

1. Préambule

La bande 2300 à 2450 MHz est allouée en partie aux communications radioamateur. (Plan de bande : voir <http://tinyurl.com/zvvgf8s>)

Le système d'antenne décrit dans ce document permet son exploitation dans cette bande.

Comment assembler mécaniquement et radio-électriquement les quatre antennes hélice pour obtenir un résultat efficace ? Vous trouverez ci-après ces recommandations et explications.

Système d'antennes 4 fois 40 spires polarisation circulaire droite (C.D.) @~2,35GHz de chez Wimo.

(http://www.wimo.com/helix-antennas_e.html)

Gain : 16dB (annoncé) ~20dB recalculéⁱ

Angle d'ouverture : ~18° (calculé) :

<https://jcoppens.com/ant/helix/calc.en.php>

Pour l'émission et la réception en polarisation circulaire droite de 2,3 à 2,45GHz, ce type d'antenne à gain élevé est très bien adapté.



Figure 1 Système d'antennes 4 fois 40 spires C.D. @2,35GHz

Prise au vent relativement faible et large bande.

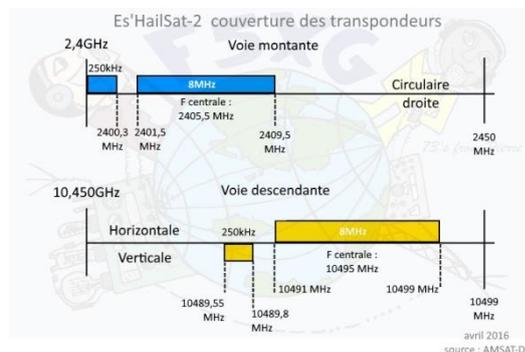


Figure 2 Plan des bandes Es'HailSat2

Le futur satellite géostationnaire Es'HailSat2 qui sera bientôt mis à poste en début d'année 2017 utilisera pour la voie montante la bande 2,4GHz.

Le programme ARISS utilise en DATV la voie descendante en ~2,35GHz.

2. Description

2.1. Assemblage mécanique (superposition)

Il y a une distance critique à respecter entre chaque antenne, pour que leurs lobes de rayonnement n'interfèrent pas entre eux.

DL6WU (entre autres) a décrit le principe d'empilage (*Ang. :stacking*) d'antennes en donnant cette formule :

$$D_{(m)} = \frac{\lambda_{(m)}}{\left(2 * \sin\left(\frac{BW_{(^\circ)}}{2}\right)\right)} \quad (1)$$

$D_{(m)}$ = distance de superposition, verticale or horizontale

$\lambda_{(m)}$ = longueur d'onde en mètres

$BW_{(^\circ)}$ = angle d'ouverture de l'antenne Yagi à -3dB.

Voir : <http://tinyurl.com/74m7xa8>

W1JR après ses essais et expériences a déterminé cette formule :

$$D_{(\text{longueur d'onde})} = \frac{51}{BW_{(^\circ)}} \quad (2)$$

$D_{(\text{longueur d'onde})}$ = distance de superposition en longueur d'onde, verticale or horizontale

$BW_{(^\circ)}$ = angle d'ouverture de l'antenne Yagi à -3dB.

D'autres donnent pour $D_{(m)}$, les deux tiers de la longueur du boom de l'antenne ... ? (3)

En cherchant sur la toile : http://www.g6lvb.com/quadruple_helix.htm l'auteur de cet article a lui utilisé sur des données de OZ1MY « Helix separation 1.8 wavelengths, 225mm between centres. »

Que faire ? Sachant que la littérature ci-dessus s'applique à des antennes Yagi et que pratiquement rien n'est publié sur des empilages d'antennes hélices !

Il nous faut donc vérifier en réalisant un assemblage mécanique réel en partant tout de même des travaux de nos prédécesseurs.

2.2. Mise en phase

2.2.1. Les câbles de liaison

Pour un bon résultat, il est impératif que les longueurs « hors-tout » des câbles de couplage soient exactement identiques (au mm près !!) et que leur câble constitutif provienne du même rouleau.

