

2023

Radio Club de l'Avesnois F6KTN

Cavités, duplexeurs et montages à cavités

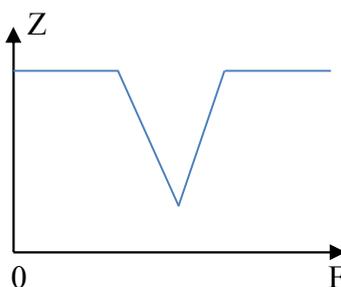
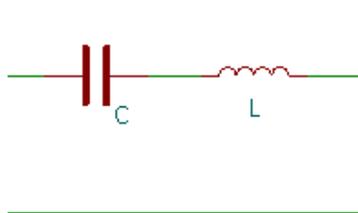
Introduction	3
Filtre passe bande	3
Filtre coupe bande	3
Rappels	5
Vocabulaire de définitions fondamentales	5
Rappel sur la ligne quart d'onde.....	5
Montage d'une cavité en coupe bande.....	6
Constitution type d'une cavité	7
Quelques fabricants	9
Tx-Rx systems	9
Kathrein	10
Procomm	10
Fonction des cavités	11
Passe bande (Pass)	11
Fonction coupe-bande (notch)	13
Autres modes disponibles sur les cavités Tx-Rx systems	16
Combinaisons de montage des boucles Tx-Rx systems	18
Montage de cavités en mode T-Pass pour coupler plusieurs émetteurs sur une antenne	20
Cavité Kathrein K641261	21
Duplexeur Procom	22
Liaisons entre cavités	23
Produits d'intermodulation	24
Montages de cavités	26
Duplexeur :.....	26
Exemple de montage	27



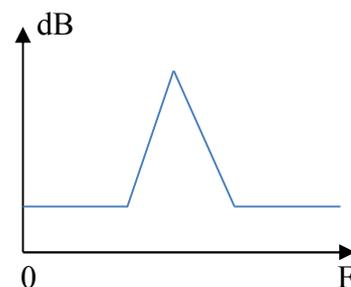
Introduction

Les cavités sont des filtres qui se comportent comme des lignes quart d'onde. Comme en électronique, il existe plusieurs types de filtres (bouchon, LC...), et il existe ainsi plusieurs types de cavités qui permettent de réaliser différentes fonctions. Ainsi, les cavités sont des circuits résonnants dont le facteur de qualité Q (facteur de surtension) est beaucoup plus élevé qu'un filtre électronique. Ils présentent une sélectivité bien plus importante.

Filtre passe bande

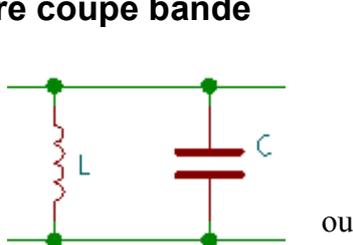


Dans un filtre passe bande, l'impédance est minimale à la résonance. Elle est maximale sur les autres fréquences éloignées.

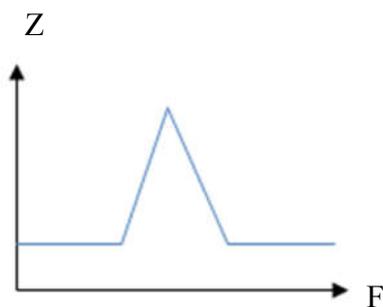
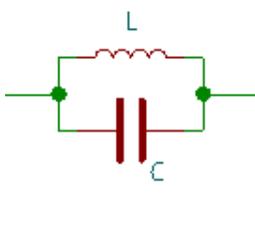


Dans un filtre passe bande, l'amplitude du signal en sortie est maximale à la résonance. Elle est minimale sur les autres fréquences éloignées.

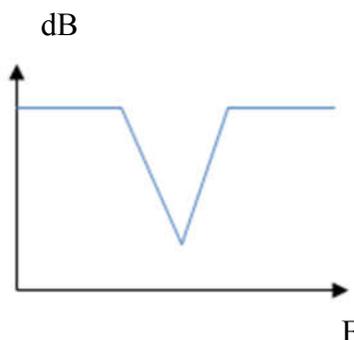
Filtre coupe bande



ou



Dans un filtre coupe bande, l'impédance est maximale à la résonance. Elle est minimale sur les autres fréquences éloignées.



Dans un filtre coupe bande, l'amplitude du signal en sortie est minimale à la résonance. Elle est maximale sur les autres fréquences éloignées.

Les cavités sont utilisées sur les relais sur lesquels la fréquence de réception est proche de la fréquence de l'émetteur. L'émetteur générant une énergie radiative large, elle sature le récepteur s'ils sont branchés sur la même antenne. Une des solutions est donc de positionner des cavités passe bande en sortie d'émetteur (qui filtrent la fréquence de l'émetteur) et des cavités coupe bande (qui rejettent la fréquence de l'émetteur) en entrée du récepteur.

Voici un ordre de grandeur des tensions comparées générées par un émetteur de 100W et la tension minimale détectable par un récepteur :

Un signal de puissance $P(\text{eff})$ circulant dans une ligne de transmission de 50Ω génère une tension $U(\text{eff})$ égale à :

$$U = \sqrt{50 P}$$

Pour un émetteur de 50W, cela donne une tension de 50 volts soit $50 \times 10^6 \mu\text{V}$. Comparativement, la sensibilité d'un récepteur est d'environ $0,22 \mu\text{V}$. Seule une cavité permet un filtrage énergique permettant de couper la grande puissance de l'émetteur vers le récepteur.

Un duplexeur est un ensemble de cavités à deux voies qui permettent de brancher deux émetteurs/récepteurs sur la même antenne. Le système est alors bidirectionnel full duplex.

Les cavités sont en général constituées de corps en laiton. Certaines sont argentées à l'intérieur, ce qui augmente le facteur de surtension Q. Voici un tableau de résistivité en $\times 10^{-9} \Omega\text{m}$ des métaux utilisés en électricité :

Argent	16	Le meilleur conducteur électrique est donc l'argent. L'or n'est utilisé que sur les connecteurs car il présente une grande résistance à la corrosion contrairement à l'argent ou le cuivre.
Cuivre	17	
Or	22	
Laiton	71	

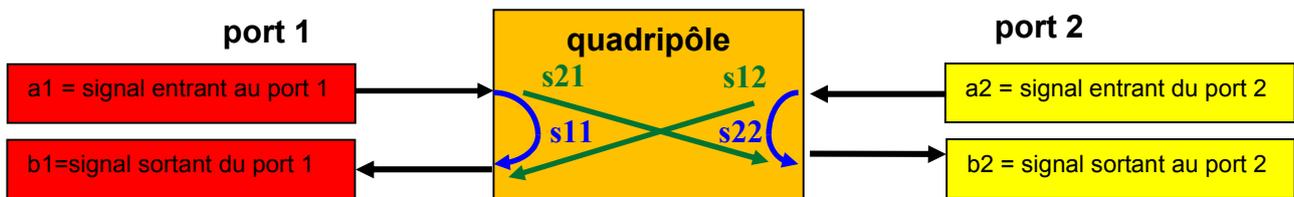
Rappels

Vocabulaire de définitions fondamentales

Tout dispositif radio (atténuateur, amplificateur, cavité, circulateur, coupleur directif, antenne...) présente des ports d'entrée et sortie des signaux :

port : désigne une entrée ou une sortie de signal sur le dispositif à étudier. C'est un connecteur.

pôle : désigne une mesure sur un port. Il y a toujours deux pôles par port : le pôle « signal transmis » et le pôle « signal réfléchi ».



