

Transformateurs HF large bande



Arnaud Vivé F6BZG pour le
F5KAV le 13 mai 2012

Pour quoi réaliser des transfos HF large bandes ?



- Adapter les impédances entre plusieurs équipements sur un large spectre de fréquence HF (1.8 à 29.7 MHz voire 52 MHz)

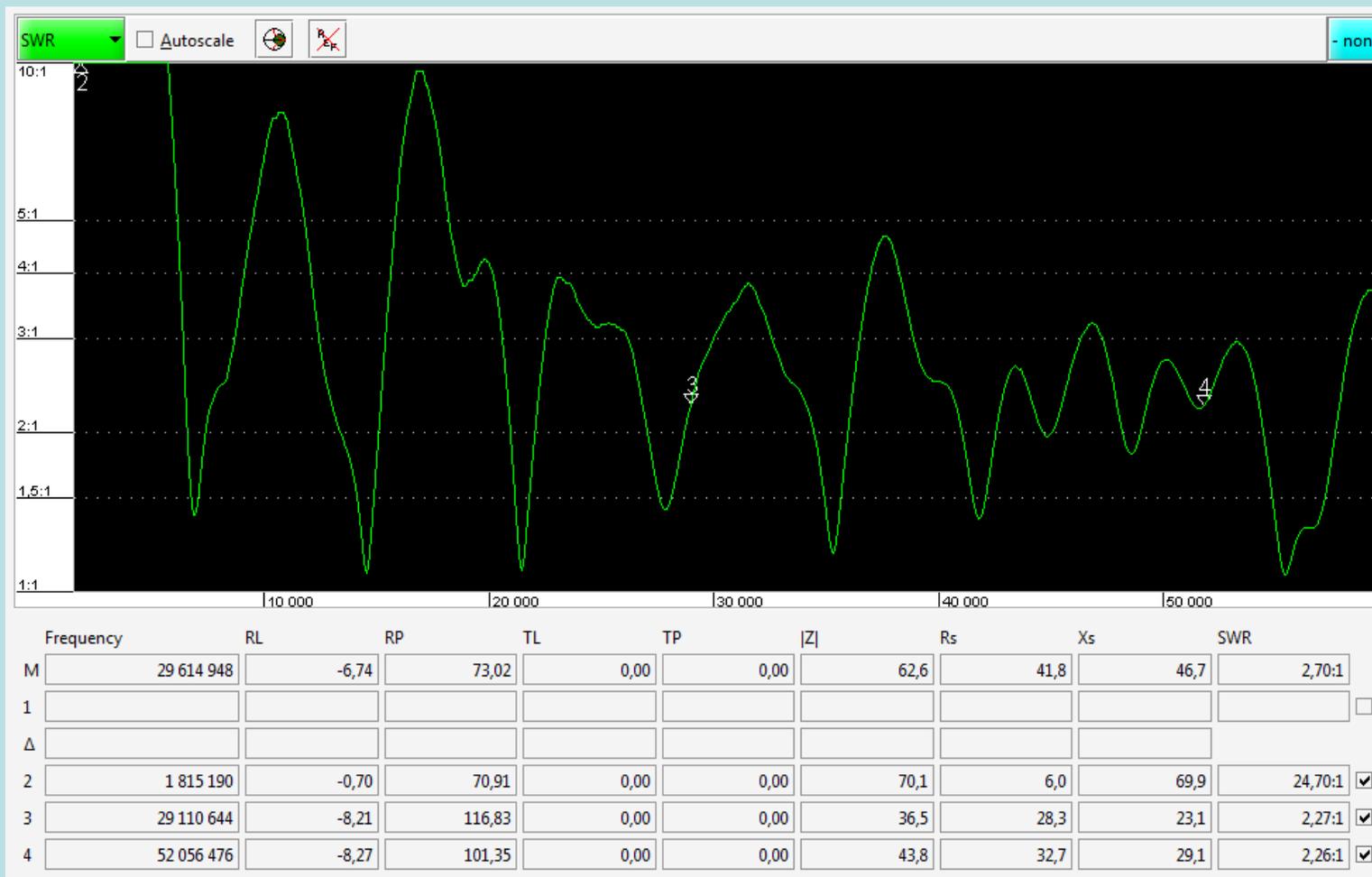
Ex : antennes multibandes, ampli HF, ...

- Symétriser et réduire le mode commun

Réduction du bruit parasite selon configuration,
"redressement" du diagramme de rayonnement d'une antenne, contrôler les impédances d'entrée et de sorties



Exemple d'adaptation d'impédance : deltaloop 42m de périmètre sous 50 ohms





De l'utilité d'un symétriseur ...



Delta loop 42m avec
boîte d'accord plus
symétriseur

Delta loop 42m avec
boîte d'accord sans
symétriseur



Réaliser un transformateur : faut-il bobiner sur un noyau ?

