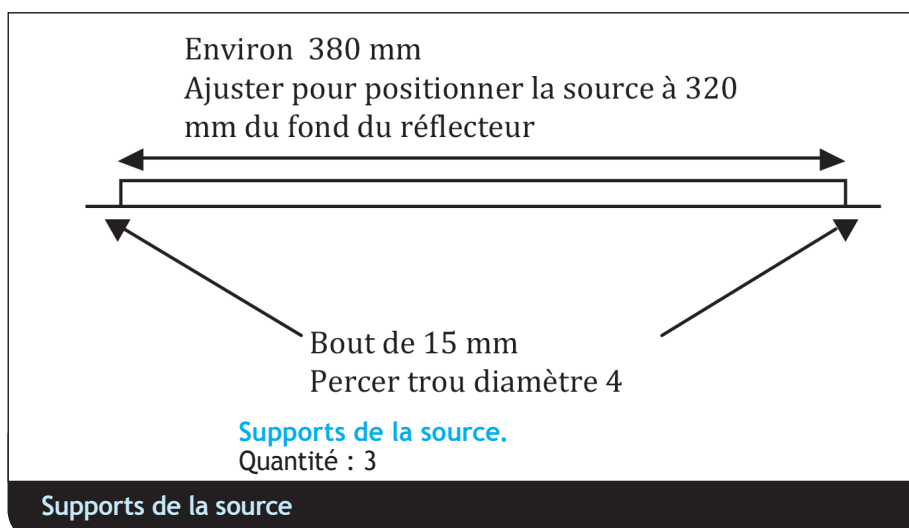
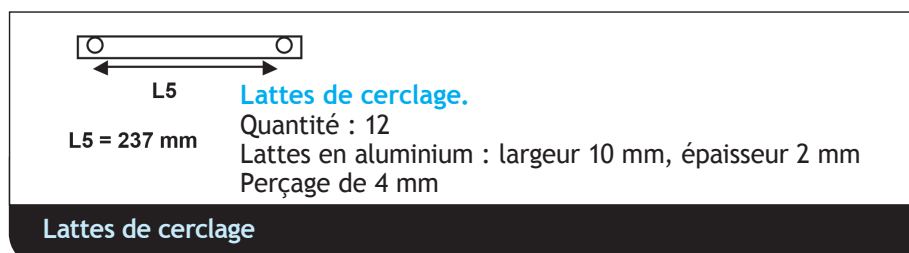
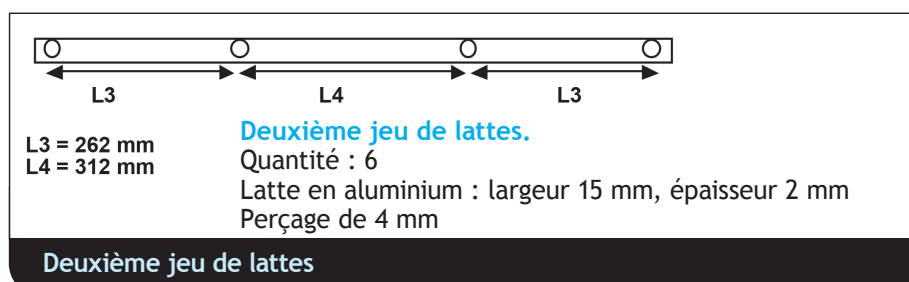
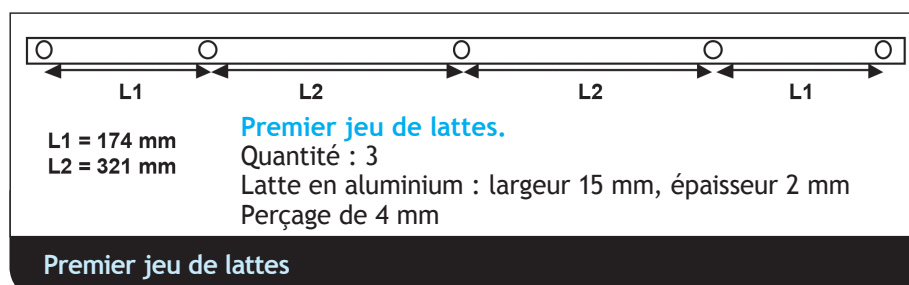


Figure 2 : repérage des jeux de lattes et des dimensions du maillage

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



La *Figure 2* représente la structure terminée avec le repérage des dimensions des mailles.

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.

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

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

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

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

Ensuite attacher les autres nœuds du maillage en rivetant, afin d'obtenir le maillage comme 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

Le rivetage n'est pas indispensable. On peut très bien n'utiliser que des vis et des écrous pour l'assemblage. 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 obtenue 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 avec une des trois lattes passant par le sommet du paraboloïde. Voir tableau en bas de page.