Dans un quadripôle (donc 2 ports), les paramètres S désignent les coefficients d'un signal d'un port x vers un port y :

S_{11} : coefficient de réflexion du port 1 (signal de 1 vers 1)

S_{12} : coefficient de transmission du port 2 vers le port 1

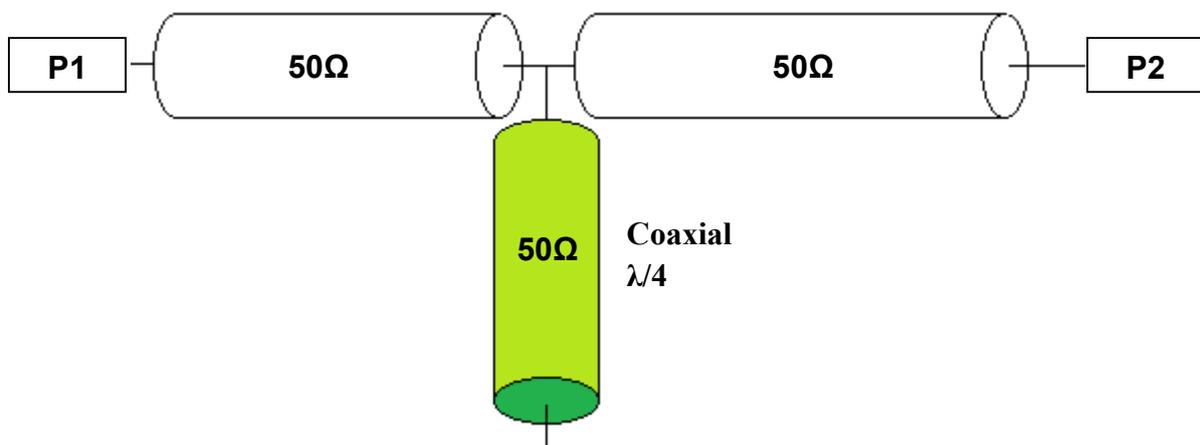
S_{21} : coefficient de transmission du port 1 vers le port 2

S_{22} : coefficient de réflexion du port 2 (signal de 2 vers 2)

Voir la présentation « mesures complexes en radiofréquence » pages 11 et 14.

Rappel sur la ligne quart d'onde

Voici une ligne quart-d'onde coaxiale (en vert) insérée en coupe bande dans une ligne existante. On veut que la fréquence de coupure soit de 500 MHz, avec une ligne quart d'onde dont le coefficient de vitesse est de 0,66 ; la ligne quart d'onde mesure donc 99mm ; dans ce cas, son impédance est de la même valeur que l'impédance d'entrée du port P1 et du port P2 de sortie.



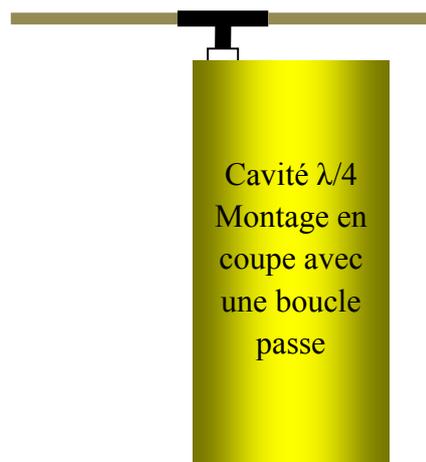
NB. La ligne quart d'onde a le même rôle qu'une cavité montée en coupe bande.

L'atténuation obtenue à 500 MHz est d'environ 15 dB. Pour augmenter l'atténuation, il faut mettre un deuxième ou un troisième filtre en série, ou passer en ligne $3\lambda/4$.

Ceci constitue un filtre notch, ou coupe bande.

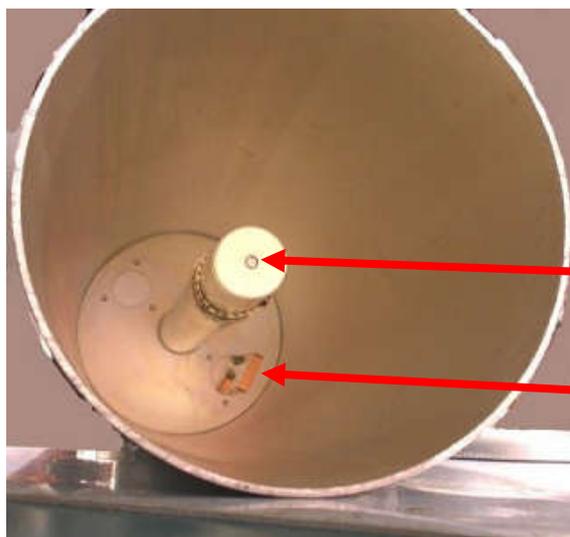
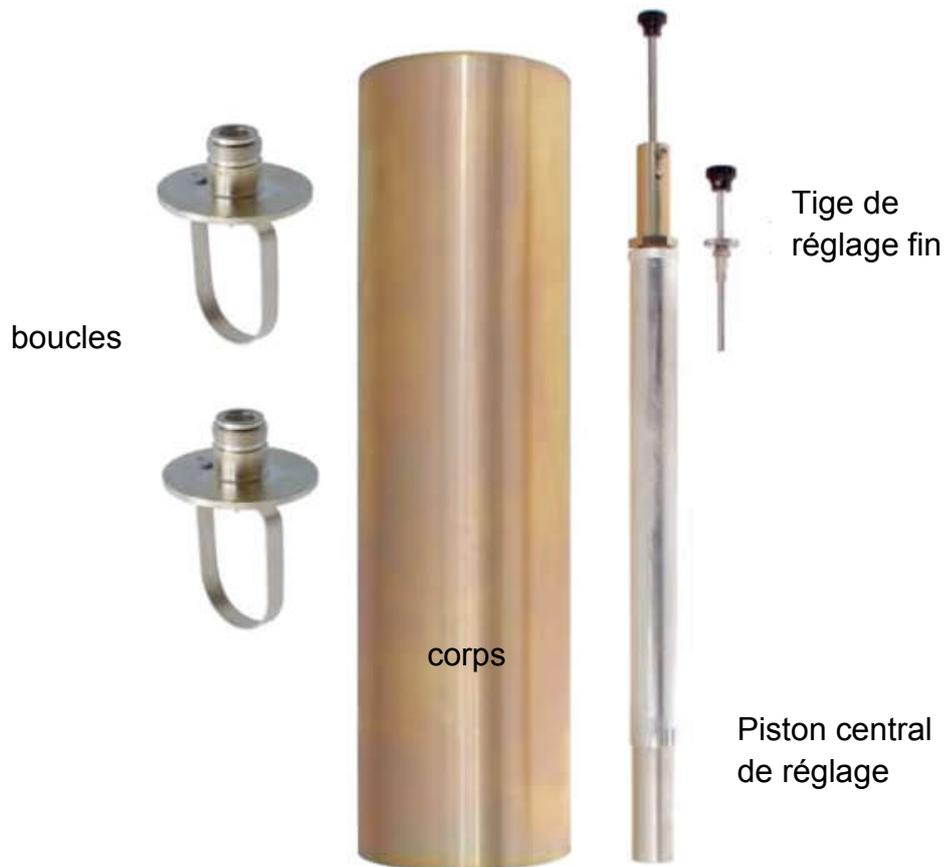
Montage d'une cavité en coupe bande

Comme vu dans le cas du quart d'onde ci-dessus, pour monter une cavité en coupe bande, il suffit de connecter un des deux ports avec un T, et de ne pas utiliser l'autre port :



Constitution type d’une cavité

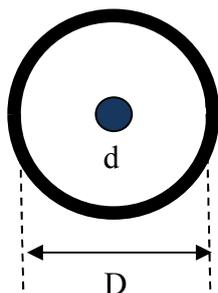
Exemple des éléments constitutifs d’une cavité Tx-Rx systems



La **hauteur** de la cavité détermine sa fréquence mais aussi son mode de fonctionnement ($\lambda/4$ ou $3\lambda/4$). Une cavité $3\lambda/4$ aura une meilleure sélectivité (Q) qu'une cavité $\lambda/4$.

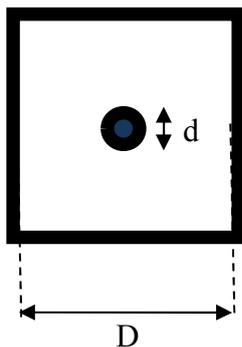
Le **diamètre** (sa grosseur) détermine sa bande passante. Plus le diamètre est important, meilleure est la sélectivité.

Par construction, une cavité respecte toujours les dimensions suivantes :



Ligne circulaire

$$Z = 138 \log \frac{D}{d}$$



Ligne carrée à conducteur central rond

$$Z = 143 \log \frac{D}{d}$$

Exemple : $D=35$ $d=14$ on a $Z=57 \Omega$

Quelques fabricants

Chaque fabricant de cavités a ses préconisations de montage et ses propres descriptions. Voici quelques fabricants :

Tx-Rx systems. Origine : USA. Ce sont des cavités en laiton emboutis très recherchées. Elles sont efficaces et faciles à régler. Elles disposent d'un grand nombre d'accessoires.



