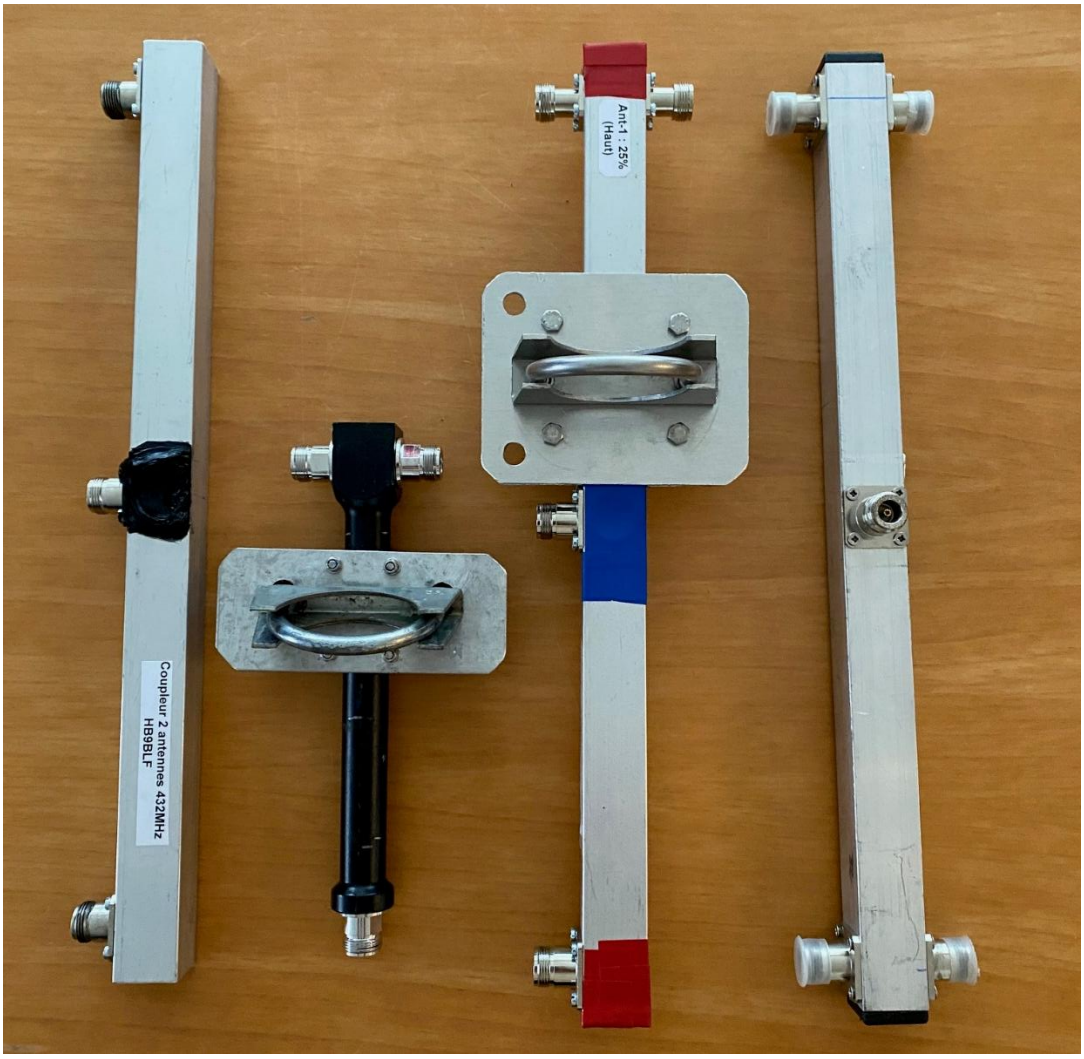
Index de révision	Date	Description des changements	Pages concernées
V1.0	09/01/2026	Version initiale	Toutes

Table des matières.

1. Introduction
2. Un peu de théorie
3. Réalisation d'un coupleur maison pour 2 antennes sur 432MHz
4. Coupleur pour 4 antennes 432MHz
5. Coupleur pour 3 antennes 432MHz
6. Résultats de mesure
7. Antenne 20EL et groupements de 2x, 3x et 4x 20 éléments
8. Conclusions



1. Introduction

J'ai montré au dernier stamm de la SUNe la réalisation de quelques coupleurs d'antennes pour la bande 432MHz. Ces coupleurs servent à répartir le signal HF entre les antennes d'un groupement de 2, 3 ou 4 antennes (ou plus). Ils peuvent être réalisés avec des lignes de transmission ou des selfs et condensateurs. Sur les fréquences VHF-UHF on utilise généralement des lignes de transmission.

Après une partie théorique, des exemples seront décrits en détail avec des coupleurs pour 2, puis pour 3 et enfin pour 4 antennes.

2. Un peu de théorie

La ligne de transmission sert à faire passer les ondes radio entre l'émetteur-récepteur et l'antenne. Une ligne de transmission bifilaire ou coaxiale est caractérisée par son impédance $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ [Ω]

Dans ce rapport, L est l'inductance de la ligne par unité de longueur et C est la capacité entre les 2 conducteurs de la ligne par unité de longueur.

Pour relier la station radio à l'antenne, on utilise couramment (en tout cas en VHF et UHF) une ligne coaxiale d'impédance $Z_0 = 50\Omega$. L'impédance de l'antenne doit en principe être égale à celle de la ligne de transmission pour que toute l'énergie envoyée par le TX soit absorbée par l'antenne. Si ce n'est pas le cas, alors une partie de l'énergie arrivant à l'antenne est renvoyée (réfléchie) en direction du TX. On a alors dans la ligne ce que l'on appelle des ondes stationnaires avec des maximas et des minimas de tension.

En ondes courtes, il est admis que l'on peut travailler jusqu'à un SWR=3,0 ; à cette valeur, le quart de la puissance arrivant à l'antenne est réfléchie en direction du TX. Cela correspond à la moitié de la tension incidente. On a alors le long de la ligne des minimas de tension à 0,5 fois la valeur nominale et des maximas de tension à 1,5 fois la valeur nominale. Le rapport entre les deux vaut SWR=1,5/0,5=3,0

Une ligne de transmission peut être utilisée comme transformateur d'impédance.

Pour passer d'une impédance de charge Z1 à une impédance Z2 différente, on peut utiliser une ligne de transmission de longueur électrique « quart d'onde » λ/4 et d'impédance $Z_0 = \sqrt{Z_1 * Z_2}$. Le schéma est donné à la figure 1.

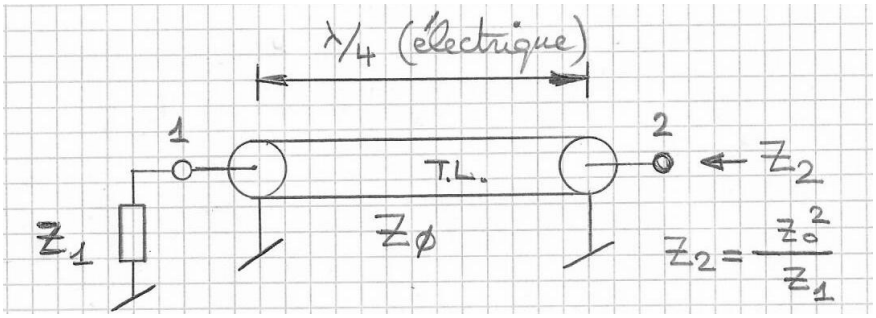


Fig. 1 : transformation d'impédance à l'aide d'une ligne de transmission λ/4

La longueur de ligne λ/4 « électrique » vaut $l = \frac{1}{4} * \frac{C}{F} * V_f$

- $C = 3 * 10^8$ [Mètres/secondes] est la vitesse de la lumière
- F est la fréquence en Hertz
- $V_f \leq 1$ Est le facteur de vitesse (Velocity factor). Il dépend du type d'isolation dans la ligne de transmission.

Le facteur de vitesse est le rapport entre la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans la ligne de transmission et la vitesse de la lumière. Si l'isolant est de l'air, alors $V_f = 1$

Sur le tableau suivant, quelques paramètres pour des câbles coaxiaux utilisés couramment par les radioamateurs.

Câble coaxial, type	Atténuation [dB/100m]		Facteur de vitesse V_f	Usage courant
	144MHz	432MHz		
RG-213	8,4	15,8	0,66	Ondes courtes
Ecoflex-10	4,66	8,46	0,85	VHF-UHF
Ultraflex-10	4,7	8,6	0,83	VHF-UHF

L'UltraFlex est mentionné car il est un peu meilleur marché que l'Ecoflex. On voit que si on veut faire une ligne de longueur λ/4 avec un câble coaxial, il faut le faire plus court pour tenir compte du facteur de vitesse.

A la page suivante nous avons 2 schémas différents pour réaliser un coupleur à 2 antennes.