L'idéal (sans que cela soit une obligation) étant que leur longueur physique soit un multiple de demi-longueurs d'onde électrique, c.à.d.

$$\frac{\lambda}{2} \text{ physique}_{(m)} = \frac{\lambda}{2} = \frac{300}{2 * F_{(MHz)}}$$

$$\frac{\lambda}{2} \text{ électrique}_{(m)} = \frac{\lambda}{2} * \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{300}{2 * F_{(MHz)}} * \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

ϵ_r = permittivité du diélectriqueⁱⁱ de l'isolant du câble

Exemple : polyéthylène $\epsilon_r = 2,25$

Coefficient de vitesseⁱⁱⁱ = $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{2,25}} = \frac{1}{1,5} = 0,6667$

$$\frac{\lambda}{2} \text{ électrique}_{(m)} = \frac{300}{2 * F_{(MHz)}} * 0,6667 = \frac{300}{2 * 2350} * 0,6667 = 0,426m$$

J'ai utilisé du RG213/U et la longueur de chaque câble de liaison avec ses connecteurs $N_{\text{mâle}}$ est de 465mm.

Ce n'est pas parce que le câble est professionnel et marqué « MIL RG213/U » que le coefficient de vitesse sera identique si vous utilisez deux câbles de constructeurs différents, il est quasi certain que la phase du signal en sera altérée.

Si vous disposez d'un analyseur vectoriel avec mesure de phase, vérifiez...

En tenant compte du coefficient de vitesse du câble de 0,66 ; un millimètre égale $\cong 1,9$ degré!

2.2.2. Positionnement physique des antennes

Chaque antenne possède un sens (on pourrait dire une polarité...) il faut respecter les phases.

Il faut que le positionnement de phase de chaque antenne soit respecté, tous les " + " ensemble et les " - " ensemble.

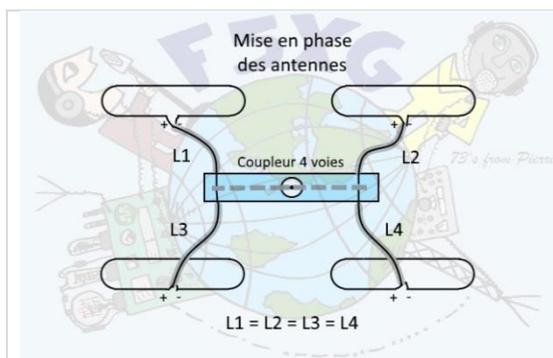


Figure 3 Mise en phase de 4 antennes Yagi

Les câbles de raccordement L1 à L4 proviennent du même rouleau.

Les longueurs de câble doivent être exactement identiques (au mm près !!).

Le coupleur est décrit dans les paragraphes suivants.

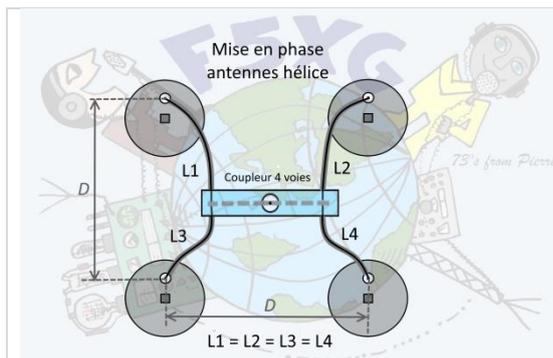


Figure 4 Mise en phase de 4 antennes hélice

Les câbles de raccordement L1 à L4 proviennent du même rouleau.

Les longueurs de câble doivent être exactement identiques (au mm près !!).

La distance D est explicitée au paragraphe [Calculs](#)
Le coupleur est décrit dans les paragraphes suivants.

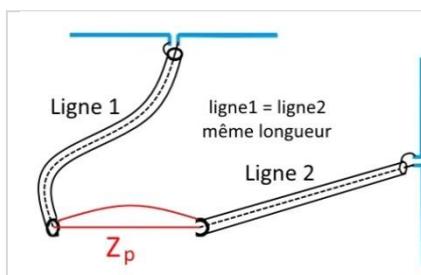
2.2.3. Couplage des antennes

Le fait de mettre en parallèle quatre impédances identiques de 50Ω , équivaut à une impédance de :

$$\boxed{50/4 = 12,5\Omega}$$

Il est plus facile de réaliser un coupleur deux fois deux entrées 50Ω .