Cavités Tx-Rx systems. Elles comportent un piston central de syntonisation, et un piston déporté pour le réglage fin.



Connecteur N. Le socle comporte une boucle plongeant dans la cavité. On peut changer la boucle pour un autre type, ce qui change la courbe de réponse de la cavité (passe bande, coupe bande, coupe passe etc)

Kathrein. Origine : Allemagne

Cavité VHF carrée de type pass/coupe.

Le shift (écart entre la fréquence passe et la fréquence coupe est réglable par un condensateur variable)

Connecteurs N. Sur cette cavité, on ne peut pas changer les boucles.

Procomm. Origine: Danemark. C'est un fabricant danois de matériel radio passifs (cavités, filtres, combinateurs...) Il est surtout connu pour ses duplexeurs



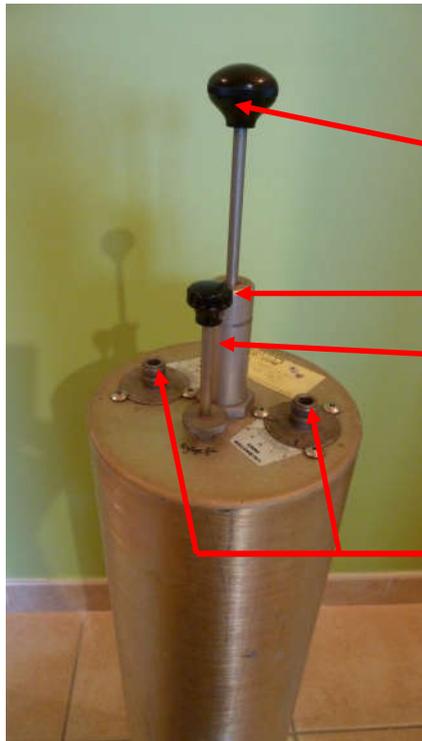
Duplexeur Procomm UHF. Ils sont constitués de 6 cavités coupe bande, 3 sur la fréquence basse, 3 sur la fréquence haute. Ils disposent de 3 connecteurs. Le connecteur central est l'antenne, le connecteur gauche est la fréquence basse, le connecteur droit est la fréquence haute. La syntonisation est réalisée à l'arrière sur chacune des cavités constituant le duplexeur. Les boucles ne sont pas démontables.

Fonction des cavités

Les deux fonctions fondamentales des cavités sont le filtre passe bande et le filtre coupe bande. En fonction du type de la cavité ou des accessoires que l'on peut interchanger (suivant le fabricant, par exemple chez TxRx Systems on peut changer les boucles).

Passé bande (Pass)

Voici une mesure sur une cavité Rx-Tx systems équipée de 2 boucles passe-bande:



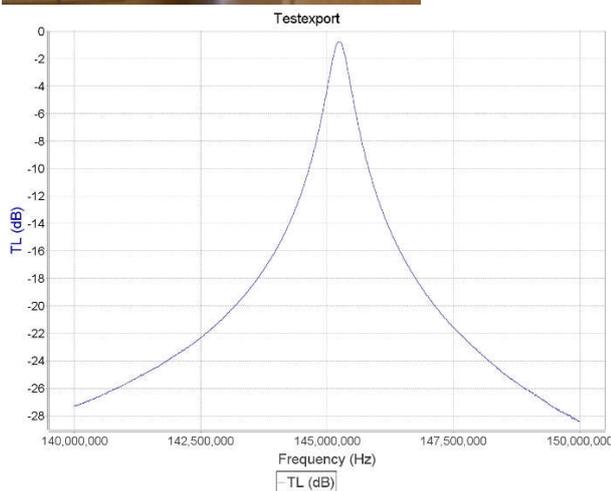
Cavité à régler sur la fréquence souhaitée.
Type basse bande VHF

Réglage principal de la fréquence

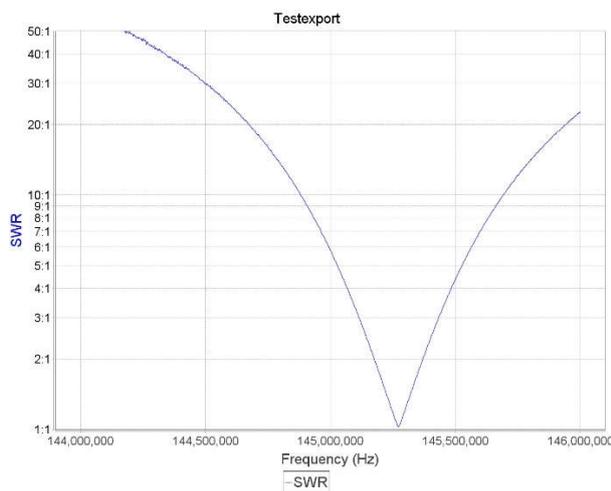
BTR de blocage de la tige

Réglage fin de la fréquence : desserrer la bague de serrage et enfoncer ou remonter la tige (variation de 160 kHz environ)

Connecteurs N équipés de boucles passe bande.
La rotation permet de régler le couplage d'entrée et de sortie (desserrer et tourner) (pour le ROS et la perte d'insertion et donc la bande passante)



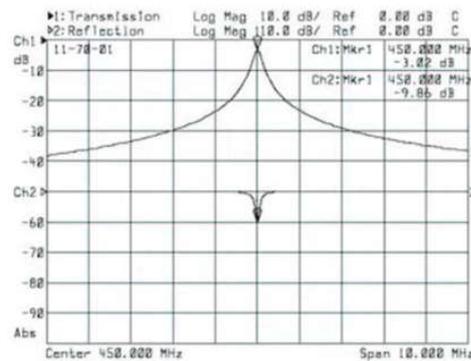
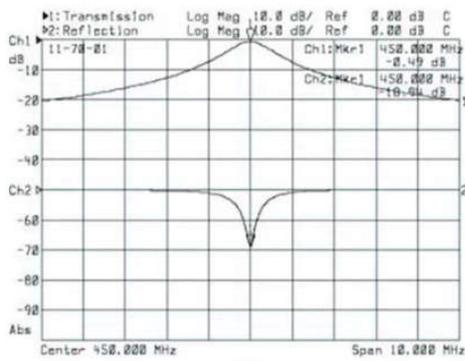
Courbe en transmission (S21)
Perte d'insertion mesurée : 0,7 dB,
Du fait de sa bande passante étroite, cette cavité est très sensible aux désalignements mécaniques ou thermiques.



Courbe en réflexion (S11) sous forme du ROS.
ROS 1/1 sur fréquence centrale. Creux de la courbe de ROS très étroite. Un écart de quelques kHz fait monter rapidement de ROS.
Q=247



Mode passe bande sur une cavité Tx-Rx systems.
 Pour ajuster la réponse de la cavité, on tourne les boucles :



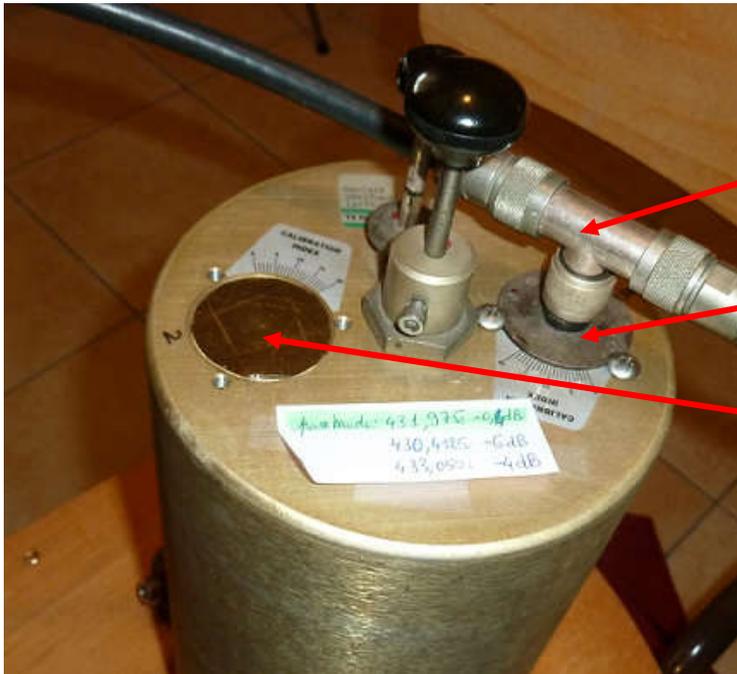
Couplage maximal
Boucles à 0°
Perte minimale : 10% (0,5dB)
Sélectivité moindre