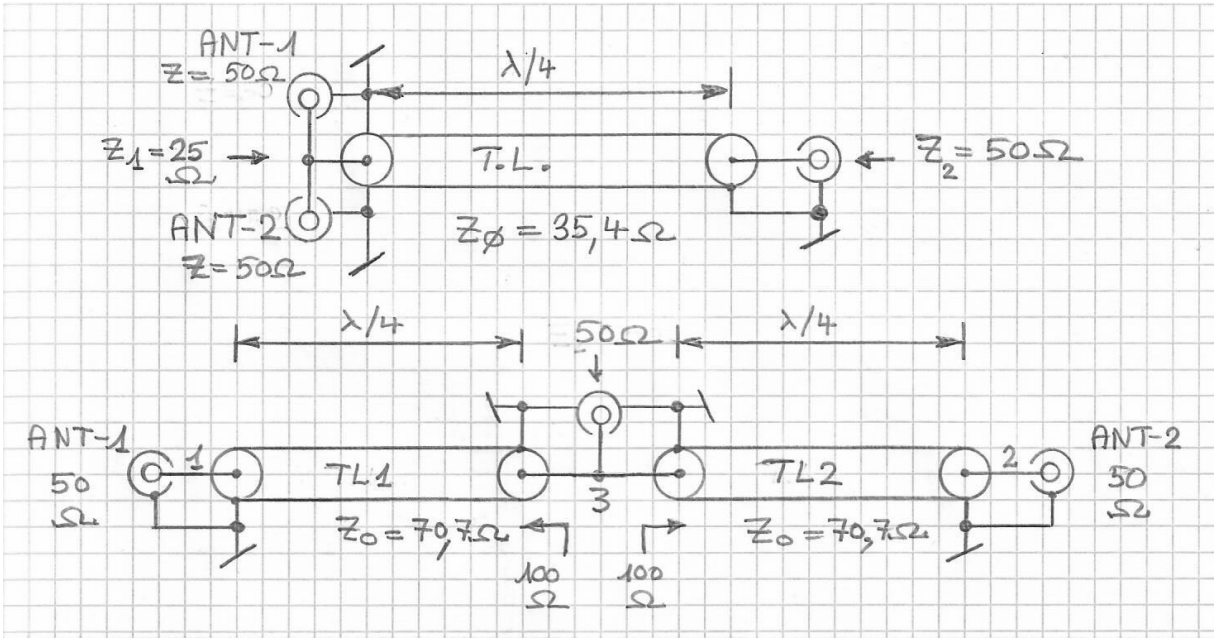


Fig. 2 : Coupleurs à 2 antennes

Le schéma du haut de la figure 2 correspond au coupleur du haut à la figure 3. C'est un coupleur à 2 antennes pour la bande 432MHz. Il a été acheté chez WiMo.
Les 2 antennes sont connectées en parallèle à gauche de la ligne de transmission ;
L'impédance de charge à ce point vaut $Z_1 = 50/2 = 25\Omega$
Cette impédance est transformée sur $Z_2 = 50\Omega$ à droite par une ligne de transmission λ/4 d'impédance $Z_0 = \sqrt{25 * 50} = 35{,}4\Omega$

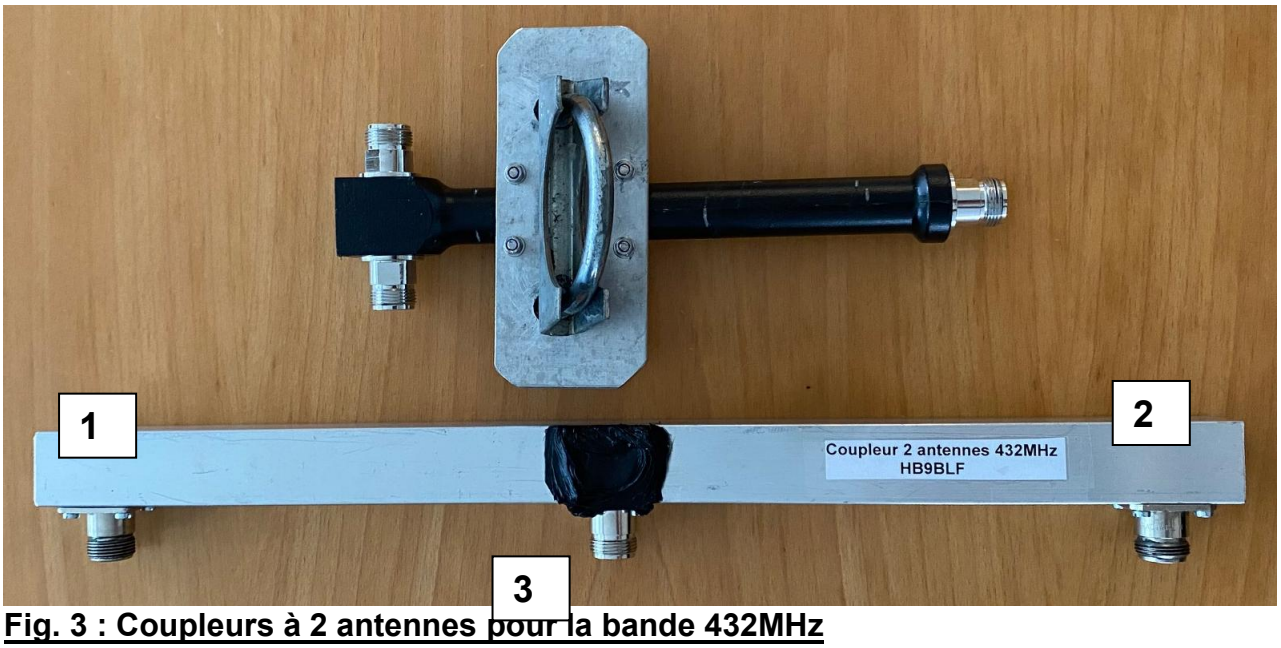


Fig. 3 : Coupleurs à 2 antennes pour la bande 432MHz

Le coupleur du bas de la figure 3 est un coupleur de construction « maison » pour 2 antennes sur 432MHz.

Sur le schéma du bas à la figure 2 vous voyez 2 lignes de transmission d'impédance Z_0 qui relient chaque antenne au point d'alimentation central.

- La ligne TL1 transforme l'impédance de 50Ω (au point 1) de l'antenne 1 sur une valeur valant 100Ω au point 3. La ligne TL1 doit alors avoir une impédance valant $Z_0 = \sqrt{100 * 50} = 70{,}7\Omega$
- La ligne TL2 fait la même chose avec l'impédance de l'antenne 2. La ligne TL2 a alors la même caractéristique que TL1 avec $Z_0 = 70{,}7\Omega$
- Au milieu (point 3) les 2 impédances de 100Ω se retrouvent en parallèle. L'impédance au point milieu vaut alors $Z_3 = 100/2 = 50\Omega$

3. Réalisation d'un coupleur « maison » pour 2 antennes sur 432MHz

Le coupleur « maison » pour 2 antennes a été réalisé avec un tube alu carré de dimension 25x25mm extérieur et de 2mm de paroi. La dimension intérieure est alors de 21x21mm. Ce tube va bien pour y installer des prises « N » pour châssis à 4 vis. Les prises sont fixées par des vis M3 dans des trous taraudés dans l'alu (ne pas serrer trop fort car la paroi ne fait que 2mm d'épaisseur…).

L'isolant étant de l'air, le coefficient de vitesse vaut 1. La distance centre à centre entre les prises 1 et 3 de même que celle entre les prises 2 et 3 vaut :

$$D = \frac{1}{4} * \frac{C}{F} = \frac{1}{4} * \frac{300 * 10^6}{432 * 10^6} = 173mm$$

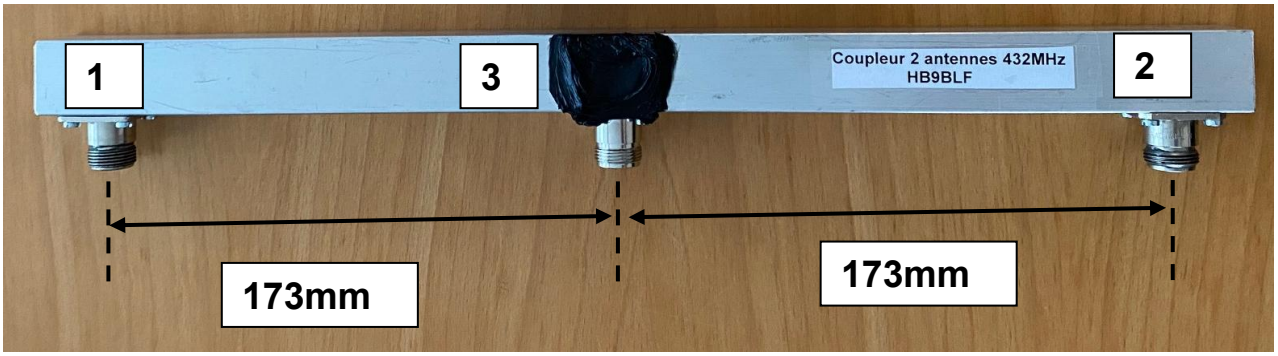


Fig. 4 : Coupleur maison à 2 antennes 432MHz

Note : la bulle noire masque le trou nécessaire pour pouvoir souder la fiche N centrale au tube de 6mm.