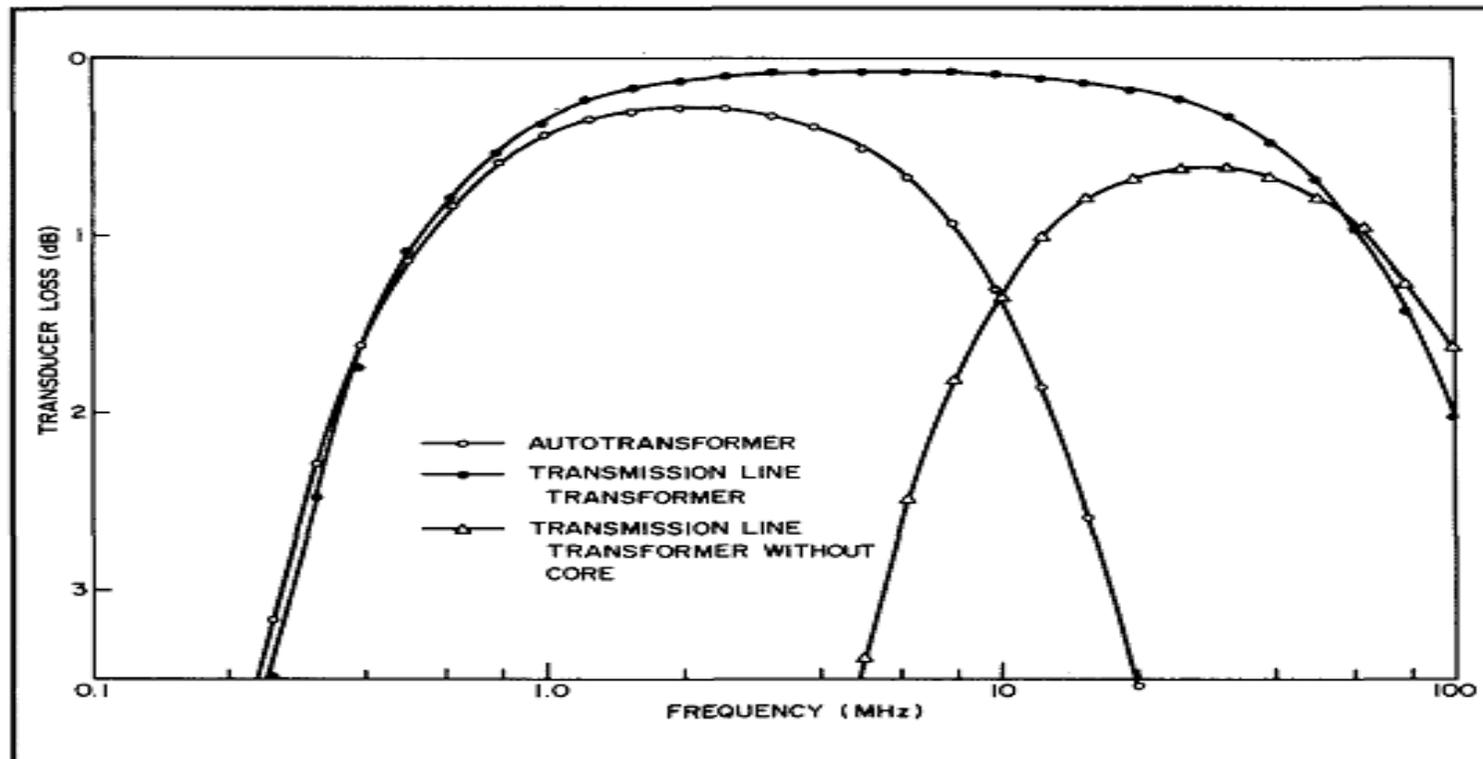
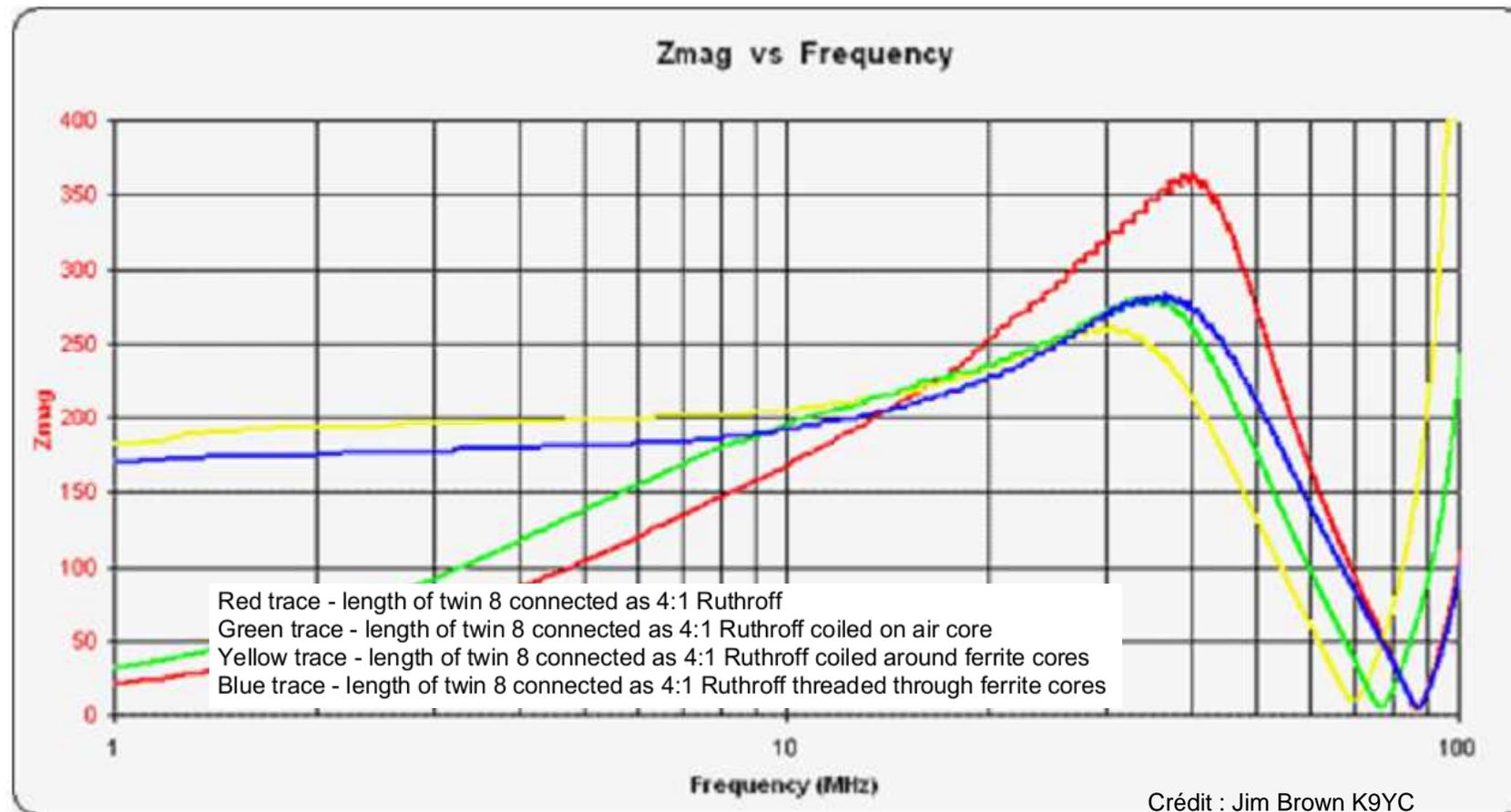