Couplage minimal
Boucles à 90°
Perte maximale : 50% (3 dB)
Sélectivité maximale

Fonction coupe-bande (notch)

On a vu précédemment comment obtenir la fonction coupe bande avec une ligne $\lambda/4$. On procède de la même façon avec une cavité :



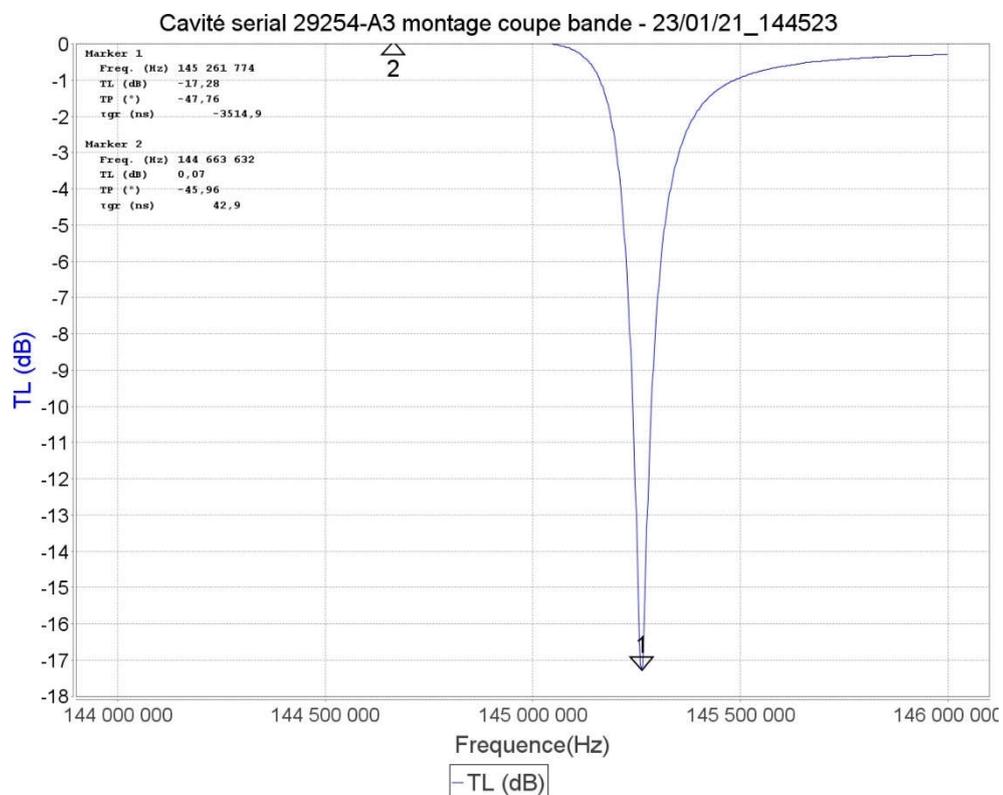
Cavité montée en coupe bande avec un T

Té

Port1

Port2 bouché

Avec ce montage, on peut atteindre 18 dB de rejection, suivant le type de cavité (dimension)



Courbe de réponse en transmission : une seule fréquence est rejetée à -17 dB.

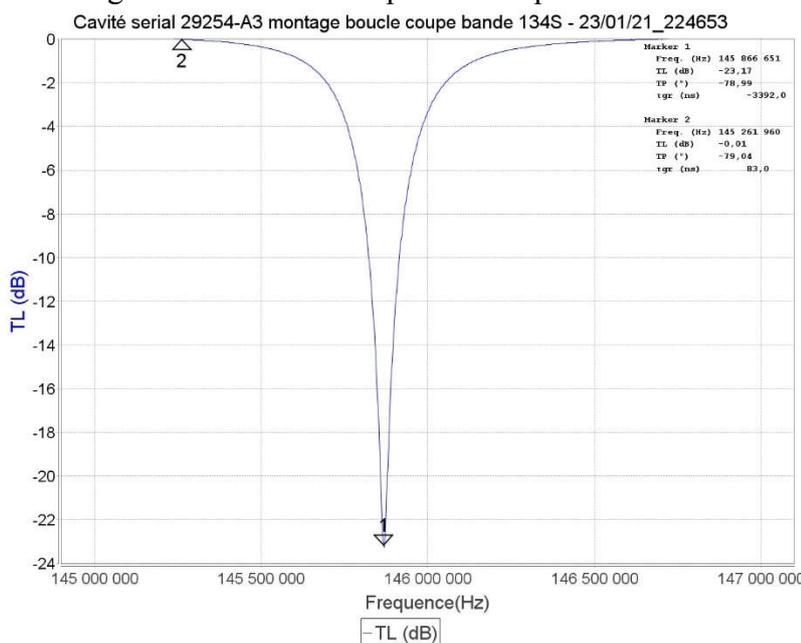
Sur les cavités Tx/Rx systems, on a la possibilité d'utiliser des boucles de différents modèles réalisant différentes fonctions. Il existe des boucles (loops) "notch" permettant un montage différent, avec davantage de performances que le montage en coupe bande vu précédemment. Les boucles notch disposent de deux ports, et quelquefois un condensateur variable pour l’ajustement.



Series Notch® Loops



La cavité est la même, mais on a utilisé une boucle "notch" comprenant deux ports (entrée, sortie) sur un signal dont on veut couper une fréquence.



L'atténuation obtenue est alors de 23 dB environ, meilleure que l'atténuation avec un montage en T.



Mode coupe bande sur une cavité Tx-Rx systems. On positionne une boucle notch dans le premier port de la cavité. On place un obturateur sur le 2^{ème} port de la cavité. Pour ajuster la réponse de la cavité, on tourne les boucles et on règle le condensateur de la boucle.

Autres modes disponibles sur les cavités Tx-Rx systems

Nous avons vu que ces cavités peuvent fonctionner en passe-bande et en coupe bande, voici les autres modes de fonctionnements possibles avec l'installation des boucles disponibles chez le fabricant :