Réalisation des lignes de transmission

J'avais acheté un coupleur pour 4 antennes 432MHz de chez « Innovantennas » (https://innovantennas.com/en/). Ce coupleur utilise des lignes de transmission 50Ω construites avec un tube alu carré de section extérieure 25x25mm. Comme j'avais de ce tube en stock (reste des booms de mes antennes 432MHz), je les ai utilisé pour construire mes coupleurs.

Pour dimensionner la ligne de transmission, j'ai utilisé le programme « AppCAD ». Il se trouve facilement sur le net (https://www.broadcom.com/info/wireless/appcad).

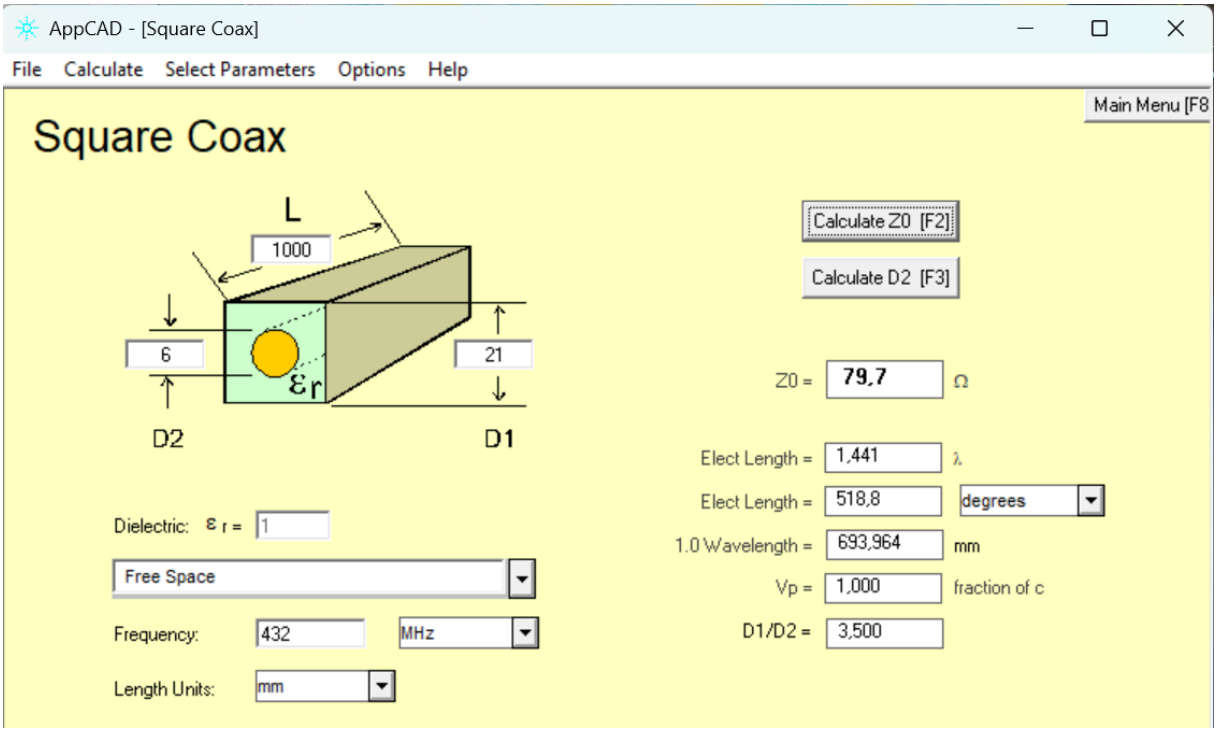


Fig. 5 : Ligne de transmission construite avec un tube rond dans un tube carré

A la figure ci-dessus vous avez le calcul par AppCAD de l'impédance d'une ligne de transmission construite à partie d'un tube rond de diamètre 6mm et de 0,5mm de paroi dans un tube carré de dimensions intérieures 21x21mm : $Z_0 = 79{,}7\Omega$.

C'est un peu trop élevé. Pour mon coupleur à 2 antennes il faut $Z_0 = 70{,}7\Omega$.

L'idée a été de décentrer le tube vers le bas, pour augmenter la capacité entre le tube rond et l'intérieur du tube carré. Comme $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, si on augmente C, l'impédance Z_0 diminue. Le conducteur central est alors décentré près des prises N. Des rondelles en plastique de 1,5mm d'épaisseur, enfilées avant le soudage sur la pinoche de la prise N donnent la distance nécessaire (3mm) entre le tube laiton et la masse pour obtenir $Z_0 = 70{,}7\Omega$

J'ai vérifié la transformation d'impédance avec une ligne λ/4 de ce type, terminée par une charge 50Ω à sa sortie ; l'impédance d'entrée était bien de 100Ω.

Fig. 6 : Intérieur de la ligne de transmission de 71Ω →

4. Coupleur pour 4 antennes 432MHz

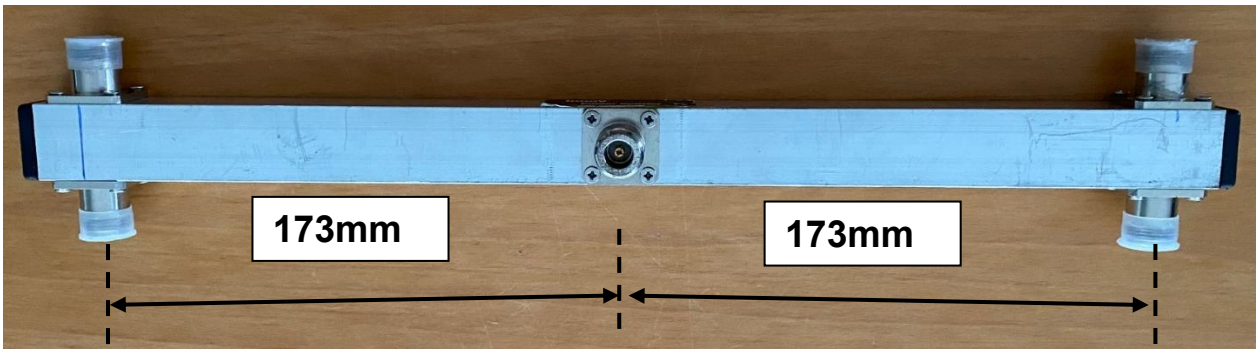


Fig. 7 : Coupleur à 4 antennes

Le coupleur de la figure 7 est fabriqué par *Innovantennas » (G0KSC). Son schéma est à la figure 8 ci-dessous.

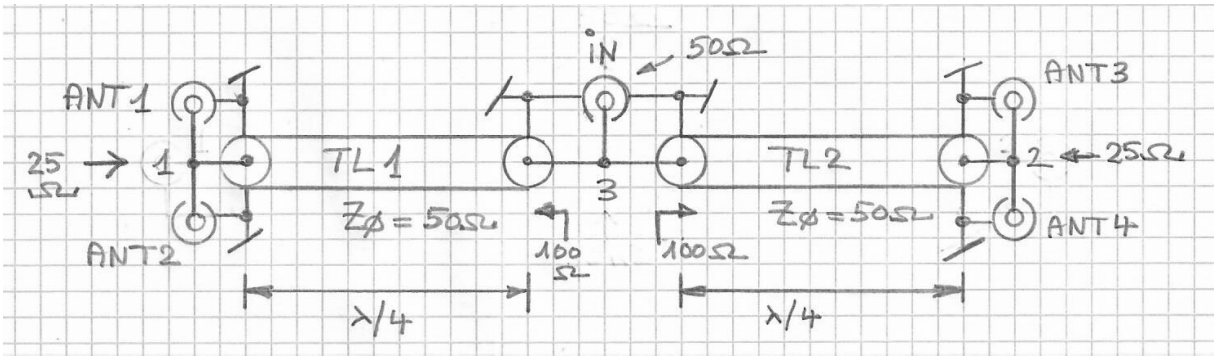


Fig. 8 : Schéma du coupleur à 4 antennes

A gauche, 2 antennes sont mises en parallèle, ce qui donne une impédance de 25Ω au point 1. Cette impédance est transformée sur 100Ω au point 3 par une ligne de transmission λ/4 d'impédance 50Ω.
A droite, c'est la même chose ; L'impédance de 25Ω vue au point 2 est transformée sur 100Ω au point 3 par une ligne de transmission λ/4 identique à celle de gauche.

On voit alors au point 3 deux impédances de 100Ω en parallèle ce qui donne 50Ω.

La ligne de transmission est faite comme pour le coupleur précédent avec un tube alu carré de diamètre intérieur 21mm.

La ligne interne est un tube de laiton de diamètre extérieur 10mm pour obtenir une impédance de ligne de 50Ω.

Fig. 9 : Intérieur de la ligne de transmission 50Ω →

Le tableau suivant donne l'impédance pour des lignes de transmission réalisées dans un tube carré de section intérieure 21x21mm, avec différents diamètres du tube rond intérieur. Le tube rond est centré à l'intérieur du tube carré. L'isolant est de l'air.