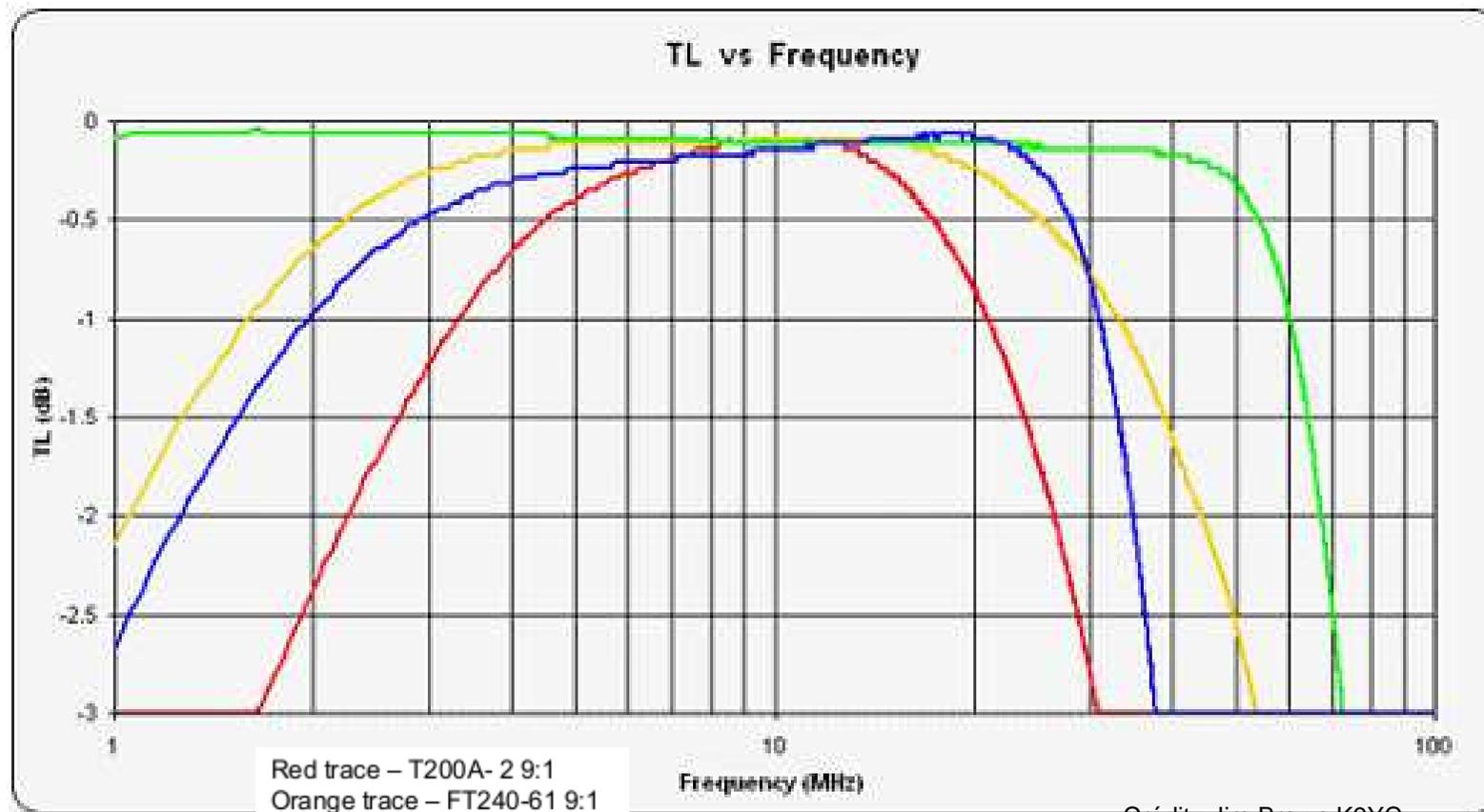
Fig 3-12—Measurements taken on the three transformers in Fig 3-11 when matched at 12.5:50- Ω . Note that the transmission line transformer is superior to the autotransformer both in efficiency and bandwidth.

Crédit : Jerry Sevick W2FMI

Réaliser un transformateur : faut-il bobiner sur un noyau ?



Réaliser un transformateur : ferrite ou poudre de fer ?



Réaliser un transformateur : sur barreau ou sur tore ?

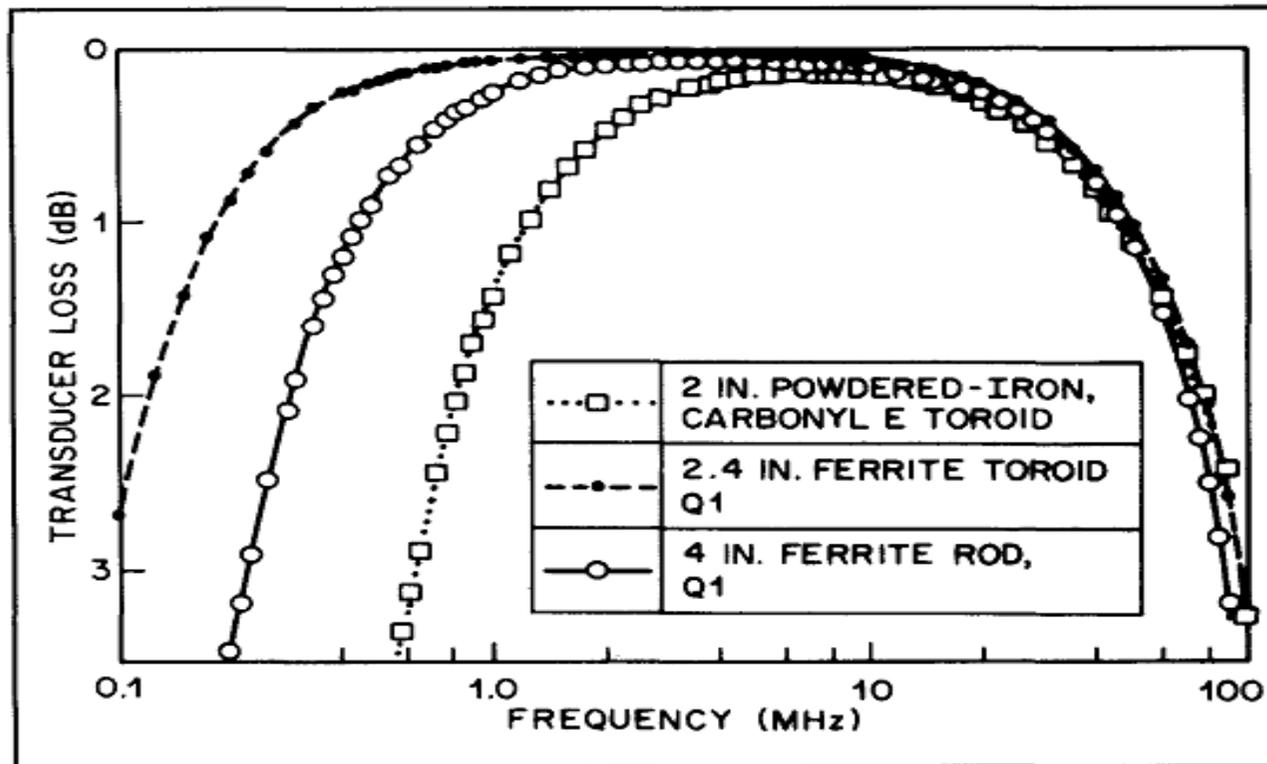


Fig 2-5—Experimental results showing the low-frequency performance of the rod transformer versus the toroidal transformer.

