

PARABOLE A STRUCTURE GEODESIQUE

Matthieu CABELLIC F4BUC

Cet article présente un principe de fabrication original d'antenne parabolique inspiré de l'architecture géodésique. Il démontre l'intérêt du design qui réside dans la très grande facilité de fabrication tout en conservant une très bonne précision de surface.

Après une partie théorique suit un volet pratique avec la description d'une parabole de 90 cm de diamètre.

Le principe

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. C'est l'architecte américain Buckminster Fuller qui est le père de toutes ces structures géodésiques et de tout le courant de pensée correspondant. Son oeuvre la plus connue est la Biosphère à Montréal. C'est tout simplement extraordinaire de constater avec quelle simplicité et quelle légèreté il est possible d'obtenir de telles structures de dimensions aussi imposantes. Pour Buckminster Fuller "Avec presque rien, il est possible de faire presque tout" et le triangle était la forme de base idéale à toute construction.

L'OM japonais JA6XKQ a eu l'idée d'utiliser de telles structures à maillage géodésique afin de réaliser des réflecteurs paraboliques et des appliquer au monde amateur.

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.

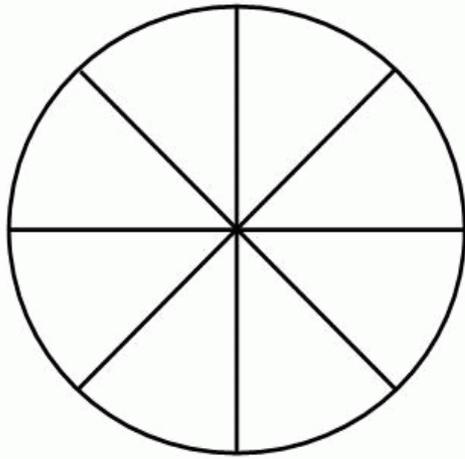
Mais qu'est ce qu'un maillage géodésique ?

Une géodésique est une courbe de longueur minimale tracée sur une surface reliant deux points de cette surface. Un maillage géodésique consiste à utiliser un faisceau de telles courbes de façon à la couvrir de façon homogène.

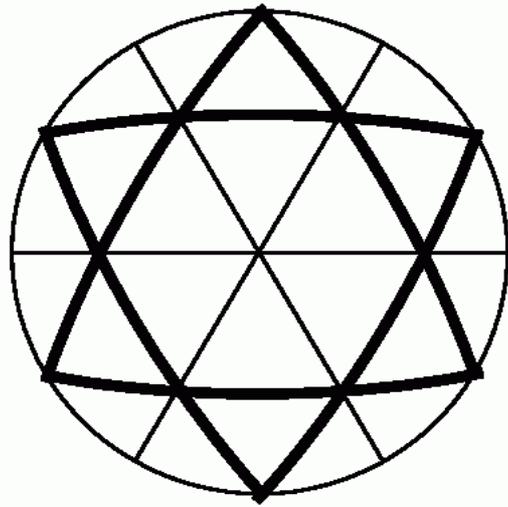
Un maillage favorable à la précision de surface

Pour garder de bonnes performances tout en montant 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 on considère que la précision nécessaire est de l'ordre de $\lambda/10$ au minimum et, mieux, de $\lambda/20$. Cependant, ces " $\lambda/20$ " renferment plus de subtilités que l'on peut le 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. Un paramètre important est la périodicité de l'erreur le long de l'axe du paraboloïde en s'éloignant du centre.

Le maillage géodésique à justement la propriété de couvrir de façon homogène la surface et ainsi la périodicité spatiale de l'erreur de surface se trouve réduite par rapport à d'autres structures employées, en particulier celles utilisant classiquement le maillage en étoile.



Maillage en étoile



Maillage géodésique

Une grande facilité de réalisation sans besoin d'ajustement

Les courbes géodésiques ont des propriétés mécaniques très intéressantes. Ce sont en particulier les courbes tracées sur la surface à courbure géodésique nulle : de façon imagée, ce sont les trajectoires d'observateurs se déplaçant sur la surface en marchant droit devant eux, ou de petites voitures dont la direction est bloquée en position rectiligne.