Diamètre du tube rond interne [mm]	Impédance Z_0 [Ω]
4	104
5	90,6
6	79,7
7	70,4
8	62,4
9	55,3
10	49,0
11	43,3
12	38,1
13	33,3

5. Coupleur pour 3 antennes 432MHz

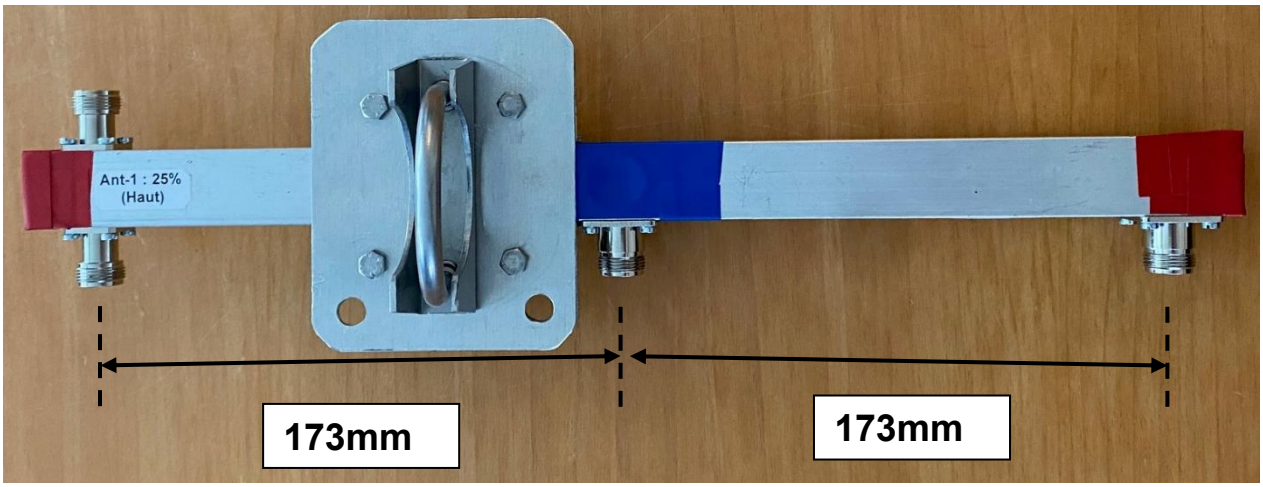


Fig. 10 : Vue du coupleur pour 3 antennes

Ce coupleur est un peu spécial. En effet, la puissance n'est pas répartie de façon égale entre les antennes. L'antenne du milieu reçoit 50% de la puissance et les antennes du haut et du bas se partagent les 50% restants (25% sur les antennes du haut et du bas).

Cette façon de faire permet de réduire les lobes parasites, au prix de 0,2dB de pertes supplémentaires par rapport à une répartition de la puissance égale sur les 3 antennes.

Le schéma de ce coupleur est à la figure 11, page suivante.

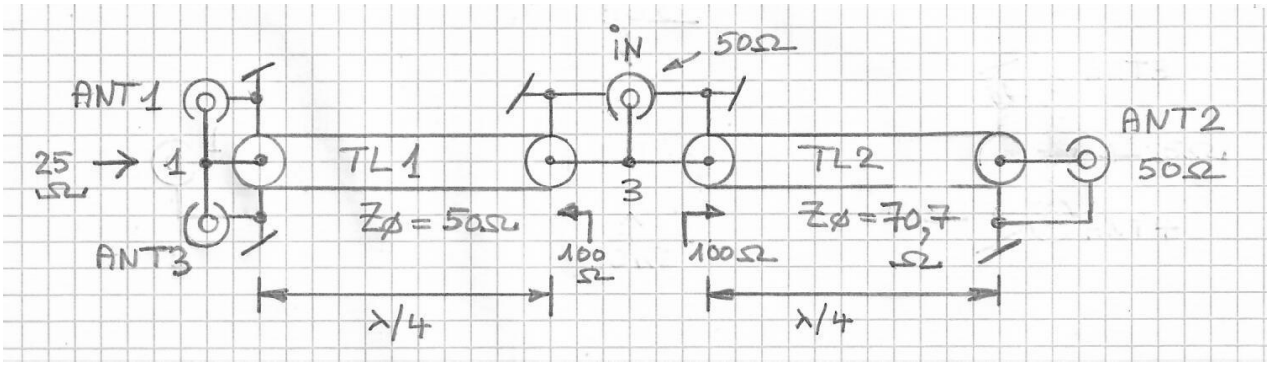


Fig. 11 : Schéma du coupleur pour 3 antennes

Les antennes du haut et du bas (ANT1 et ANT3) sont connectées en parallèle à gauche, ce qui donne une impédance de 25Ω au point 1. La ligne TL1 d'impédance $Z_0 = 50\Omega$ transforme cette impédance de 25Ω sur 100Ω au milieu du coupleur (Comme dans le cas du coupleur à 4 antennes).

Pour le côté droit (ANT2), une ligne d'impédance $Z_0 = 70{,}7\Omega$ transforme l'impédance de 50Ω de l'antenne no 2 sur 100Ω au milieu du coupleur (Comme dans le cas du coupleur à 2 antennes). Le point 3 (IN) voit alors deux impédances de 100Ω en parallèle ce qui donne 50Ω à ce point.

Je n'avais pas de tube de laiton de diamètre 10mm pour pouvoir réaliser la ligne TL1 d'impédance 50Ω. J'ai alors superposé deux tubes de 6mm l'un sur l'autre pour réaliser cette ligne. Cela augmente la capacité répartie et diminue un peu l'inductance linéique ($Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$).
Et ça a fonctionné. J'ai obtenu pile-poil l'impédance de 50Ω désirée.

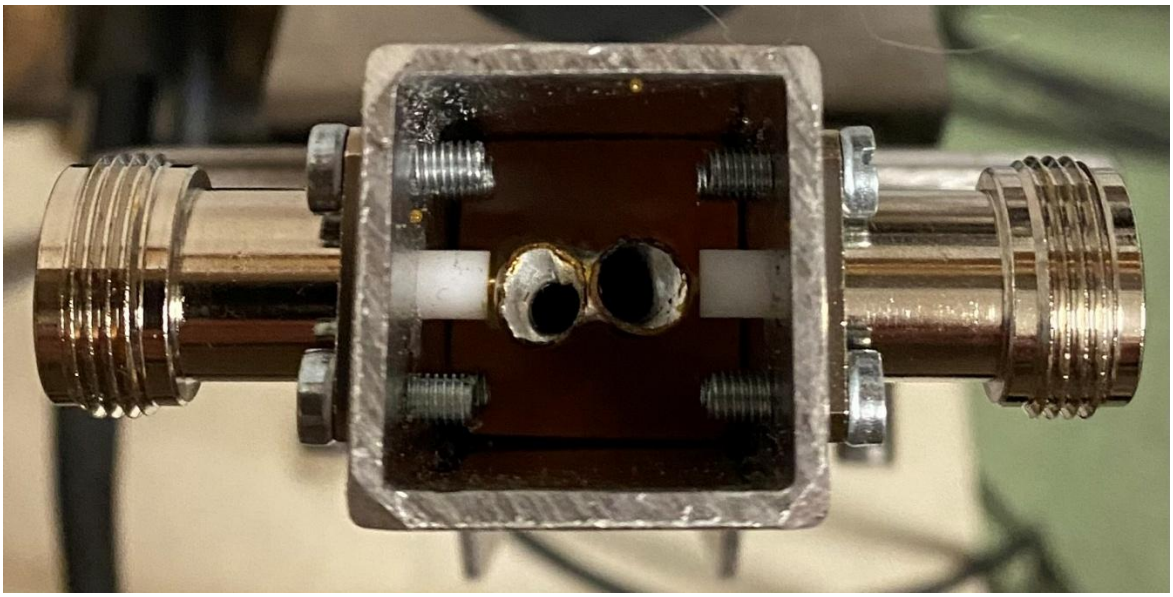


Fig. 12 : Vue de l'intérieur de la ligne TL1 50Ω

6. Résultats de mesures

Coupleur à 4 antennes de chez « Innovantennas »