Crédit : Jerry Sevick W2FMI



Identification d'un tore Amidon

	Poudre de fer	Ferrite
Préfixe	T	FT pour les tores ou BN pour les "binoculaires"
dimension	En pouce+ centième de pouce Valeurs courantes : 50, 82 114, 140, 200, 240	
séparateur	tiret	tiret
Mix (nuance de la poudre ou de la ferrite)	1 à 10 2 ou 6 pour utilisation courante	31, 43, 61, 73, 77, ... 43, 61 et 77 sont les plus courants en HF
Aspect visuel	Code couleur Rouge pour mix 2 et jaune pour mix 6	Couleur noire Pas d'identification évidente Si doute -> mesurer
Perméabilité (usuelle)	1 à 10 à +- 5%	100 à 1000 +-20%
Exemple	T200-6	FT114-43

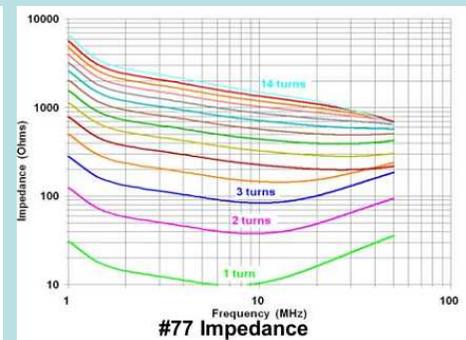
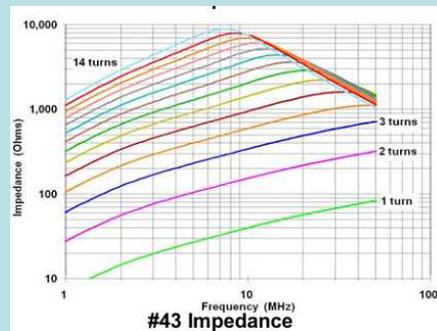


La dimension et le mix sont inversés dans l'identification des ferrites binoculaires; Ex : BN 202 – 43

Autres fabricants : Fair-rite, Ferroxcube, TDK, Allen-Bradley, ... Ils ont leurs propres désignations



Choisir la nuance (mix) de ferrite

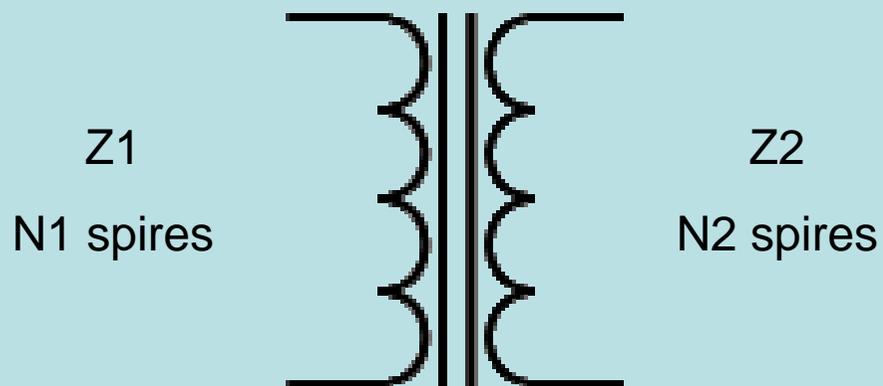


Crédit : Jim Brown K9YC

- Pour les applications HF choisir par ordre de de préférence les mix 31, 43 ou 61
- Pour les applications VHF préférer le mix 61
- Sauf pour les applications basses fréquences, éviter le mix 77



Quelques rappels sur les transfo



$$Z2 = Z1 \times (N2/N1)^2$$

$$U2 = U1 \times (N2/N1)$$

$$I2 = I1 \times (N1/N2)$$



Le dimensionnement du nombre de spires

>>>> Le rapport de transformation est égal au carré du rapport du nombre total de spires côté haute impédance / Nb de spires côté 50 Ohms (ou basse impédance)

Pour le fonctionnement d'une ferrite en très large bande, le rapport 1:10 est une limite.

>>>>L'inductance des bobinages doit être suffisante, pour que leurs impédances à la fréquence MINIMALE d'utilisation soient d'environ 4 fois l'impédance de l'antenne ou de la ligne qu'elle alimente

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$N = 100 \cdot \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

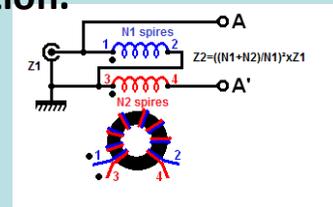
F : fréquence L: inductance X : impédance N: nombre de spires A_L : inductance spécifique

Nota : Avec un rapport d'inductance /impédance de 1.5 seulement , les performances en bandes basses sont un peu dégradées, mais acceptables. Meilleure sont les performances en bande basse, moins les performances en bandes hautes sont bonnes. Il faut donc trouver un juste équilibre.

Ex : Pour un transformateur 1:4 de 50 à 200 Ohms, de 1.8 à 30 MHz, l'impédance côté antenne devra être d'environ 800 Ohms à 1.8 MHz (4 fois 200 Ohms) ou de 200 Ohms coté ligne 50 Ohms.

Choisir de préférence des ferrites avec μ I élevé pour diminuer le nb de spires donc la longueur de ligne et les effets parasites indésirables à haute fréquence (capacité, inductance, ...)

>>>>Sans précaution particulière, la longueur de fil nécessaire au bobinage le plus long ne doit pas être supérieure à 5% de la plus petite longueur d'onde d'utilisation.