Dans ce cas deux impédances identiques de 50Ω en parallèle, équivalent à une impédance de : $\frac{50}{2} = 25\Omega$



L'impédance de deux antennes en parallèle Z_p équivaut à :
 $Z_p = \frac{Z_0}{2} = \frac{50}{2} = 25\Omega$, à leur fréquence identique de résonance.

Les deux lignes de couplage doivent être exactement de même longueur constituées du même type de câble d'impédance égale à Z_0 .

Au point de liaison des deux antennes l'impédance Z_p est de 25Ω .

Il faut rétablir une impédance de valeur égale à celle de la ligne de transmission $Z_0 = 50\Omega$.

La ligne quart-d'onde électrique a la particularité de transformer l'impédance suivant le rapport :

$$Z_{\lambda/4} = \sqrt{Z_p * Z_0}$$

- $Z_{\lambda/4}$ = impédance du $\frac{1}{4}$ d'onde
- Z_p = impédance au point de raccordement des antennes
- Z_0 = impédance de la ligne

A l'aide du logiciel gratuit AppCad Design Assistant nous déterminons un côté de ce coupleur : (<http://www.avagotech.com/appcad>)

Un carré alu de 20 mm a une cote intérieure de 16,5mm, un rond de 10mm conviendra parfaitement.

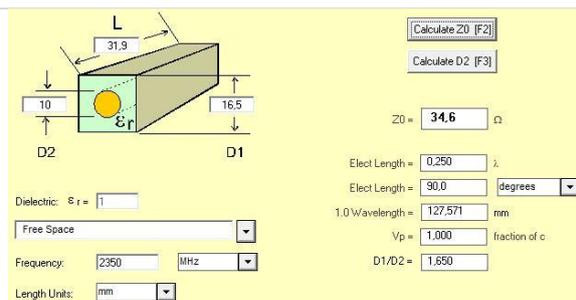


Figure 5 Ligne quart d'onde 2,35GHz - ~35Ω

Néanmoins j'ai utilisé un coupleur quatre voies de chez Wimo nommé chez eux Diviseur de puissance code 18097 13cm (2.4GHz), n'ayant pas de temps pour réaliser moi-même ledit coupleur.

2.3. Calculs

Pour une fréquence de 2350MHz $\lambda_{(m)} \cong 0,128m$

La formule (1) ci-dessus nous donne:

$$D_{(m)} = \frac{0,128}{\left(2 * \sin\left(\frac{18^\circ}{2}\right)\right)} = \frac{0,128}{0,313} = 0,408m$$

La formule (2) ci-dessus nous donne :

$$D_{(\text{longueur d'onde})} = \frac{51}{18^\circ} = 2,833, \text{ soit :}$$

$$D_{(m)} = D_{(\text{longueur d'onde})} * \lambda_{(m)} = 2,833 * 0,128 = 0,362m$$

Et par ex. si l'on prend $\frac{2 * \text{longueur du boom de l'antenne}}{3} = \frac{2 * 1,05}{3} = 0,7m !!$

2.4. Assemblage mécanique

2.4.1. Assemblage _1

J'ai commencé en prenant plus long : 430mm = 0,43m.

Voir la Figure 6 ci-dessous.

Les résultats ont été mauvais, en fait pas de gain lors de l'assemblage ; perte de 10dB ?

Je vous passe les efforts mis en œuvre, ... tout cela pour en arriver à la conclusion de tout refaire mécaniquement.

J'ai déposé le support en « H » à 733mm et le bras correspondant ([Premier montage](#)) .

J'ai refait l'essai avec seulement deux antennes et un coupleur 2*100Ω que j'ai réalisé il y a plusieurs années : (voir : <http://f5xg.jimdo.com/antennes/coupleurs-d-antennes/deux-voies-2-35ghz/>)

Bingo : bons résultats ~2,8 dB de gain par rapport à une seule antenne et distance optimale entre les antennes de ~400mm.