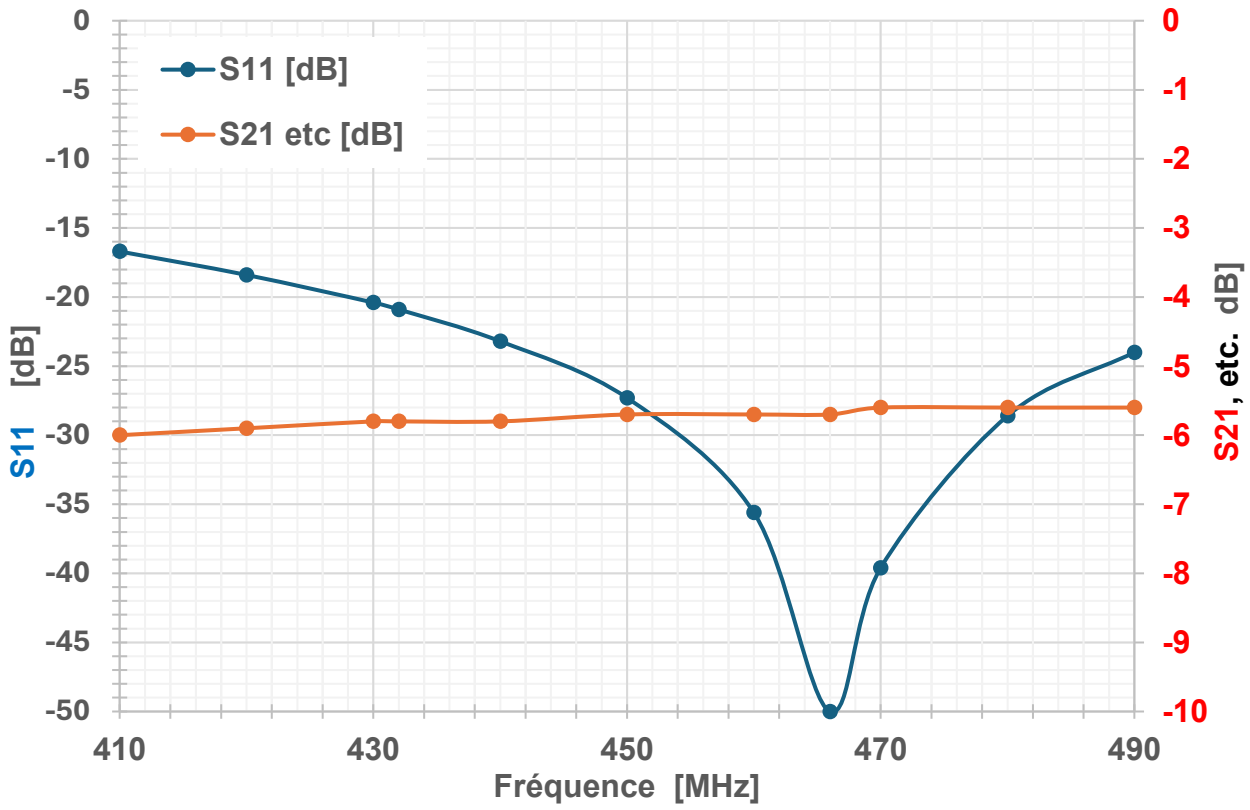


Fig. 13 : Coupleur à 4 antennes ; mesures de S21 (transmission) et S11 (SWR)

La mesure est faite avec un petit analyseur de réseau chinois sur une bande de fréquences entre 410 et 490MHz.

On obtient en transmission S21=-5,8dB à 432MHz. C'est un peu optimiste car pour un répartiteur à 4 antennes, vu que chaque antenne reçoit 25% de la puissance, S21 devrait être inférieur ou égal à -6dB. Bon, cet analyseur n'a pas un SWR très bon à 432MHz, ce qui peut expliquer ce résultat.

Le SWR est « nickel » vers 480MHz.
Il est un peu moins bon à 432MHz avec S11=-20,9dB, cela correspond à SWR=1,2 ce qui peut être considéré comme acceptable.

Note : Le SWR est le « rapport d'ondes stationnaires », c-à-d le rapport entre les minimaux et maximaux de tension dans une ligne de transmission. S11 est le rapport entre la puissance directe envoyée dans la ligne et la puissance réfléchie. Pour calculer le SWR à partir de S11, on utilise la formule suivante :

$SWR = \frac{(1+10^{S11/20})}{(1-10^{S11/20})}$, (S11 étant un nombre négatif !)

Coupleur à 2 antennes

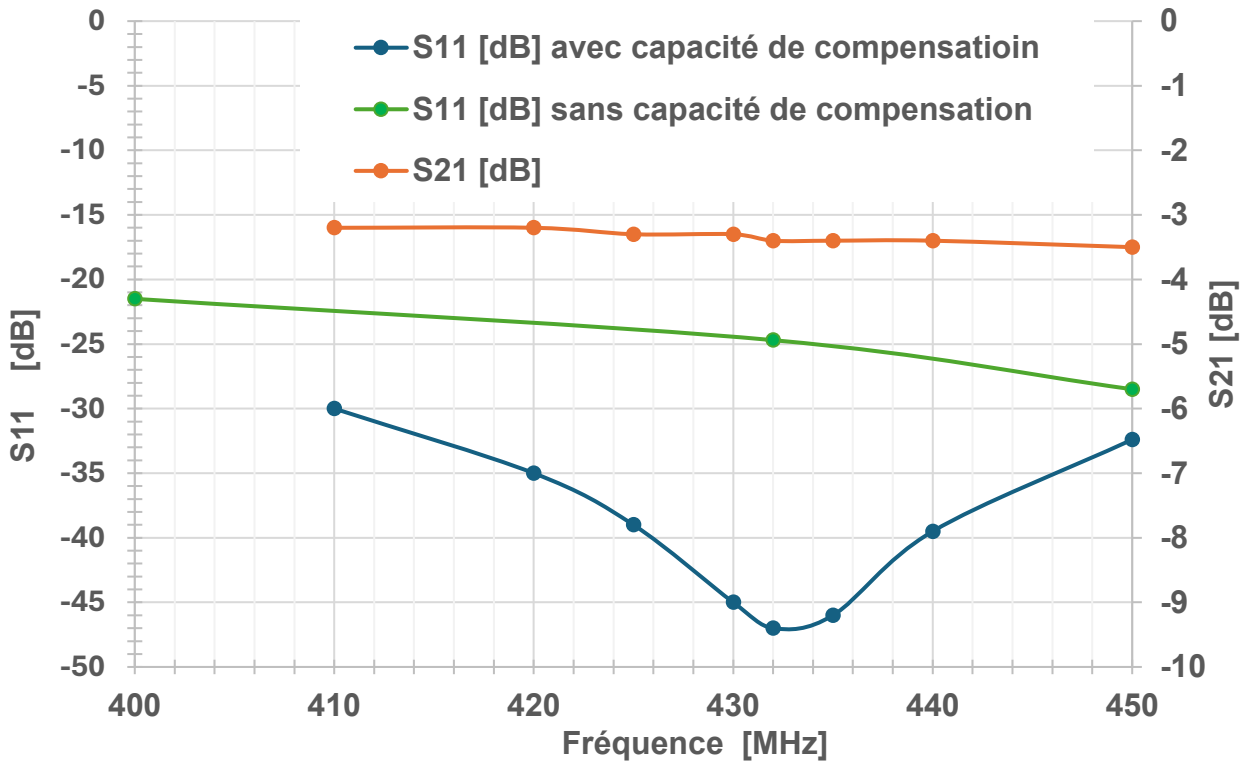


Fig. 13 : Coupleur à 2 antennes ; mesures de S21 (transmission) et S11 (SWR)

On obtient en transmission S21=-3,4dB à 432MHz. On est « dans les clous », la valeur « idéale » sans pertes ne pouvant être plus grande que -3dB (50% de puissance sur chaque sortie). A nouveau, la précision de l'analyseur… (?)

La courbe verte donnait S11=-24,7dB (SWR=1,12). Etant un peu perfectionniste (pinailleur ?), j'ai ajouté une capacité contre la masse de 0,6pF à l'entrée du coupleur. Le résultat est la courbe bleue avec S11<-40dB (SWR=1,02).

Coupleur à 3 antennes

Ce coupleur a 3 sorties. Une reçoit la moitié de la puissance et les 2 autres se partagent le reste (25% chacune).