Dimensionner son transformateur avec un FT114-43



- Chaque passage de conducteur dans le tore compte pour une spire; il n'existe pas de fraction de spire. On prend donc le nombre de spires arrondi à la valeur supérieure.
- L'inductance du bobinage doit être 4 fois supérieure à l'impédance de la charge ou de la ligne ($XL = 4 \times Z_0$)
- Pour le calcul, on peut prendre indifféremment le primaire ou le secondaire du transformateur (qui donne le même résultat vu les relations entre eux).
- Un site donne toutes les informations avec un calculateur: <http://toroids.info/>
- Avec ce tore, pour 200 ohms à 1.8 MHz, il faut 6 spires

Specs for FT114-43 RF Toroids

T25-2	FB-43-101
T25-6	FT23-43
T30-2	FT37-43
T30-6	FT37-61
T37-0	FT50-43
T37-2	FT50-61
T37-6	FT82-43
T37-7	FT82-61
T44-2	FT114-43
T44-6	FT114-61
T50-1	FT140-43
T50-2	FT140-61
T50-3	FT140-77
T50-6	FT240-31
T50-7	FT240-43
T50-10	FT240-61
T68-1	FT290-43
T68-2	XXX-XX
T68-6	BN-43-2402
T68-7	BN-61-2402
T68-10	BN-43-1502
T80-2	BN-43-302
T80-6	BN-43-202
T80-10	BN-61-202
T94-2	BN-73-202
T94-6	BN-43-3312
T94-10	BN-43-7051
T106-0	BN-61-002
T106-2	
T106-6	
T130-0	
T130-2	
T130-6	
T130-17	
T200-2	
T200-6	
T225-2B	

Physical Dimensions

OD(A) = 1.140 in / 29.0 mm +/- 0.65 mm
 ID(B) = 0.748 in / 19.0 mm +/- 0.50 mm
 Ht(C) = 0.295 in / 7.5 mm +/- 0.25 mm

$A_L = 510 \pm 20\%$ $\mu H = (A_L * Turns^2) / 1000$
 Actual measured AL using 10 turns #28 wire

Temperature Stability (ppm / °C) = 12500

Color Code = shiny black

Application Freq Range
 Wideband Transformers 5 - 400 MHz
 Power Transformers 0.5 - 30 MHz
 RFI Suppression 5 - 500 MHz

Orders and Pricing
www.kitsandparts.com

Turns-Length Calculator for FT114-43
 Includes 1 inch / 2.5 cm pig-tails

MHz	μH	pF	ohms	turns	inches - cm	Calc	Clear
1.800	0.51	15329	5.8	1.0	3.1 - 8.0		

enter μH to Calc number of turns, or
 enter number of turns to Calc μH , or
 enter two (2) items: MHz, μH , pF, ohms or turns to Calc all values.

Dimensionner son transformateur avec un T200-6



- Chaque passage de conducteur dans le tore compte pour une spire; il n'existe pas de fraction de spire. On prend donc le nombre de spires arrondi à la valeur supérieure.
- L'inductance du bobinage doit être 4 fois supérieure à l'impédance de la charge ou de la ligne ($X_L = 4 \times Z_0$) qu'elle voit
- Pour le calcul, on peut prendre indifféremment le primaire ou le secondaire du transformateur (qui donne le même résultat vu les relations entre eux).
- Un site qui donne toutes les informations avec un calculateur: <http://toroids.info/>
- Avec ce tore, pour 200 ohms à 1.8 Mhz, il faut 41 spires (mais il est en dehors de sa fréquence d'utilisation qui est de 3 à 40 MHz)

Specs for T200-6 RF Toroids

T25-2	FB-43-101
T25-6	FT23-43
T30-2	FT37-43
T30-6	FT37-61
T37-0	FT50-43
T37-2	FT50-61
T37-6	FT82-43
T37-7	FT82-61
T44-2	FT114-43
T44-6	FT114-61
T50-1	FT140-43
T50-2	FT140-61
T50-3	FT140-77
T50-6	FT240-31
T50-7	FT240-43
T50-10	FT240-61
T68-1	FT290-43
T68-2	XXX-XX
T68-6	BN-43-2402
T68-7	BN-61-2402
T68-10	BN-43-1502
T80-2	BN-43-302
T80-6	BN-43-202
T80-10	BN-61-202
T94-2	BN-73-202
T94-6	BN-43-3312
T94-10	BN-43-7051
T106-0	BN-61-002
T106-2	
T106-6	
T130-0	
T130-2	
T130-6	
T130-17	
T200-2	
T200-6	
T225-2B	

Physical Dimensions

COLOR CODE

- 1 Blue/Clear
- 2 Red/Clear
- 3 Gray/Clear
- 6 Yellow/Clear
- 7 White/Clear
- 10 Black/Clear
- 12 Green/White
- 15 Red/White
- 17 Blue/Yellow
- 0 Tan

TYPICAL PART NO. T 25 - 10

OD in 100th Inches
Micrometals Mts No.
Letter Indicates Alternate Height

OD = 2.0 in / 50.8 mm +/- 0.025 in
ID = 1.25 / 31.8 mm +/- 0.025 in
Ht = .550 / 14.0 mm +/- 0.03 in