Cela a un impact très intéressant sur le plan technologique : en déroulant à partir d'un point A une latte de faible largeur par rapport à la courbure de la surface et rejoignant B à l'arrivée nous obtenons une géodésique entre A et B. Autrement dit nous obtenons les propriétés intéressantes suivantes :

- le maillage géodésique peut être réalisé à partir de lattes initialement plates, droites et souples
- la surface de la latte reste tangente à la surface
- aux points de croisement des mailles les lattes sont tangentes (elles s'appliquent l'une sur l'autre)

Nous voyons donc immédiatement l'intérêt du design :

- la réalisation se limite à un perçage et à un assemblage de lattes souples en profitant de leur élasticité naturelle. La forme parabolique naît d'elle-même au cours de l'assemblage !
- aucun ajustement n'est nécessaire. La précision de la surface est garantie par la précision du perçage des lattes.

Enfin, un autre point très important est la pose du grillage. C'est en général le plus pénible dans la réalisation des réflecteurs car fastidieux surtout lorsque le grillage est assez rigide et tend de se fait à gondoler. Avec le design géodésique nous réalisons une structure maillée qui permet la pose du grillage derrière le réflecteur. Le grillage se pose alors comme une peau que l'on peut étirer facilement et qui évite les faux plis.

Étude de l'erreur de surface

L'erreur de surface du réflecteur est un contributeur très important de l'efficacité globale de l'antenne, du même ordre que la contribution liée à l'illumination par la source (spill over, blocage etc..). L'erreur de surface notée δ_{rms} représente la valeur rms de l'erreur de surface définie comme la déviation par rapport au paraboloïde parfait. Ce paraboloïde parfait est celui qui approxime le mieux la surface réelle c'est à dire qui minimise l'erreur moyenne.

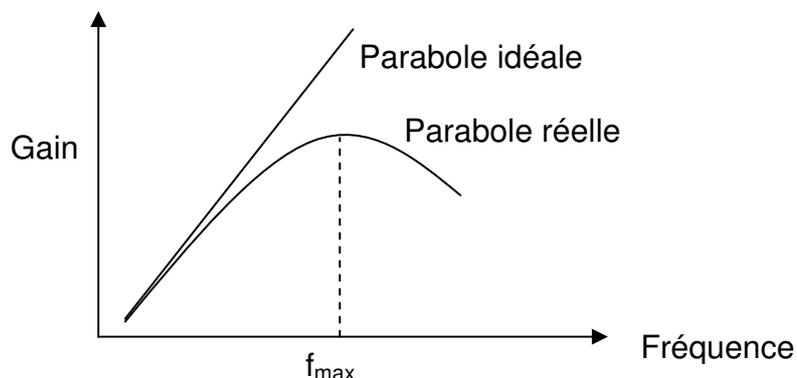
Pour un réflecteur imparfait, le gain va d'abord croître au carré de la fréquence puis atteindre un maximum pour ensuite diminuer à cause de l'imprécision de surface. La relation suivante donne la longueur d'onde du maximum de gain de l'antenne, pour un réflecteur ayant une erreur de surface δ_{rms} :

$$\lambda_{min} = 4.\pi.\delta_{rms}$$

$$f_{max} = \frac{2,39}{\delta_{rms}}$$

avec f_{max} en GHz et l'erreur rms en cm.

Exemple : pour une erreur δ_{rms} de 1 cm le maximum de gain se situe à $f_{max} = 2,4$ GHz



Bien entendu à cette fréquence la pénalité de gain est très importante. Il faut se fixer une pénalité de gain acceptable à la fréquence d'utilisation. Les différents graphes montrent qu'il est nécessaire de viser une erreur rms de $\lambda/20$ pour rester dans le dB de pénalité.