Erreur moyenne (mm) : -1,3
Erreur écart-type (mm) : 1,7
max (mm) : 1,2 min (mm) : -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 prévue est importante. Dans la réalité, nous pouvons affirmer que le réflecteur est utilisable jusqu'à 5,7 GHz.

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.

Ses principales qualités sont sa souplesse et sa légère élasticité.

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 4* illustre la décomposition de la surface de grillage.

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.

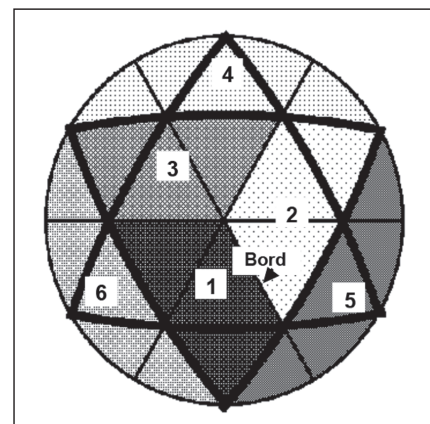


Figure 4 : découpage du grillage en secteurs

Ensuite, quelques secondes après, lorsqu'elle refroidit, elle se durcit et les deux grillages des deux secteurs sont alors parfaitement bien fixés.

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 trois 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

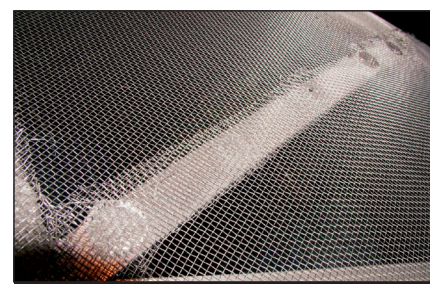


Figure 5 : détail d'un raccordement de grillage entre deux secteurs

et replier les deux autres bords du secteur 3 sur les lattes.

Idem ensuite avec les secteurs 4, 5 et 6.

Distance du centre (cm)	45	41,25	37,5	33,75	30	26,25	22,5	18,75	15	11,25	7,5	3,75	0
Hauteur Théorique (cm)	16,6	13,95	11,53	9,34	7,38	5,65	4,15	2,88	1,84	1,04	0,46	0,12	0
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	-1,5	-3,7	-3,6	-2,2	-1,5	-3,5	-1,2	-1,6	0,4	0,6	1,2	0

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 fixée 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. 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 d'ajuster finement la position de la source.

Voir Figure 7

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.

FIXATION ARRIÈRE DU RÉFLECTEUR

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

Des petites cales 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.

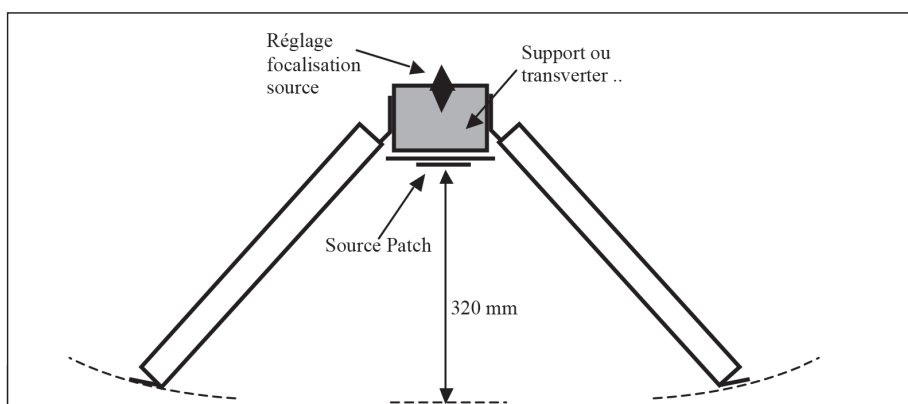


Figure 7 : positionnement de la source

Ainsi les écrous ne seront pas vissés à fond mais juste suffisamment pour que les cales reposent sur le bord de l'écuelle.

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

Le montage ne pose pas de difficulté particulière. Les deux tiges filetées en « U » des brides sont montées sur l'écuelle en perçant deux trous pour chacune d'elles. Attention à ne pas oublier de les monter avant de fixer l'écuelle sur le réflecteur ! Penser également à monter une contre-plaque pour rigidifier l'arrière.

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.



Figure 9 : fixation arrière du réflecteur

CONCLUSION

Nous venons de décrire ici le principe et l'intérêt du maillage géodésique dans la réalisation de réflecteurs paraboliques. L'antenne décrite ici est en principe utilisable jusqu'à 5,7 GHz et son gain, ses dimensions, sa facilité de réalisation et d'utilisation en font une antenne de choix pour le trafic sur les bandes centimétriques en trafic terrestre ou satellite.

LIENS

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

Pour me contacter : f4buc@orange.fr

Page de l'auteur consacrée : <http://urls.r-e-f.org/ee347vn>