$A_L = 10.4 \pm 5\%$ $uH = (A_L * Turns^2) / 1000$

Temperature Stability (ppm / °C) = 35

Color Code = Yellow / Clear

Optimum Resonant Circuit Range
for highest Q and lowest core loss
3 MHz - 40 MHz

Orders and Pricing
www.kitsandparts.com

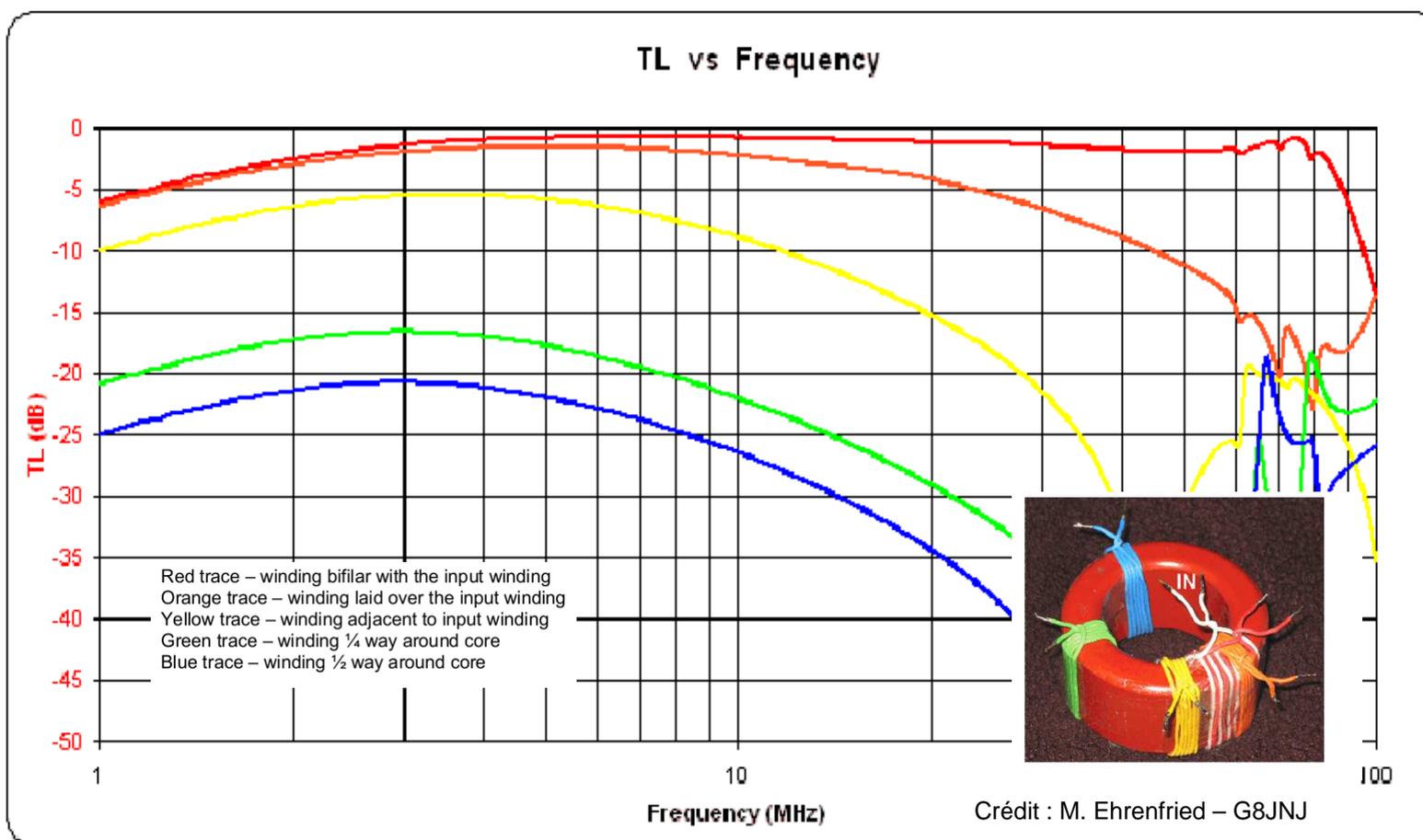
Turns-Length Calculator for T200-6
Includes 1 inch / 2.5 cm pig-tails

MHz	uH	pF	ohms	turns	inches - cm	Calc	Clear
1.800	1.04	7517	11.8	10.0	23.0 - 58.4	Calc	Clear

Enter uH to Calc number of turns.
Enter number of turns to Calc uH.
Enter 2: MHz, uH, pF, ohms or turns to Calc all values.



Comment réaliser les couplages ?





L'adaptation de ligne

Pour obtenir une bonne (grande) bande passante la ligne utilisée pour bobiner le tore doit présenter une impédance caractéristique adaptée

- L'impédance caractéristique de la ligne Z_c dépend de l'impédance d'entrée Z_e et de l'impédance de sortie du transformateur Z_s selon l'équation:

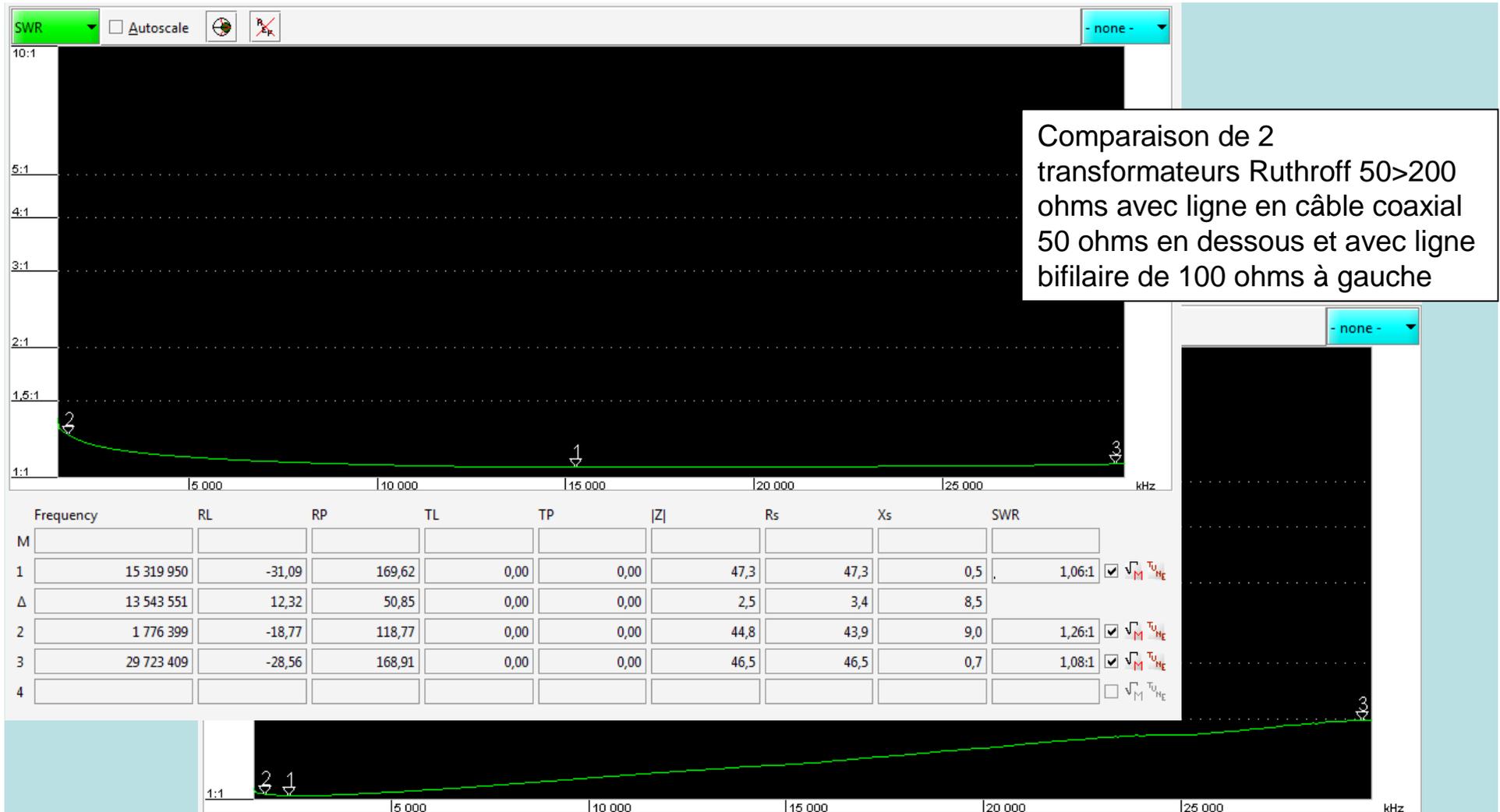
$$Z_c = \sqrt{Z_e \cdot Z_s} \Leftrightarrow Z_s = \frac{Z_c^2}{Z_e}$$