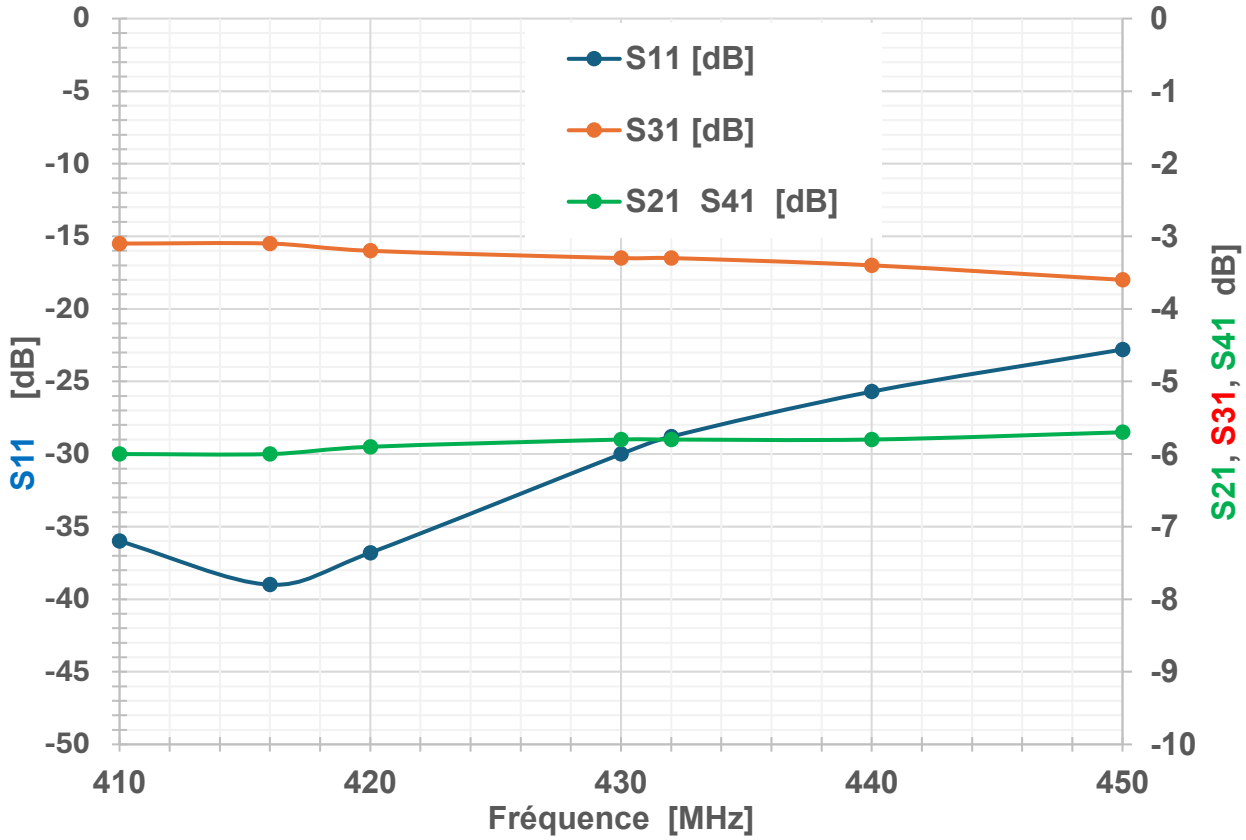


Fig. 13 : Coupleur à 2 antennes ; mesures de S21, S31 et S41 (transmission) et de S11 (SWR)

Le SWR (S11) a un minimum vers 416MHz. A 432MHz, S11=-28,8dB ce qui correspond à SWR=1,075. C'est assez bon comme ça…

Sur la sortie pour l'antenne du milieu du groupement on mesure S31=-3,3dB (0,3dB de pertes ?).
Sur les autres sorties pour les antennes du haut et du bas on mesure S21=S41=-5,8dB ce qui est un peu plus élevé que les -6dB attendus. Il est possible que ces deux sorties prennent légèrement plus que prévu au dépend de l'antenne du milieu.

Ou bien, la précision de la mesure est affectée par le SWR de l'analyseur de réseau bon marché utilisé…

7. Antenne 20EL et groupements de 2x, 3x et 4x 20 éléments

Ce paragraphe donne les résultats de simulation avec le logiciel EZNEC pour les différents systèmes d'antennes.
Ces antennes 20EL « LFA » (Loop Feed Array) ont été conçues par Justin G0KSC. Elles ont un drive en boucle fermée horizontale. Elles sont optimales au niveau du rapport avant/arrière et elles ont de faibles lobes parasites.

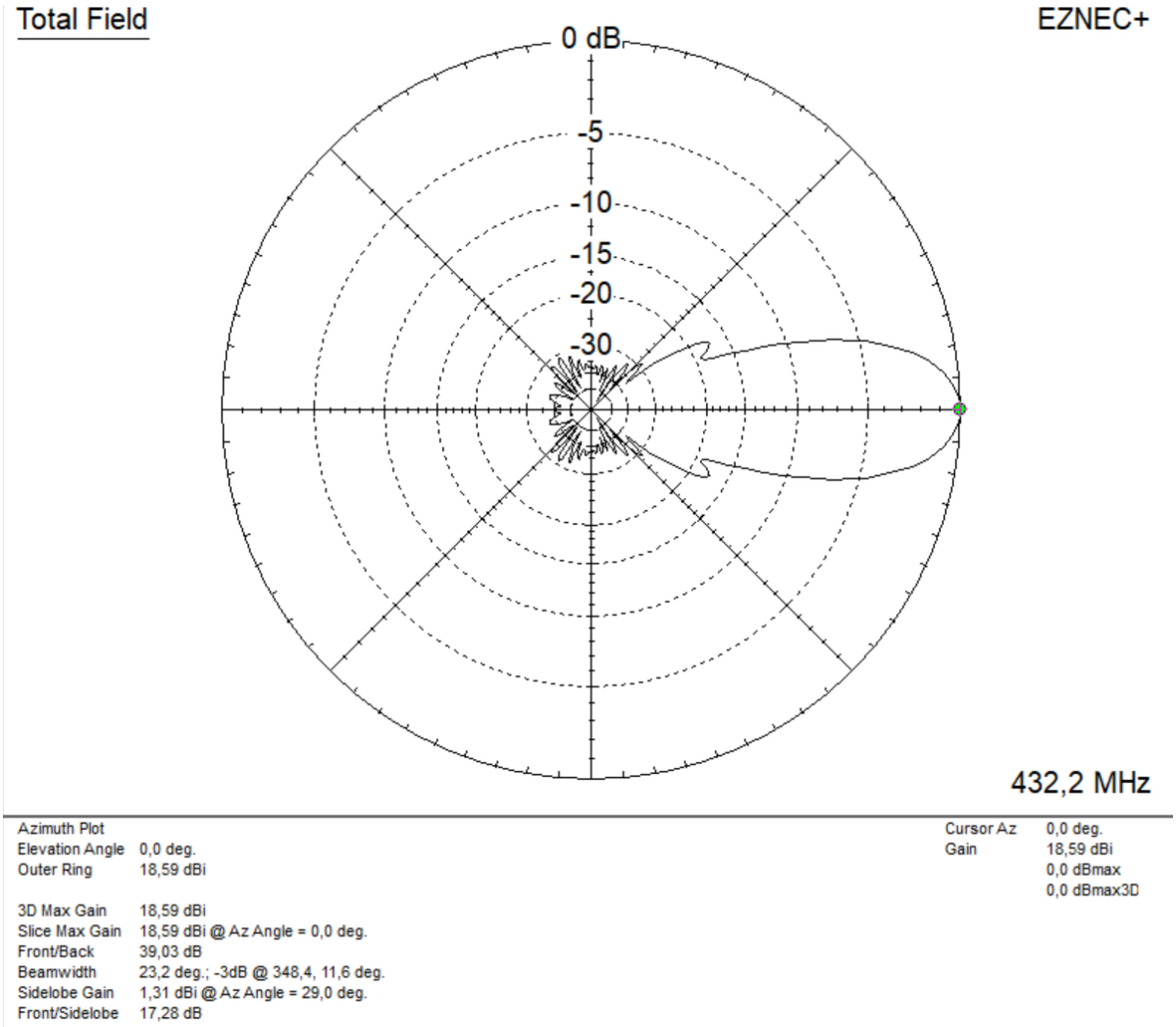


Fig. 14 : Diagramme de rayonnement en azimut pour une antenne de 20EL

La figure 14 montre le diagramme de rayonnement simulé en horizontal (azimut) pour une seule antenne de 20 éléments. L'allure de ce diagramme est valable aussi pour les autres configurations avec stacking vertical de 2, 3 ou 4 antennes, sauf bien sûr en ce qui concerne le gain qui augmente avec le nombre d'antennes superposées dans le groupement.

Dans le plan horizontal les paramètres clef pour cette antenne sont les suivants :

- Gain maximal : 18,6dBi
- Largeur du faisceau horizontal à -3dB : +/-11,6° (largeur totale 23,2°)
- Réjection des lobes parasites dominants : -17,3dB à +/-29°
- Rapport avant/arrière : 39dB