Bandpass Loops



T-Pass® Loops



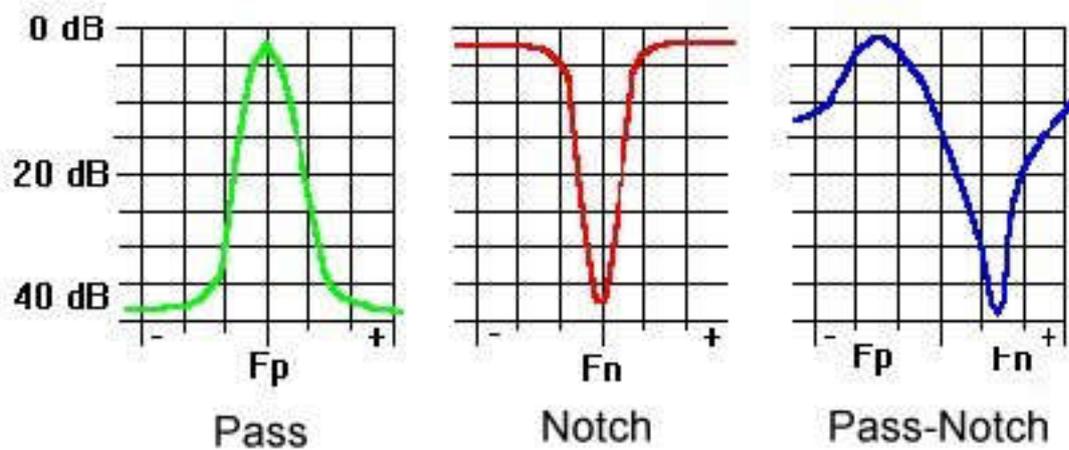
Series Notch® Loops



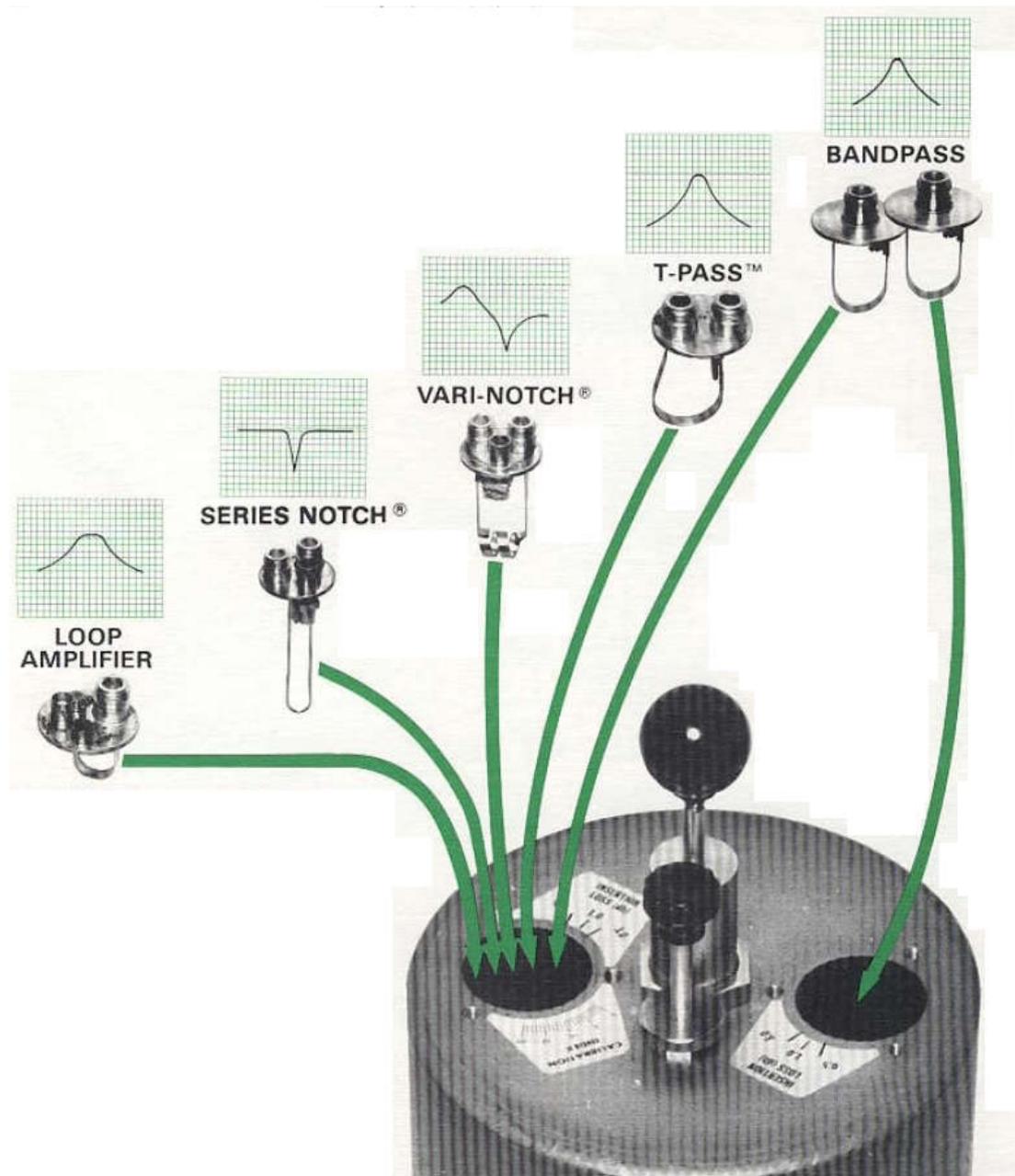
Vari Notch® Loops

Boucles T-Pass : comme les boucles BandPass, mais elles permettent d'utiliser un port supplémentaire pour pouvoir chaîner plusieurs émetteurs. Le montage est spécifique et décrit plus loin.

Boucle VariNotch (pass-notch) : permet d'avoir la fonction "passe" et la fonction "coupe" sur une seule cavité, sur des fréquences différentes. Un condensateur variable permet de régler le shift (écart entre la fréquence passe et la fréquence coupe).



Combinaisons de montage des boucles Tx-Rx systems



Si on monte une boucle vari-notch ou notch, il faut monter une plaque d'obturation sur le 2^{ème} port de la cavité (trou bouché).

Si on monte une boucle T-pass, il faut monter une boucle bandpass sur le 2^{ème} port de la cavité.

Il est possible de fabriquer des boucles. Pour faire une boucle varinotch, il faut approvisionner un condensateur capacité Airtronic ref 5502 (1-20 pF) ou Johanson.

<http://f1chf.free.fr/fichiers/JOHANSON/johanson.pdf>

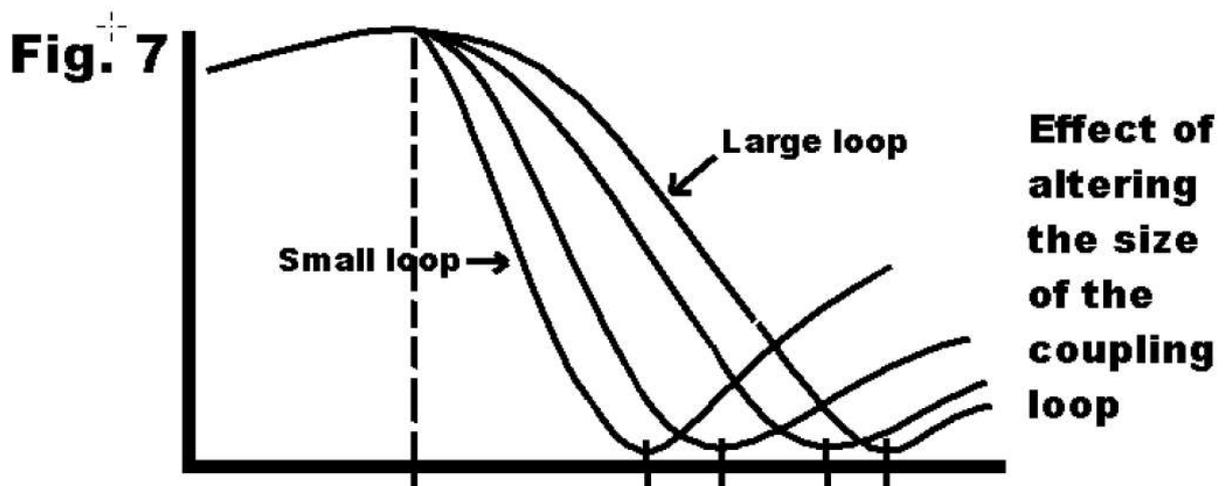
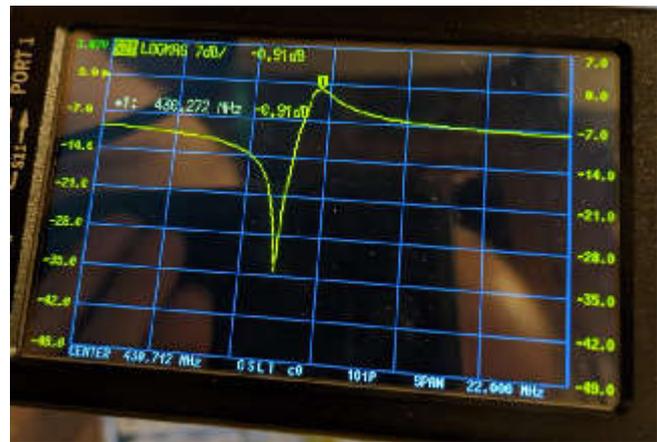
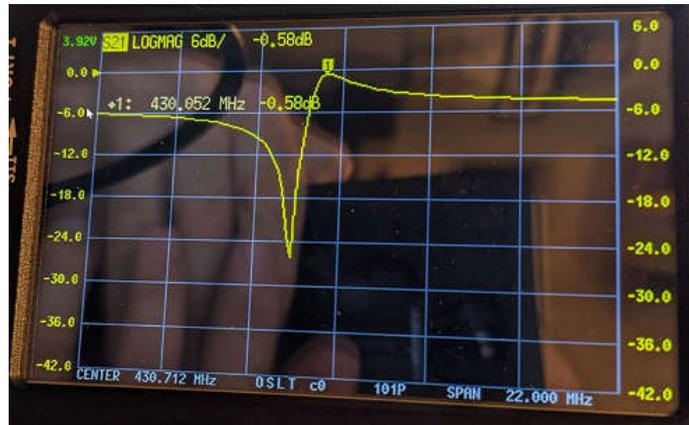
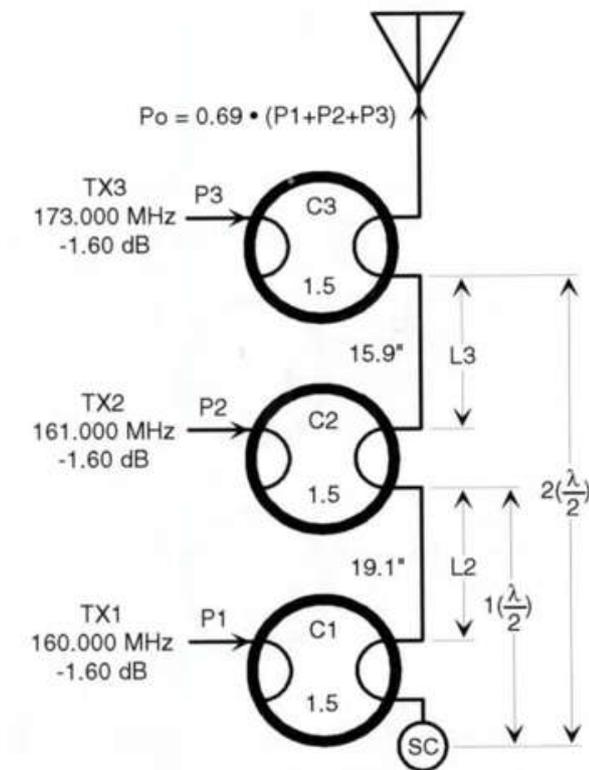