Exemple : pour un transformateur 200 ohms > 50 ohms la ligne doit avoir une impédance caractéristique de racine (50 x 200) = 100 ohms

- Il en résulte qu'un transformateur 12.5 > 50 ohms n'est pas interchangeable avec un transfo 50>200 ohms et donc que les transformateurs large bande ne sont pas utilisables sans précaution (balun magnétique par exemple).
- Une ligne mal adaptée a pour conséquence une augmentation sensible des pertes et du ros dans les bandes hautes
- Il est difficile de réaliser des lignes d'impédance caractéristique supérieure à 150 ohms ce qui est une des raisons de la limitation des rapports de transformation possibles sous 50 ohms



L'adaptation de ligne



Pertes consécutives à une ligne d'impédance caractéristique inadaptée

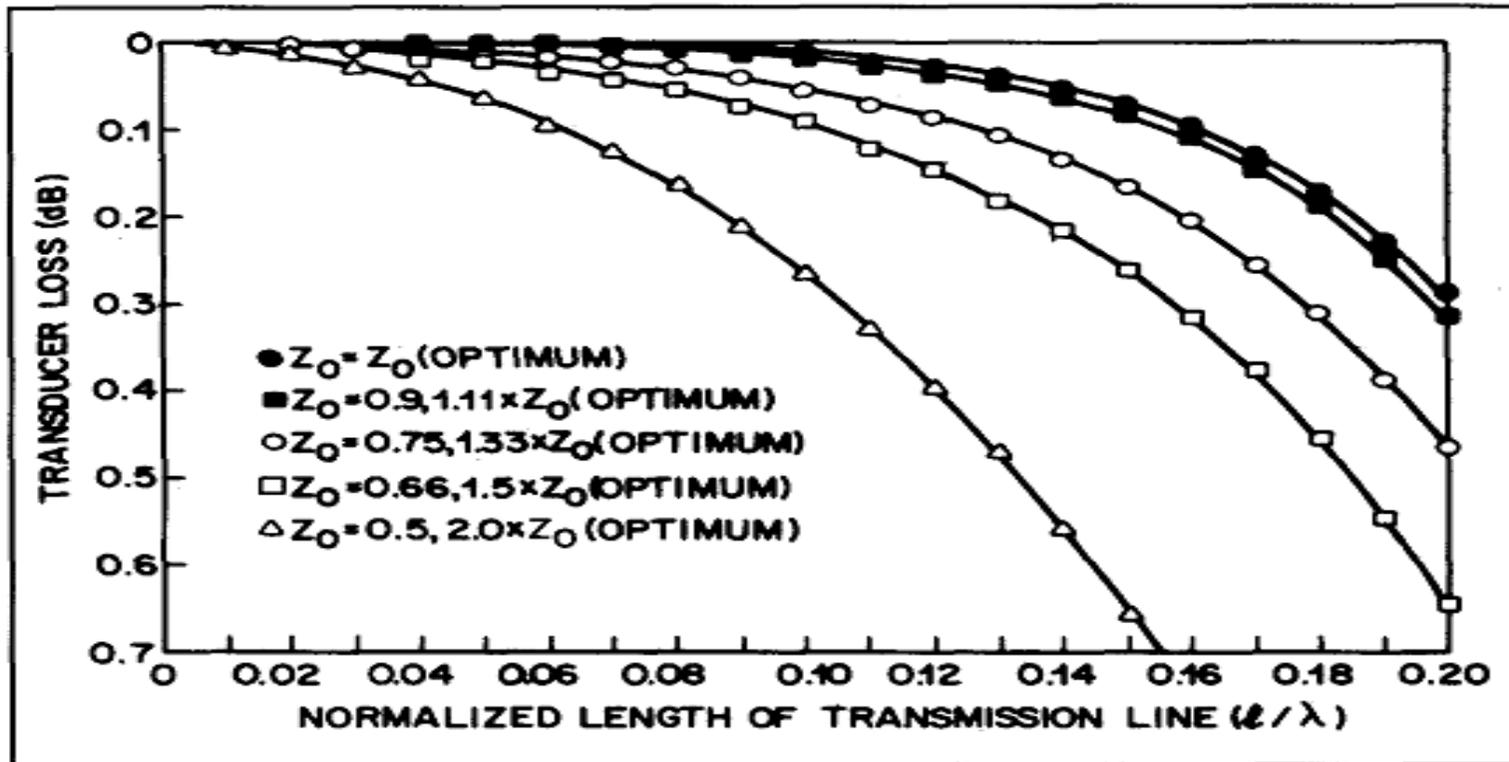


Fig 1-4—Loss as a function of normalized transmission line length in a Ruthroff 1:4 unun for various values of characteristic impedance, Z_0 .

Crédit : Jerry Sevick W2FMI



Réaliser une ligne d'impédance fixée

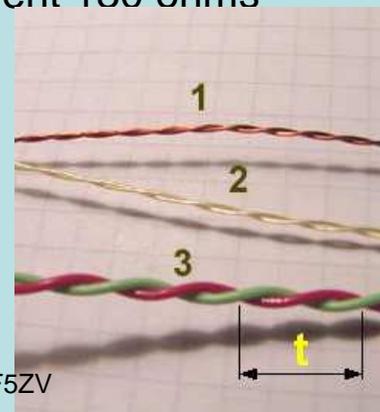
- Pour un impédance de 50 ohms ou de 75 ohms on peut utiliser du coax
- Avec du fil émaillé :
 - 2 fils côte à côte : 70 à 100 ohms selon le diamètre
 - 2 fils torsadés : on peut diviser l'impédance par 2 selon le pas de la torsade
- Avec du fil de câblage souple ou à wrapper
 - 2 fils cote à cote : 150 à 170 ohms(difficile à mettre en œuvre)
 - 2 fils torsadés : on peut descendre à 100 ohms
- **Fils** scindex, câble en nappe informatique, câble d'alimentation ...: souvent 130 ohms

On peut combiner des fils (ex: 2 coax en parallèle ou en série)

Ces valeurs sont données à titre indicatif -> il faut mesurer !

Les pertes dans les fils torsadés sont importantes (jusqu'à 0.4 dB/m à 14Mhz !)