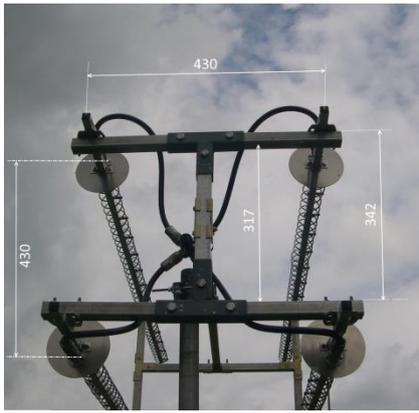


Figure 6 Cotes du support du 1^{er} montage

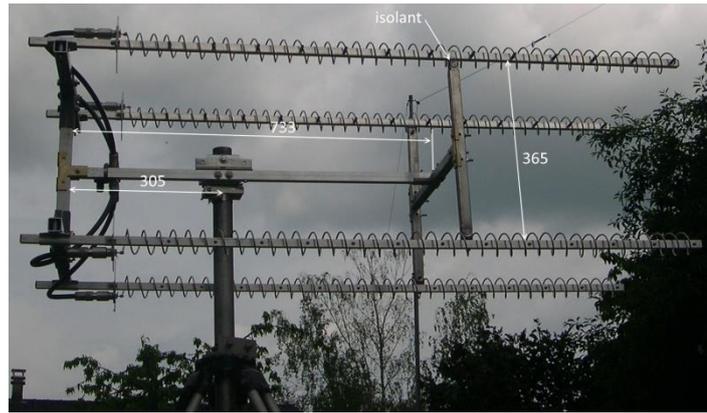


Figure 7 Premier montage

Voir paragraphe suivant les [modifications](#).

2.4.2. Assemblage _2



Figure 8 Assemblage final vue 1



Figure 9 Assemblage final vue 2

Les cotes d'assemblage sont restées identiques (voir [Cotes du support](#)).

La fixation sur le mât se fait par l'arrière du « H » par une bride récupérée sur une antenne hélice.

3. Le montage tel que montrent ces photos, n'est pas bon, les antennes « louchent », car les centres des antennes ne sont pas respectés. (voir § Optimisation et résultat final

)

4. Mesures

Il est nécessaire de disposer d'une source délivrant suffisamment d'énergie (de puissance) pour pouvoir juger de l'efficacité de notre réalisation.

L'affaiblissement (perte) d'espace α_{dB} est donné par l'équation suivante :

$$\alpha_{dB} = 20 \log_{(10)} \left(4 * \pi \frac{D_{(m)}}{\lambda_{(m)}} \right) = 20 \log_{10} \left(4 * \pi \frac{D_{(m)} * F_{(MHZ)}}{300} \right) = 22dB + 20 \log_{10} \left(\frac{D_{(m)} * F_{(MHZ)}}{300} \right)$$

Si nous avons une distance de 15m entre l'antenne source et celle de réception, la perte d'espace sera de

$$22dB + 20 \log_{10} \left(\frac{D_{(m)} * F_{(MHZ)}}{300} \right) = 22 + 20 \log_{10} \left(\frac{15 * 2350}{300} \right) = 22 + 20 \log_{10} (117,5) = 22 + 41,4 = 63,4dB$$

Plus de soixante-trois décibels !!

Un watt équivaut à 1000 mW soit +30dBm.

Un préamplificateur de ~20dB est inséré après l'antenne, et il faut tenir compte des pertes supplémentaires des câbles de liaison source-antenne émission, et antenne sous test- préamplificateur.