Fig. 7

Montage de cavités en mode T-Pass pour coupler plusieurs émetteurs sur une antenne

Schéma théorique :



Les cavités C1, C2 et C3 sont équipées de boucles Tpass.

Les cavités sont branchées en série vers l'antenne.

La première cavité reçoit un court-circuit (SC) sur son premier port d'entrée.

Les cavités T-pass passent la fréquence avec un court-circuit attaché sur le premier port.

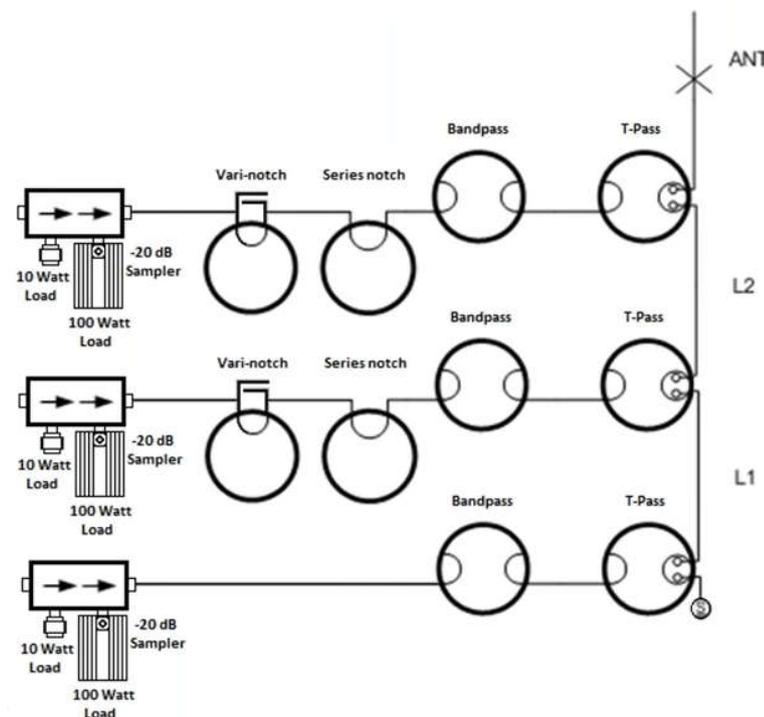
Les cavités sont reliées entre elles par un multiple de la demi-onde utilisée; dans le but de déplacer ce court-circuit vers le haut.

La longueur totale doit faire une multiple de la demi longueur d'onde.

Ici : $\lambda/2 + \lambda/2 = \lambda$.

La puissance totale à l'antenne sera la somme de la puissance de chaque canal diminué des pertes, ici évaluée avec un rendement total de 69%.

Schéma pratique :



En pratique, chaque émetteur est suivi d'un isolateur (double si possible).

Les canaux (sauf le premier) sont suivis d'une cavité vari-notch et d'une cavité notch pour le filtrage supplémentaire, éliminant les intermodulations entre les émetteurs.

Cavité Kathrein K641261

C'est une cavité "passe coupe" qui fait la même fonction que les boucles vari-notch de chez Tx-Rx Systems. Le condensateur permet de décaler l'écart (shift).



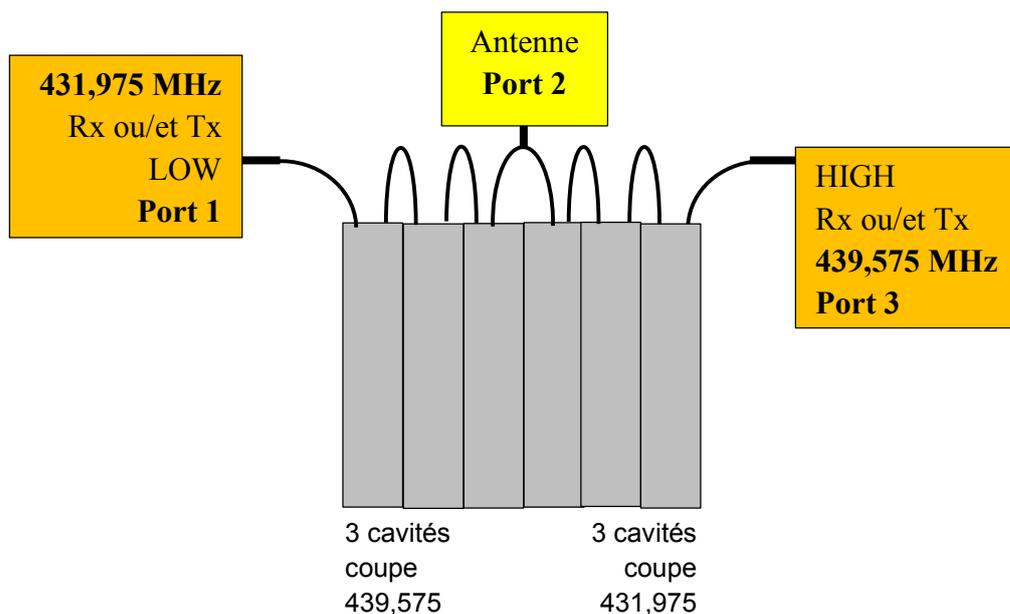
Ici, la cavité est en passe bas, coupe haut (low pass, high cut)

La variation du condensateur est suffisante pour que transformer la cavité en passe haut, coupe bas selon le mode souhaité.

Remarquer que le point de coupe M1 se trouve à -36 dB, ce qui est remarquable pour une seule cavité. La perte d'insertion en passe au point M2 est de 0,58 dB.

Duplexeur Procom

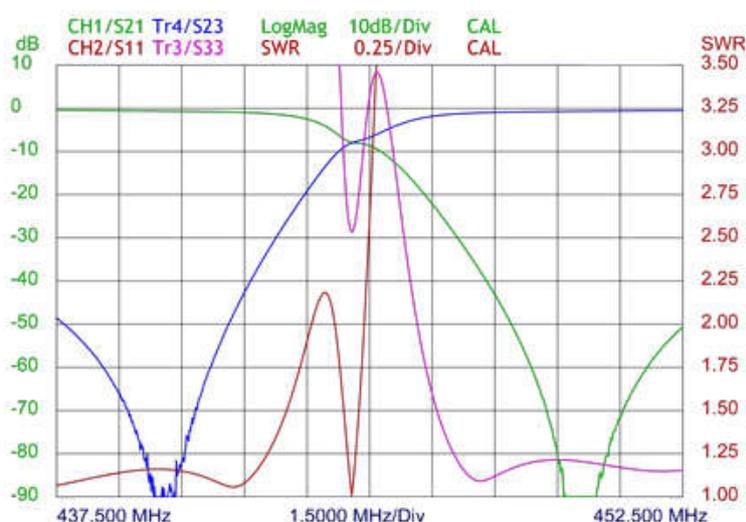
Voici le synoptique d’un duplexeur procom. Ce sont des cavités coupe bande en série :



Différence entre duplexeur et un montage avec cavités :

Un duplexeur permet de brancher un récepteur ou un émetteur ou les deux sur les deux ports. La liaison est bidirectionnelle car le duplexeur n’est composé que de filtres coupe bande, supprimant la fréquence de l’autre port.