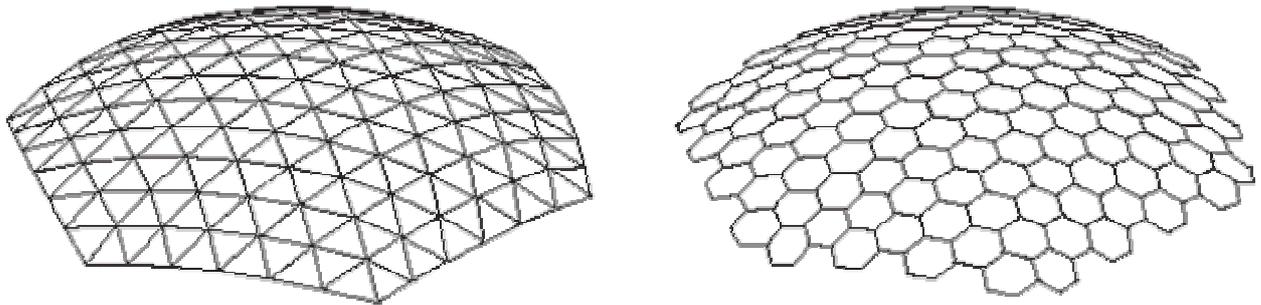
Dans ces conditions $f_{max} = 1,6 * f_{utile}$.

Exemple : $f_{utile} = 2,4$ GHz alors : $\delta_{rms} = 6$ mm et $f_{max} = 3,8$ GHz

Dans notre design géodésique, l'erreur de surface provient de la forme qu'épouse le grillage lorsqu'il est étiré sur cette structure géodésique. Plus précisément l'erreur est maximale au centre de chaque triangle du maillage et minimale sur les bords car nous savons que par construction les bords du triangle sont très proches de la surface parabolique.

Ce type d'erreur de surface est analogue aux erreurs dites de "facettage" c'est à dire aux erreurs systématiques qui sont causées par l'emploi d'un assemblage de facettes pour approcher une surface lisse.

Intéressons-nous aux erreurs de facettage sur une surface parabolique. Le dessin suivant illustre deux types de facettes possibles utilisées classiquement dans la réalisation des structures: un maillage à base de triangles et un maillage à base d'hexagones. A noter que ces maillages ne sont pas nécessairement géodésiques.



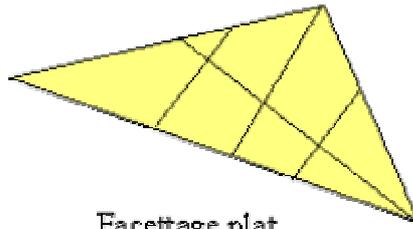
Deux formes de facettage

Des formules approchées de l'erreur RMS sont données dans la littérature. Elles se basent sur une approximation sphérique de la surface parabolique (sphère de rayon $2 \times$ focale). Cette approximation a été validée dans la pratique. Elles se basent aussi sur l'approximation de triangles équilatéraux ce qui est tout à fait raisonnable dans la pratique à partir d'une certaine finesse de maillage. A cet égard le maillage "JA6XKQ" est un peu "limite" sur cette approximation.

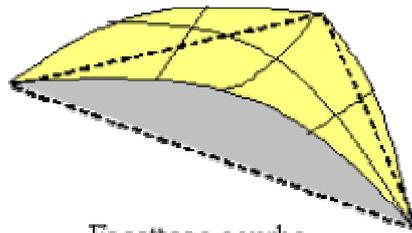
La formule suivante donne l'erreur rms pour un grillage reposant et tendu sur des triangles équilatéraux courbes dont les cotés ont un rayon de courbure de $2.F$ (dirigé vers l'axe du réflecteur ou encore vers le centre de la sphère modèle):

$$\frac{\epsilon_{rms}}{D} = 0,012 \cdot \frac{(l/D)^2}{(F/D)}$$

avec l la longueur d'un coté, D le diamètre du réflecteur, et F/D le rapport F/D du réflecteur.



Facettage plat



Facettage courbe

Ainsi la longueur minimale d'un arc géodésique formant un coté d'un triangle pour une erreur δ_{rms} donnée est :

$$\frac{l}{D} = 9,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{F}{D}\right) \left(\frac{\delta_{rms}}{D}\right)}$$

Cette formule permet donc de pré dimensionner la densité du maillage géodésique nécessaire pour une erreur de surface rms donnée, cette dernière dépendant de la pénalité de gain et de la fréquence d'utilisation recherchées comme exposé précédemment.