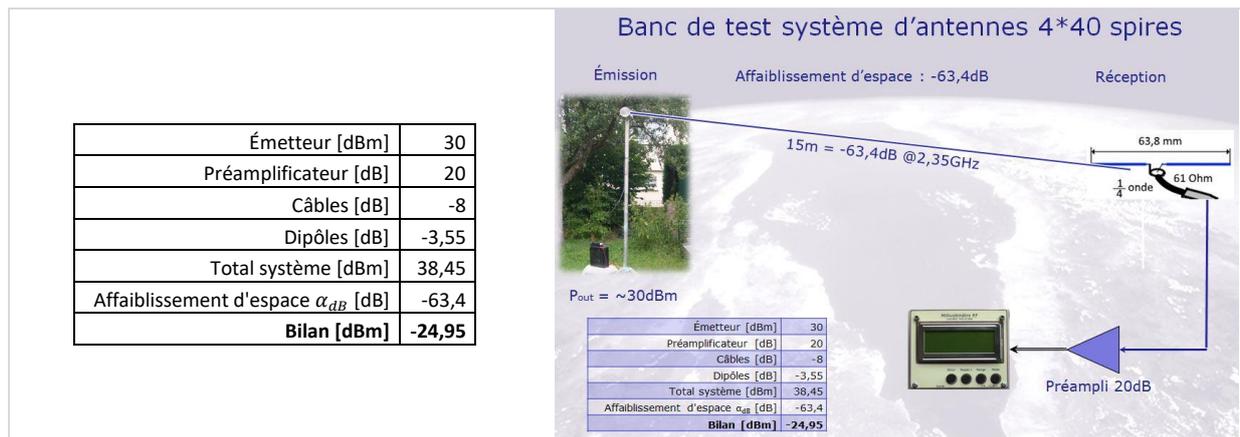
Un détecteur RF type ADL5903 de chez Analog Devices peut mesurer jusqu'à -40dBm.

Je ne dispose que du milliwattmètre : <http://f5xg.jimdo.com/mesure/milliwattm%C3%A8tre/> dont la sensibilité minimum est de -30dBm.

Pour éviter d'être perturbé par les réseaux WiFi ou WLAN environnants, j'ai utilisé un émetteur ATV porteuse pure à 2,337GHz.

J'ai inséré un filtre monocanal @ 2,337GHz voir <http://f5xg.jimdo.com/filtres/interdigital-1-2-2-3ghz/>, et relevé les niveaux.

Ensuite j'ai déposé ce filtre : pas de changement ni de perturbations.



Bilan de liaison : -24,95 dBm

Je dispose du minimum pour effectuer des relevés de mesure :

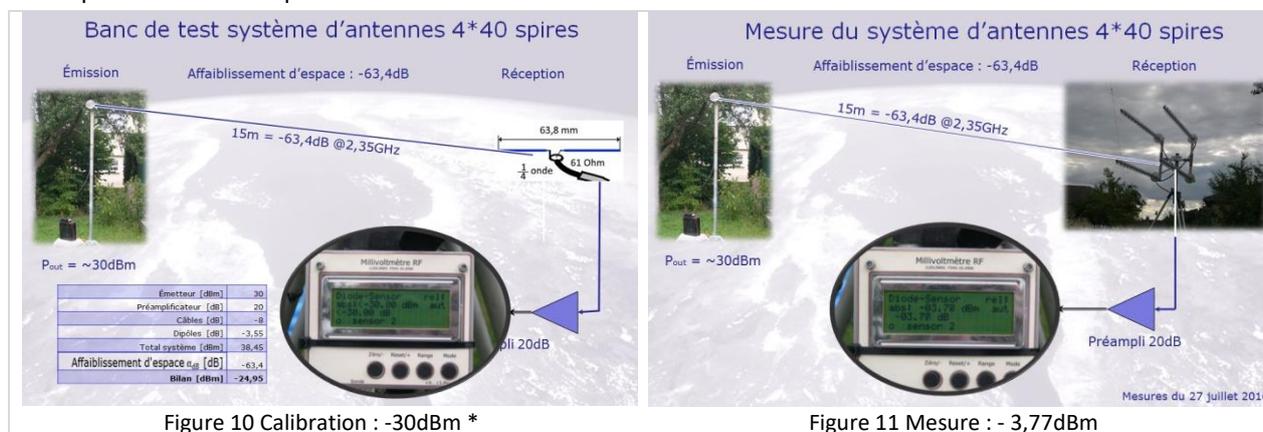


Figure 10 Calibration : -30dBm *

Figure 11 Mesure : - 3,77dBm

5. Résultats

Le gain en puissance lors de l'association, du couplage en phase de (n) éléments actifs (amplificateurs par ex.) dont les gains sont identiques est donné par la formule:

$$G_{(dB)} = 10 * \log_{10}(n)$$

Nous avons (n) = 4, donc le gain théorique devrait être de

$$G_{(dB)} = 10 * \log_{10}(4) = 6dB$$

Il n'est jamais atteint du fait des pertes inévitables dues :

- Aux connecteurs
- Au coupleur
- Aux câbles de liaison
- Erreurs de phases
- Imperfections mécaniques
- Etc.