Le critère de choix est le shift entre la fréquence basse et la fréquence haute. Ici elle est de 7,6 MHz. Chez Procom, en UHF il existe des duplexeurs en shift de 1,6 MHz ($3\lambda/4$), 5 à 7 Mhz, 7 à 9 MHz et 9 à 13 MHz et au-delà ($\lambda/4$).



Courbe de réponse pour un duplexeur avec un écart de 10 MHz.

S21 vert – S23 bleu : courbe en transmission des deux ports 1→2 vert ; et 3→2 bleu

S11 rouge – S33 rose : courbe en réflexion des deux ports 1 rouge et 3 rose

Liaisons entre cavités

Il y a des contraintes à respecter absolument lors de la réalisation des câbles de l’émetteur aux cavités, du récepteur aux cavités et entre les cavités. La première contrainte est la longueur électrique des câbles entre cavités qui doit être de $\lambda/4$, ou un multiple impair $(2n+1)\lambda/4$ si la longueur physique est insuffisante. Cela est nécessaire pour transformer la faible impédance que présente une cavité coupe bande en sortie en une impédance élevée vers l’entrée de la cavité suivante afin que la fonction coupe bande dans cette cavité soit plus efficace. Ainsi la somme des atténuations coupe bande de deux cavités reliées par un quart d’onde sera plus basse que sans quart d’onde (ou de longueur quelconque). Voir la présentation sur les lignes de transmission page 12.

D’autre part pour un duplexeur : la fonction coupe bande du côté RX est accordée à la fréquence TX. Avec un câble de longueur d’onde $1/4$ entre la cavité et le T, la fonction coupe bande est comme un court-circuit dans la cavité à la fréquence TX avec un $1/4$ d’onde. Au T, c’est comme un circuit ouvert à la fréquence TX. Cela isole efficacement la cavité RX du T à la fréquence de l’émetteur. La même chose se produit du côté TX du duplexeur. La fonction coupe bande de la cavité TX est accordée à la fréquence RX. Le court-circuit de la fonction coupe bande est transformé en une haute impédance ou un circuit ouvert à $1/4$ d’onde au niveau du T. Cela isole l’émetteur du récepteur au niveau de la jonction au T. Aux fréquences éloignées de la fréquence coupe bande, les câbles agissent comme des câbles standards de 50 ohms pour transmettre les fréquences souhaitées.

La deuxième contrainte est d’utiliser des câbles à double blindage (double tresse). Le choix du coaxial doit se faire sur le paramètre « Efficacité de blindage » (min. screening effectiveness) : c’est le rapport du champ électromagnétique sans écran / champ électromagnétique avec écran $\times 20 \log$. Voici quelques valeurs dans la liste ci-dessous. Seul le RG58 est simple blindage.

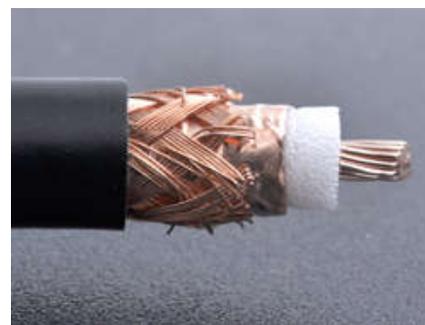
RG58 :	38 dB jusque 1 GHz
RG214 :	71 dB "
RG223 :	85 dB "
LMR240 :	90 dB "
LMR400 :	90 dB "
H2000/2007	90 dB "
ArnoFlex 214 LSNH	95 dB "



RG223 : double tresse



ArnoFlex 214 LSNH
double tresse + écran



H2000 / H2007 (AirCell 7)
tresse+écran

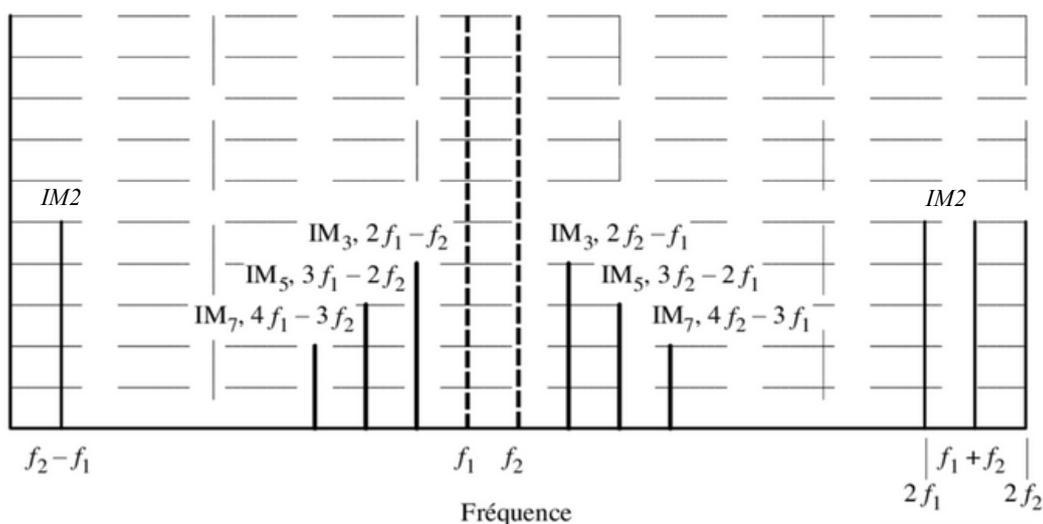
Produits d’intermodulation

Si un site dispose de plusieurs émetteurs A, B, C, alors des produits d’intermodulation se créent et peuvent introduire des interférences voire des destructions de matériels par réinjection de signaux excessifs sur les émetteurs ou les récepteurs. La probabilité d’intermodulation dépend du nombre d’émetteurs, de leur puissance et du mode de mixage.

Produits de plus grande amplitude		Produits du 2 ^{ème} ordre :	2A	2B	A + B	B - A
		Produits du 3 ^{ème} ordre :	A + B - C	2A - B	2B - A	
		Produit du 5 ^{ème} ordre :	3A - 2B	3B - 2A		
		Produit du 7 ^{ème} ordre :	4A - 3B	4B - 3A		
		Produit du 9 ^{ème} ordre :	5A - 4B	5B - 4A		

Les produits qui sont hors bande ne nécessitent pas de filtrage pour les équipements les produisant.

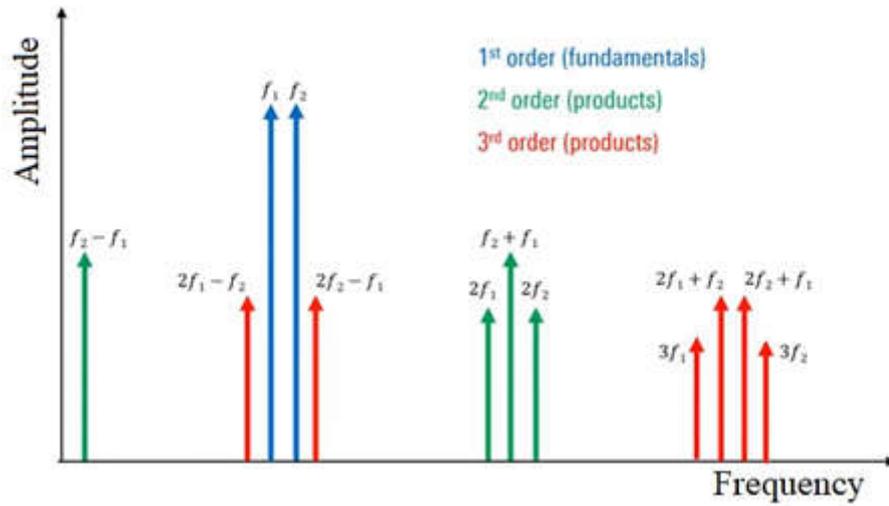
Produits d’intermodulation (traits pleins) générés par deux porteuses f_1 et f_2 :



IM2 : Ces produits sont en général hors bande et n’impactent pas le système. (mais peut en impacter un autre).