Exemple appliqué à la parabole de JA6XKQ de 90cm:

Recherchons une erreur rms de $\lambda/20$ à 2,4GHz soit 6mm. Le calcul donne:

D (m)	0,9
F/D	0,35
delta rms (m)	0,006
l (m)	0,395

Il faut donc des triangles géodésiques de coté maximal 395 mm. Si nous reprenons les cotes (voir plus loin dans l'article) nous voyons que le coté le plus long (L2) est de 320 mm. Ainsi $\lambda/20$ est acquis soit une dégradation de gain ne devant pas dépasser 0,7 dB théorique.

Comparaison avec le maillage classique en étoile

La formule approchée donnant l'erreur de surface rms pour une parabole conçue avec un maillage en étoile, c'est à dire le design classique des bras convergents (ou "parapluie") est :

$$\frac{\delta_{\text{rms},z}}{D} = 0.01076 \frac{(\ell/D)^2}{F/D}$$

avec ℓ l'écart entre deux bras successifs à la périphérie du réflecteur.

Cette formule peut intéresser les constructeurs de paraboles du design « classique ».

Il se calcul alors par :

$$\frac{\ell}{D} = 6.817 \sqrt{\frac{F}{D} \frac{\delta_{\text{rms},z}}{D}}$$

Reprenons l'exemple précédent. On aurait alors $\ell = 295$ mm ce qui représente environ 9 bras. Notre parabole géodésique présente donc la même erreur de surface qu'une parabole réalisée avec le design classique constitué de 9 bras.

L'effet des lattes sur la précision de surface

Technologiquement l'utilisation de lattes souples pour réaliser le maillage apporte certains effets parasites qui sont:

- l'effet de superposition des épaisseurs des lattes aux noeuds du maillage. Pour des lattes de 2mm d'épaisseur cela entraîne une épaisseur totale de 6mm soit une erreur de plus ou moins 3mm.

- la courbure élastique naturelle des lattes n'épouse pas parfaitement une forme parabolique.

Dans la réalité les erreurs ainsi engendrées sont mineures. Sur 2,4GHz elles représentent des erreurs de l'ordre de $\lambda/40$ à $\lambda/35$.

Réalisation d'une parabole géodésique de 90cm de diamètre

Après la théorie, place à la pratique !

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. Enfin pour une application satellite ce diamètre est parfait pour viser les satellites en orbite GTO (analogues à AO-40).

Le temps de réalisation n'excède pas un week-end, l'auteur l'a réalisée en une journée seulement et sans utiliser d'outillage spécifique.