On considère par expérience que 2,5 à 2,8dB est un bon résultat pour deux systèmes couplés, nous avons donc un système à 2 x 2 ensembles donc 5 à 5,6dB sera un bon résultat.

On peut calculer le gain du système par rapport au doublet :

Gain de l'antenne hélice Wimo Code 18029	20dBi	17,85	dBd
Gain de couplage		5,6	dB
Gain total calculé par rapport au dipôle		23,45	dB

Si l'on relève les mesures réelles effectuées

Calibration du système	-26,5	dBm	* la sensibilité du milliwattmètre réelle à 2,35GHz est de -26,5 dBm (erreur de calibration)
Mesure	-3,77	dBm	
Gain total <u>mesuré</u> par rapport au dipôle	-22,73		

On peut considérer que le système est efficace.

Mais pas optimal du tout !

Les antennes « louchent », car les centres des antennes ne sont pas respectés.

Il me reste encore à optimiser les distances de couplage pour optimiser ce système.

6. Optimisation et résultat final

J'ai refait le système de fixation en H, suivant les cotes de la Figure 12.

A partir des précédents essais je suis arrivé à une distance efficace (pour ne pas être pédant et dire « optimale ») de 429mm entre chaque point d'alimentation d'antenne.

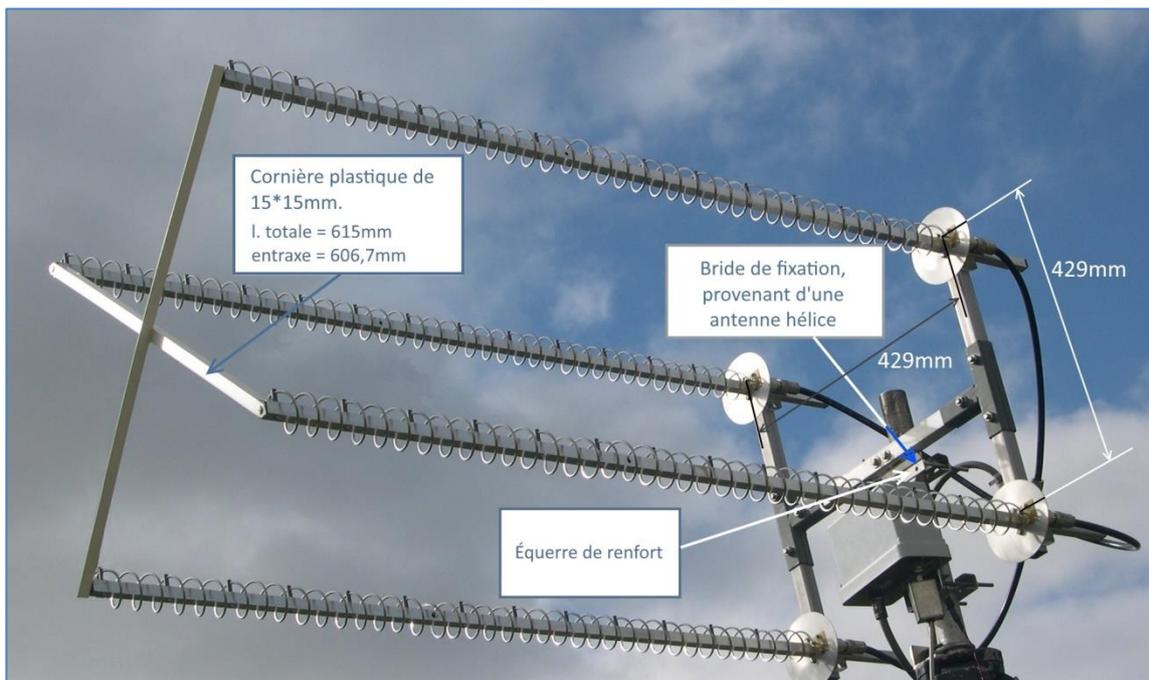
Donc de centre à de centre chaque embase N.