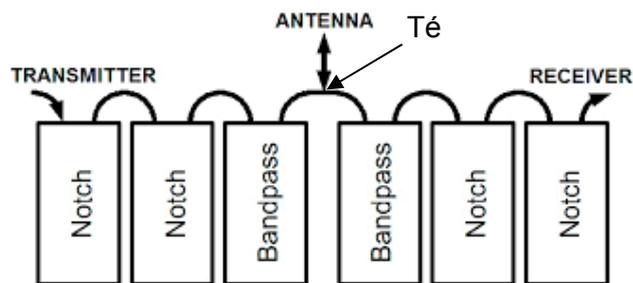
IM3 : produits d’intermodulation de 3^{ème} ordre. Ce sont ceux qui ont la plus grande amplitude.

Harmonics & Intermodulation Products

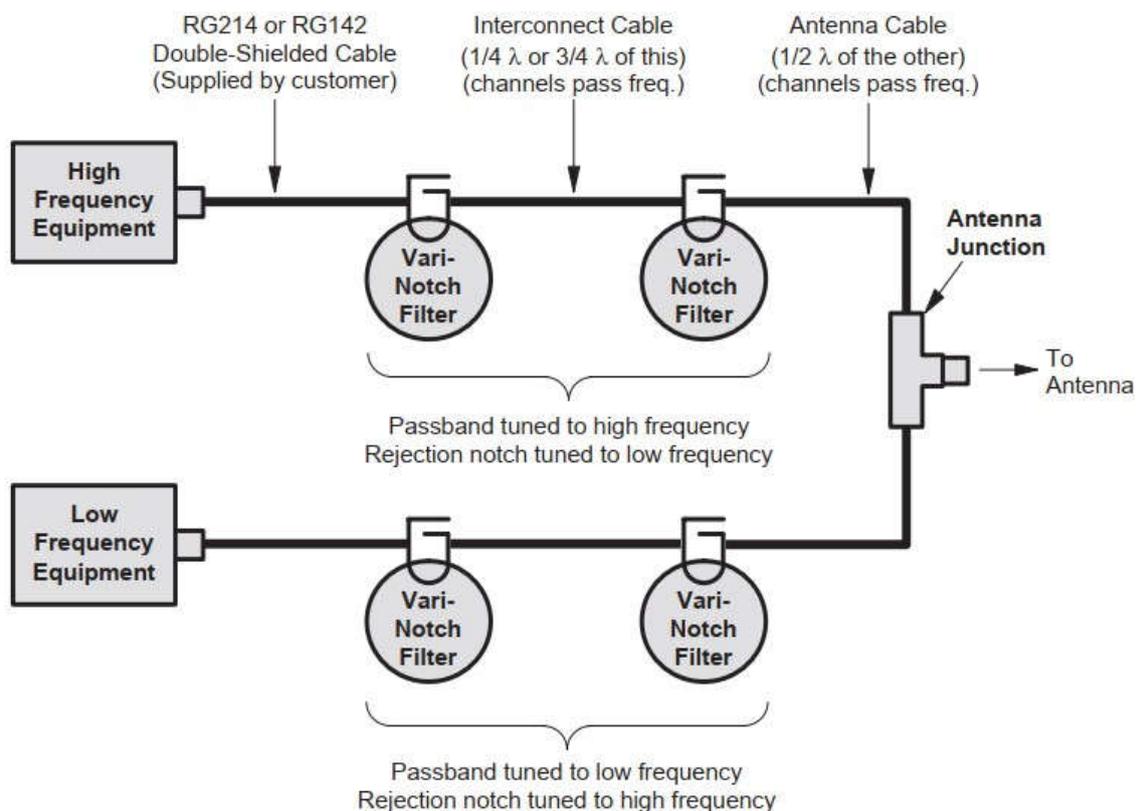


Montages de cavités

Duplexeur :

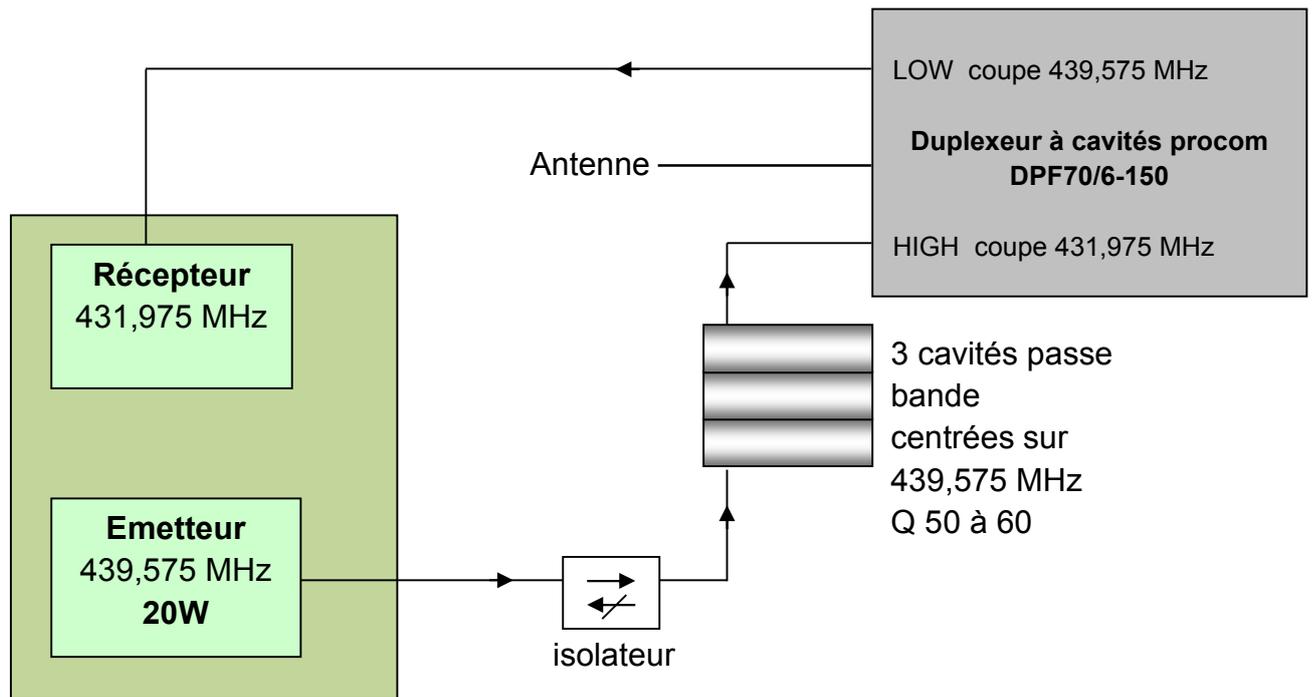


Ce duplexeur symétrique est monté sur chaque voie avec 2 cavités coupe bande et une cavité passe bande.



Duplexeur symétrique monté avec des cavités passe/coupe reliées par des quart-d'onde de la fréquence de l'équipement. Le Té est relié par des demi-ondes de la fréquence de l'autre équipement.

Exemple de montage



Le rôle de l'isolateur est d'éviter toute entrée HF en retour vers l'émetteur. Il est ainsi protégé.

Il faudrait normalement faire suivre l'isolateur d'un filtre passe bas.

Les 3 cavités passe bande suppriment tout bruit de l'émetteur en dehors de sa fréquence d'émission, ce qui garantit une haute pureté spectrale.

Forêt de cavités



Liste des plaquettes :

1. Introduction au DMR et au TETRA
2. Composants radio-électriques passifs particuliers
3. Mesures complexes en hautes fréquences
4. Adaptations d'impédances
5. Réseaux Ethernet et connectivités
6. Complément sur les adaptations d'impédances
7. Lignes de transmissions
8. Foudres, surtensions et protections
9. Cavités duplexeurs et montages à cavités