La parabole 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**

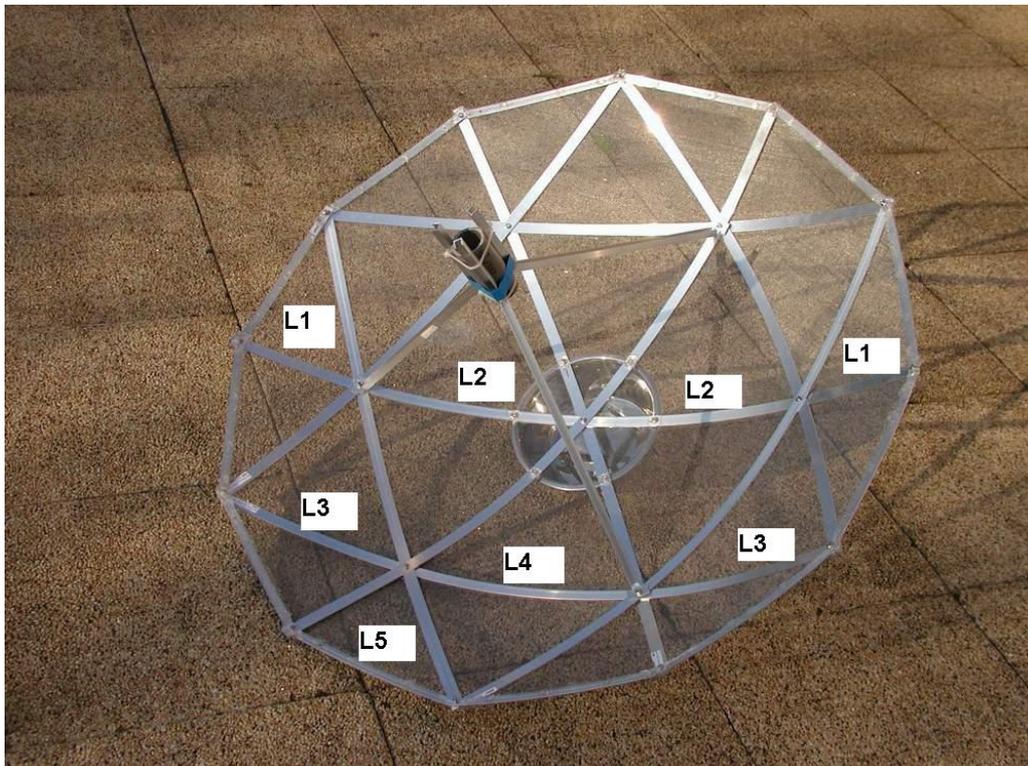
Réalisation du maillage géodésique

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.



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.

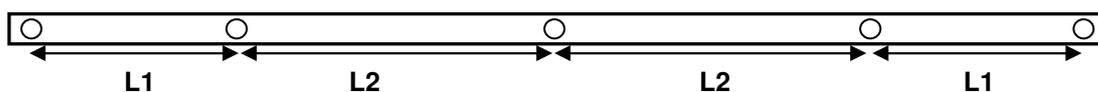
Pour garantir un bon résultat, il est nécessaire de percer en respectant rigoureusement les cotes indiquées.

Premier jeu de lattes.

Quantité : 3

Latte en aluminium : largeur 15mm, épaisseur 2mm

Trous de 4mm.



L1 = 174 mm

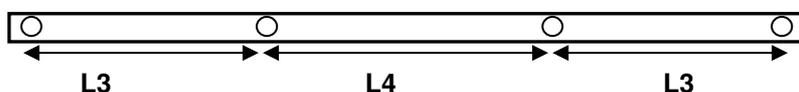
L2 = 321mm

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

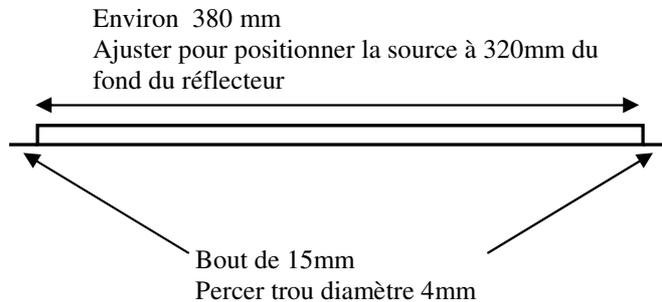
Trous de 4mm.



L5 = 237 mm

Supports de la source

Quantité : 3



Assemblage du maillage géodésique

Commencez 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. 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.

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 au fur et à mesure et voir la forme parabolique apparaître (par magie !).

Le maillage géodésique du réflecteur est terminé!