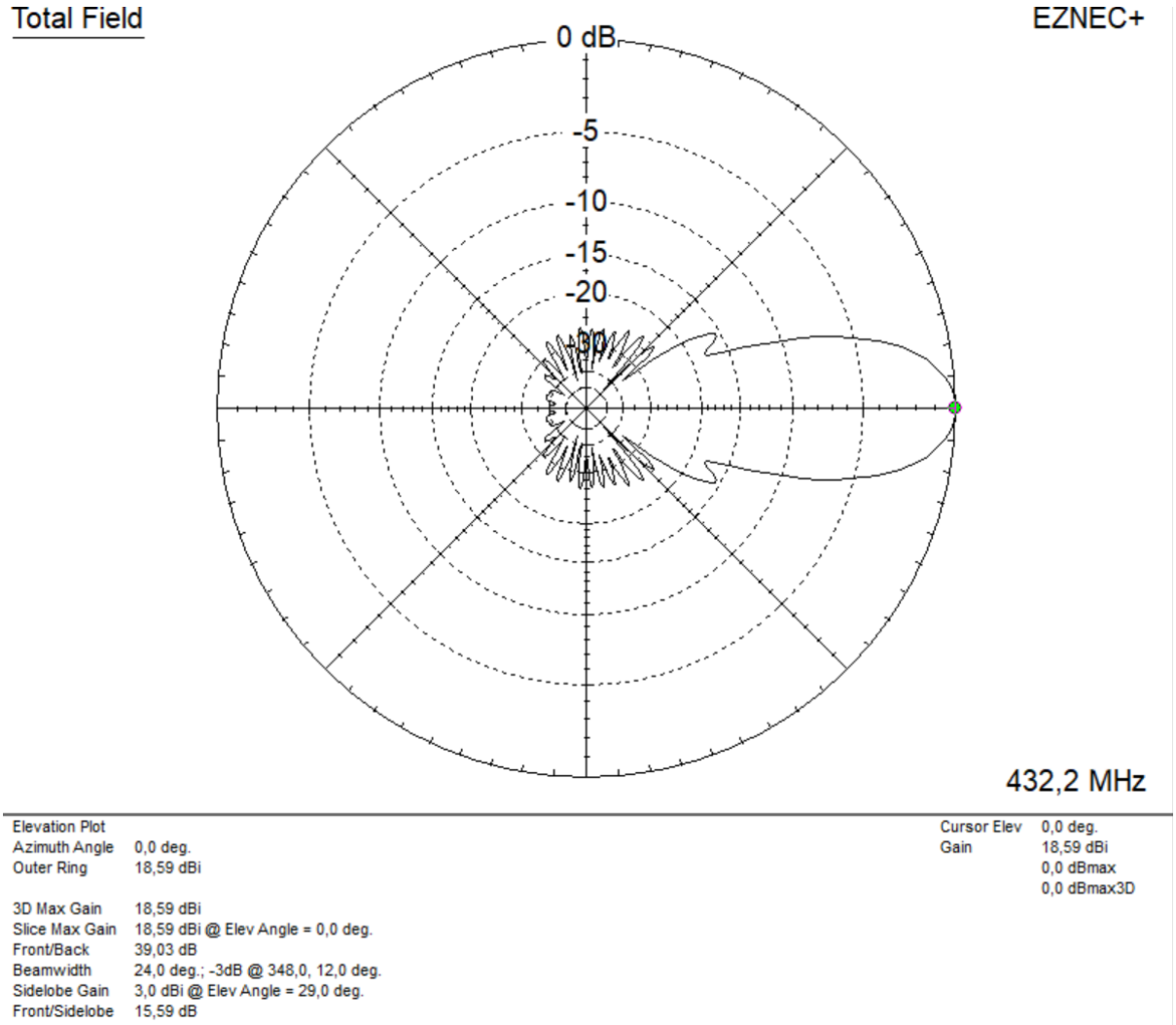


Fig. 15 : Diagramme de rayonnement vertical pour une antenne de 20EL

Dans le plan vertical les paramètres clef pour une seule antenne sont les suivants :

- Gain maximal : 18,6dBi
- Largeur du faisceau vertical à -3dB : +/-12° (largeur totale 24°)
- Réjection des lobes parasites dominants : -15,6dB à +/-29°

Groupement avec 2 antennes « stackées » verticalement

Distance entre les 2 antennes : 1m50

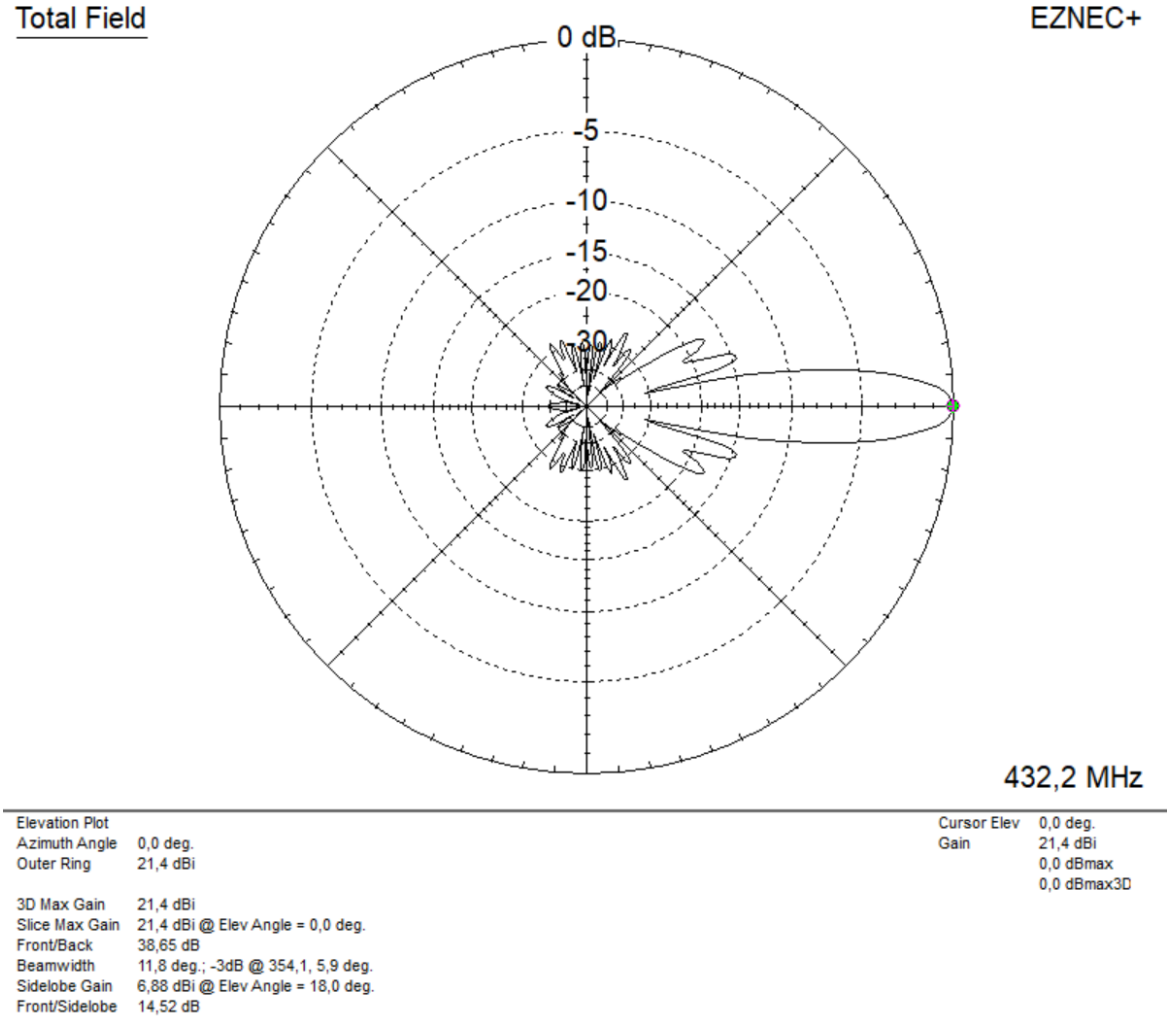


Fig. 16 : Diagramme de rayonnement vertical pour un groupement de 2 antennes

Comme évoqué précédemment, l'allure du diagramme de rayonnement horizontal est identique à celui pour une seule antenne, sauf le gain qui est plus élevé.

Dans le plan vertical les paramètres sont les suivants :

- Gain maximal : 21,4dBi
- Largeur du faisceau vertical à -3dB : +/-5,9° (largeur totale 11,8°)
- Réjection des lobes parasites dominants : -14,5dB à +/-18°

Par rapport à une seule antenne, le gain est augmenté de +2,8dB. On pourrait gagner encore +0,2dB en augmentant la distance entre les antennes, mais ce serait au détriment d'une augmentation des lobes parasites.

Groupement avec 3 antennes « stackées » verticalement

Distance entre chaque antenne : 1m50
L'amplitude du signal n'est pas répartie également entre les 3 antennes. L'antenne du milieu reçoit le 50% de la puissance totale ; les antennes du haut et du bas se partagent le reste (25% chacune). Cela améliore les lobes parasites mais diminue le gain de -0,2dB.