Là cela fonctionne correctement !

Astuce de positionnement mettre en appui le réflecteur sur la bride en U :



Détails de finition :



Mesure finales du système d'antennes 4*40 spires

Émission C.D. 5 spires Affaiblissement d'espace : -63,4dB Réception

15m = -63,4dB @2,35GHz

Pout = ~30dBm

Mesure sur dipôle de référence [dBm]	-26
Correction entre CD et orthogonal [dB]	3
Mesure de référence corrigée [dBm]	-23
Mesure sur 4*40 spires [dBm]	2,85
Gain système [dB]	25,85

Millivoltmètre RF

Préampli 20dB

Mesures du 6 octobre 2016

Les mesures définitives réalisées le 6 octobre 2016, sont extrêmement bonnes... il y a plus de gain que donné par calcul, si l'on prend le gain annoncé par WIMO (16dB).

Les mesures réelles confirment que le gain de chaque antenne est de ~20dB qui sont donnés par calcul.

Le gain du système est de l'ordre de 26dB. Un deuxième ensemble est en cours de réalisation et je réaliserai une autre campagne de mesure avec une re-calibration en laboratoire d'un nouveau milliwattmètre.

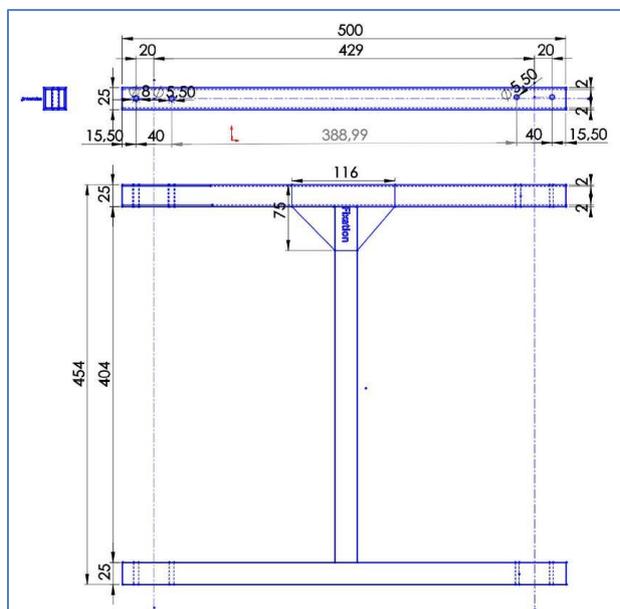


Figure 12 cotes définitives du « H »

Le H de fixation est réalisé en tube carré en aluminium de 25.

Les dimensions ci-contre sont suffisamment précises pour la réalisation.

Noter les entretoises intérieures dans les tubes carrés afin d'éviter l'écrasement lors du serrage des fixations des carrés de maintien des antennes.

Toute la visserie sera en inox.

Mesures réalisées :

Mesure sur dipôle de référence [dBm]	-26
Correction entre CD et orthogonale [dB]	3
Mesure de référence corrigée [dBm]	-23
Mesure sur 4*40 spires [dBm]	2,85
Gain système [dB]	25,85

Ce système a été développé parce que pour notre installation pour la réception en DATV de ARISS, la prise au vent est bien plus faible qu'une parabole pleine de 1m20.

Pour mémoire le gain d'une parabole ayant une efficacité de 55% est de 24,66dBd ... à comparer avec les résultats et réserves ci-dessus.

Bonne réalisation si vous vous lancez dans ce montage.

73 de F5XG

Pierre

Pierre Marie GAYRAL

M l. : f5xg@free.fr

<http://f5xg.jimdo.com>

ⁱ <http://www.designworldonline.com/calculators/helical-antenna-calculator/>

ⁱⁱ http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_7.pdf

ⁱⁱⁱ <http://www.ta-formation.com/acrobat/reflectometrie.pdf>