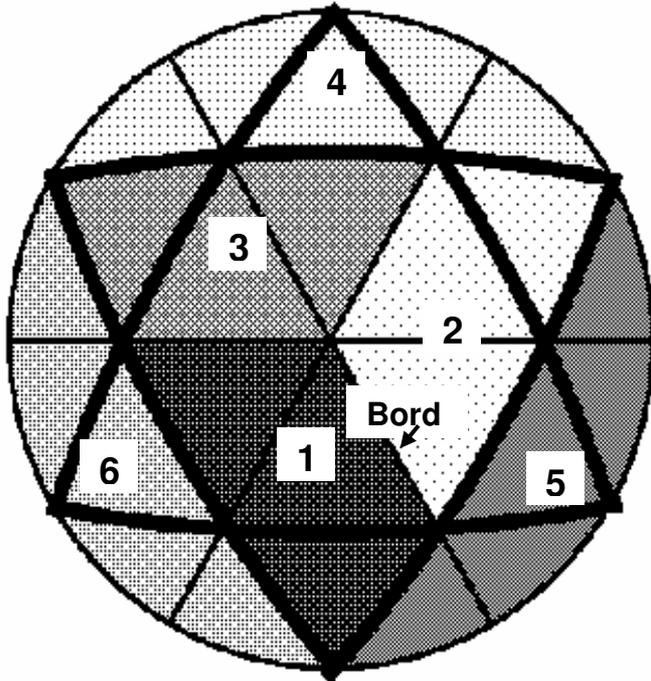
Pose du grillage

L'étape suivante consiste à poser le grillage sur la structure géodésique.

Le grillage utilisé pour le prototype est de la moustiquaire en aluminium. Ces principales qualités sont sa souplesse et sa capacité légèrement élastique. Il est facile à découper à la paire de ciseaux.

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.



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 imprègne bien les mailles du grillage. Quelques secondes après, lorsqu'elle refroidit et se durcit, 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.



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.

Support de la source

Les bras supports de la source

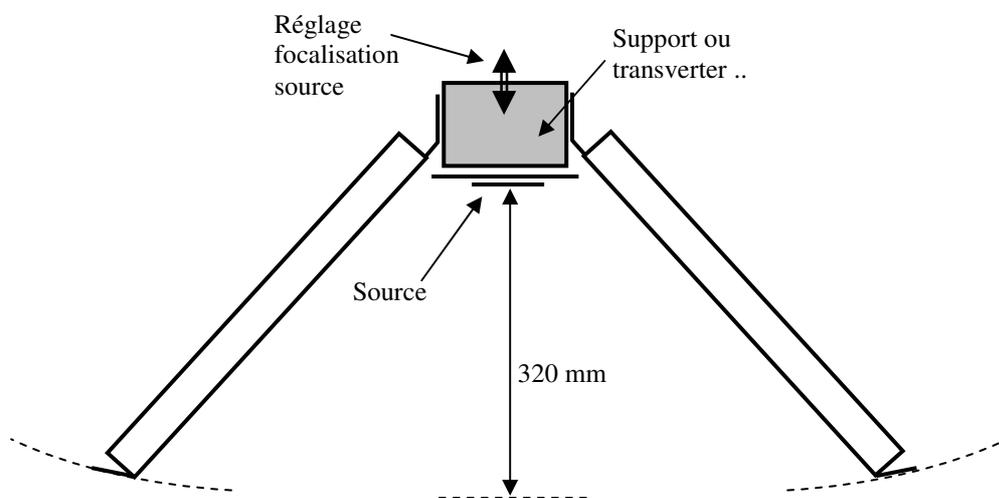
Couder les extrémités des trois bras supports de la source et les attacher aux nœuds du maillage correspondant. La photo suivante montre l'assemblage.



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.



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 en position verticale.



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

Fixation arrière du réflecteur

La fixation de l'antenne 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 les points de perçages correspondant sur les lattes.



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 amplificateur, un relais coaxial etc...

Conclusion

Nous venons d'exposer dans cet article le principe et l'intérêt du maillage géodésique dans la réalisation de réflecteurs paraboliques. De telles antennes sont très simples à réaliser, elles ne demandent pas d'expérience particulière en mécanique et sont réalisables en une journée. De plus leurs performances sont très bonnes.

J'ai déjà eu l'occasion de l'utiliser avec succès pour de la réception ATV de ballon et du trafic satellite.

Une grande sœur de 1m80 a vu le jour et est utilisée avec grand succès en contest sur 1296 MHz. Pour la description et des photos, se rendre sur mon site web : http://f4buc.chez-alice.fr/prototype_1m80.htm

Bonne réalisation et bons QSO

Matthieu CABELLIC

F4BUC

Email: f4buc@aliceadsl.fr

Liens

- Site Internet de F4BUC contenant des descriptions complémentaires: http://f4buc.chez-alice.fr/parabole_geodesique2.htm
- Site Internet de JA6XKQ (en Japonais): <http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/>