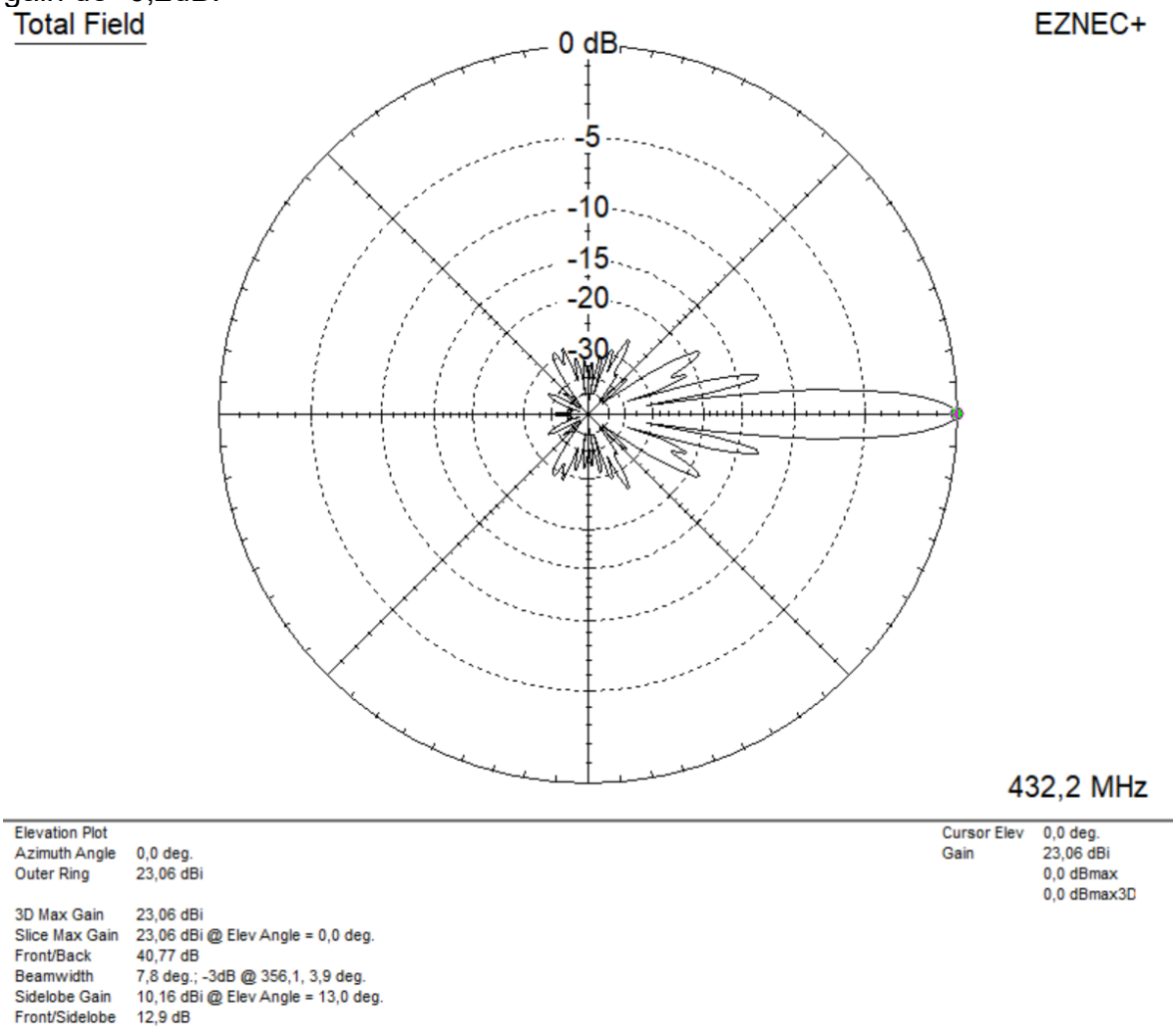


Fig. 17 : Diagramme de rayonnement vertical pour 3 antennes stackées verticalement

L'allure du diagramme de rayonnement horizontal est identique à celui pour une seule antenne, sauf le gain qui est plus élevé.
Dans le plan vertical les paramètres sont les suivants :

- Gain maximal : 23,05dBi
- Largeur du faisceau vertical à -3dB : +/-3,9° (largeur totale 7,8°)
- Réjection des lobes parasites dominants : -12,9dB à +/-13°

Par rapport à une seule antenne, le gain est augmenté de +4,45dB

Groupement avec 4 antennes « stackées » verticalement

Distance entre chaque antenne : 1m50

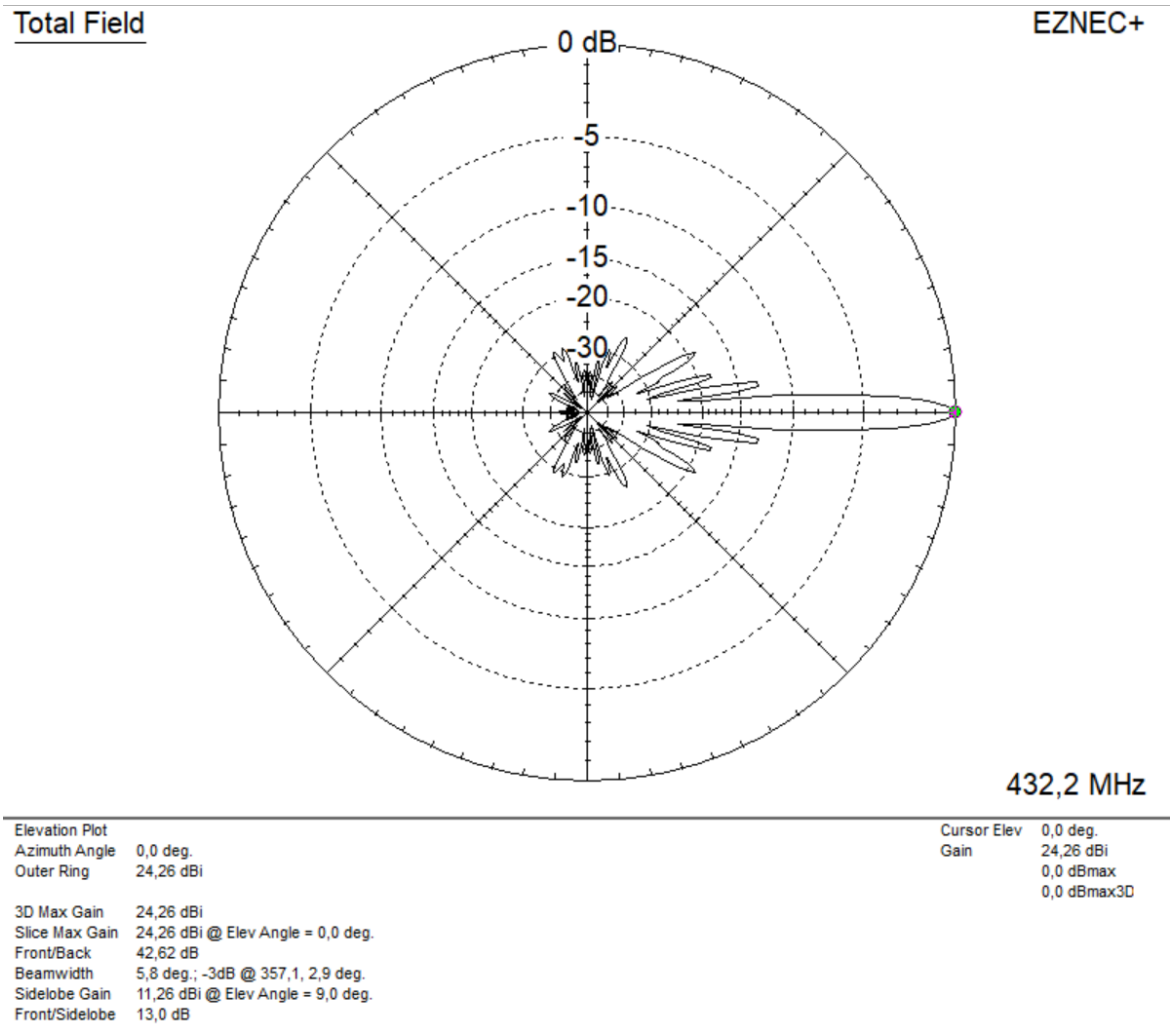


Fig. 18 : Diagramme de rayonnement vertical pour 4 antennes stackées verticalement

L'allure du diagramme de rayonnement horizontal est identique à celui pour une seule antenne, sauf le gain qui est plus élevé.
Dans le plan vertical les paramètres sont les suivants :

- Gain maximal : 24,25dBi
- Largeur du faisceau vertical à -3dB : +/-2,9° (largeur totale 5,8°)
- Réjection des lobes parasites dominants : -13dB à +/-9,0°

Par rapport à une seule antenne, le gain est augmenté de +5,65dB.
Le faisceau horizontal est très étroit. Il faut que le mât d'antenne soit bien vertical pour envoyer la puissance horizontalement sur l'horizon (et non vers le ciel ou contre le sol…)

Résumé

Antenne	Gain max [dBi]	Gain relatif à 1x20eL	Angle horizontal à -3dB	Angle vertical à -3dB	Réjection lobes parasites
1x 20EL	18,6	---	+/- 11,6°	+/- 12°	-15,6dB
2x 20EL	21,4	+2,8dB		+/- 5,9°	-14,5dB
3x 20EL	23,05	+4,45dB		+/- 3,9°	-12,9dB
4x 20EL	24,25	+5,65dB		+/- 2,9°	-13dB

Concernant les gains des groupements d2 2, 3 et 4 antennes, il convient d'enlever encore **-0,2dB** pour tenir compte des pertes dans les coupleurs.

8. Conclusions

Ce travail fait suite au contest UHF catastrophique d'octobre 2025 sous HB9XC. La tempête nous avait plié le mat d'antennes de la 4x20EL et nous avions terminé avec une seule antenne.

L'objet de ce mémo est de documenter les coupleurs réalisés pour 2, 3 et 4 antennes. En passant, j'ai décrit les résultats de simulation avec EZNEC pour des systèmes de 1, 2, 3 et 4 antennes de 20EL LFA sur 432MHz stackées verticalement.

A côté des descriptions techniques des coupleurs, vous trouvez aussi un rappel théorique concernant les lignes de transmission et l'utilisation de lignes de transmission de longueurs λ/4 pour réaliser des transformations d'impédance.

J'espère que ces rappels théoriques pourront être utiles pour ceux et celles qui aimeraient passer l'examen HB), bien que je pense que ces rappels théoriques vont au-delà de ce qui est demandé pour l'examen…