Il est difficile de réaliser des lignes d'impédance supérieure à 150 Ohms

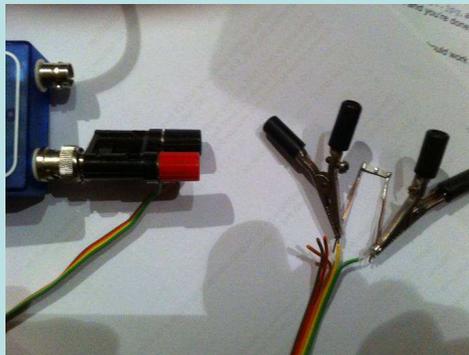


Crédit photo : F5ZV

Comment mesurer l'impédance d'une ligne

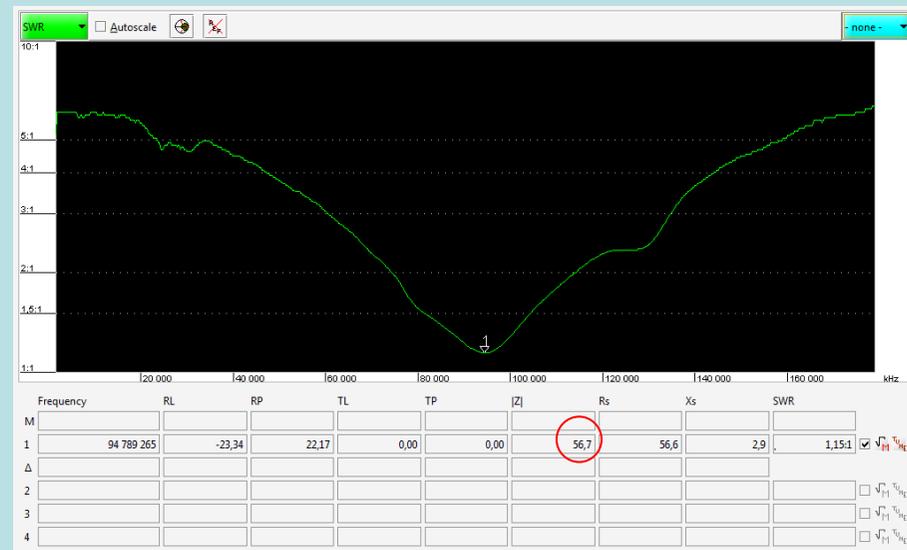


1. Réaliser une ligne la plus longue possible (pour diminuer les incertitudes de mesure mais on y arrive avec 40 cm ...)
2. Brancher le VNA d'un coté de la ligne et une résistance Z_s de valeur connue de l'autre
3. À la première valeur minimale de ROS à partir des fréquences basses relever l'impédance Z_e indiquée par le VNA
4. Calculer l'impédance Z_c de la ligne telle que $Z_c^2 = Z_e \times Z_s$



Exemple de mesure de ligne avec une résistance de 300 ohms

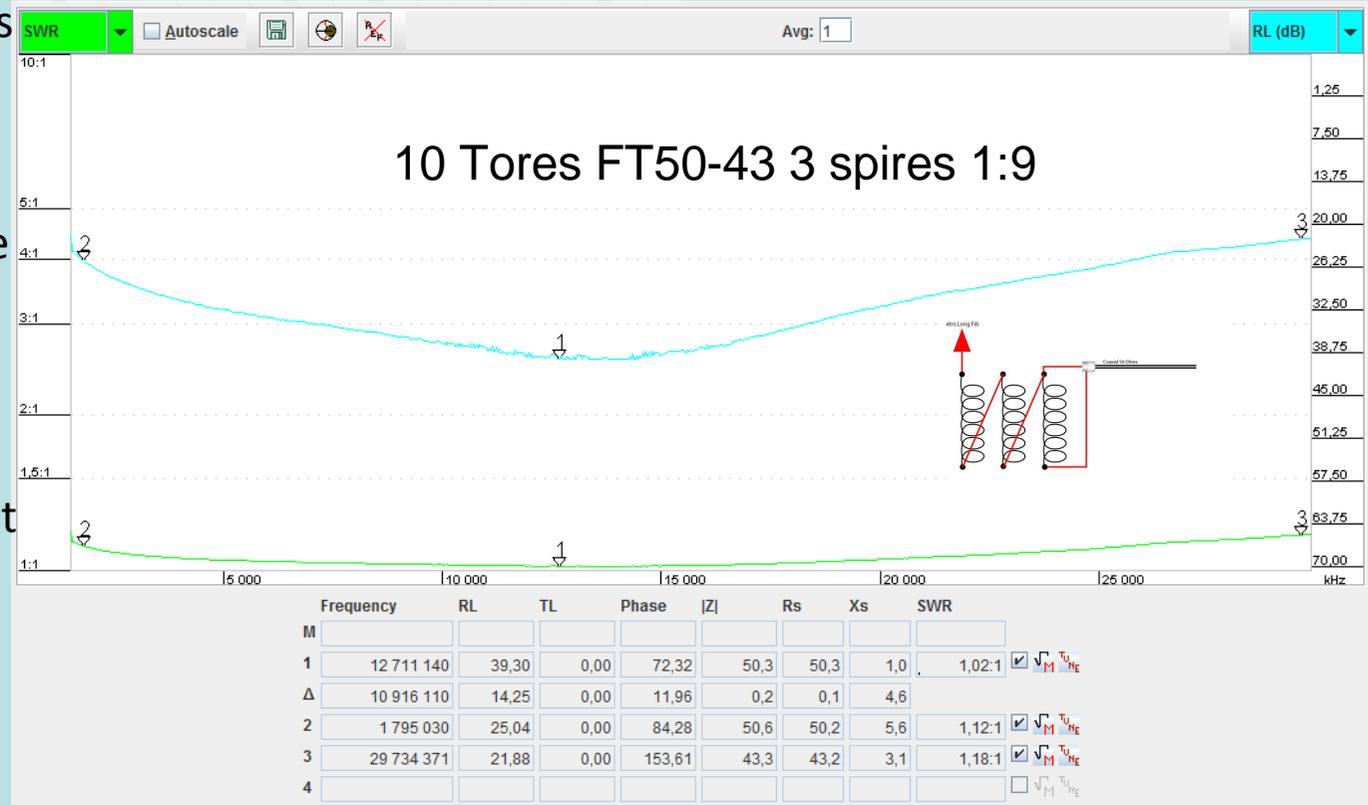
L'impédance de la ligne est de racine $(300 \times 56.7) \sim 130$ ohms



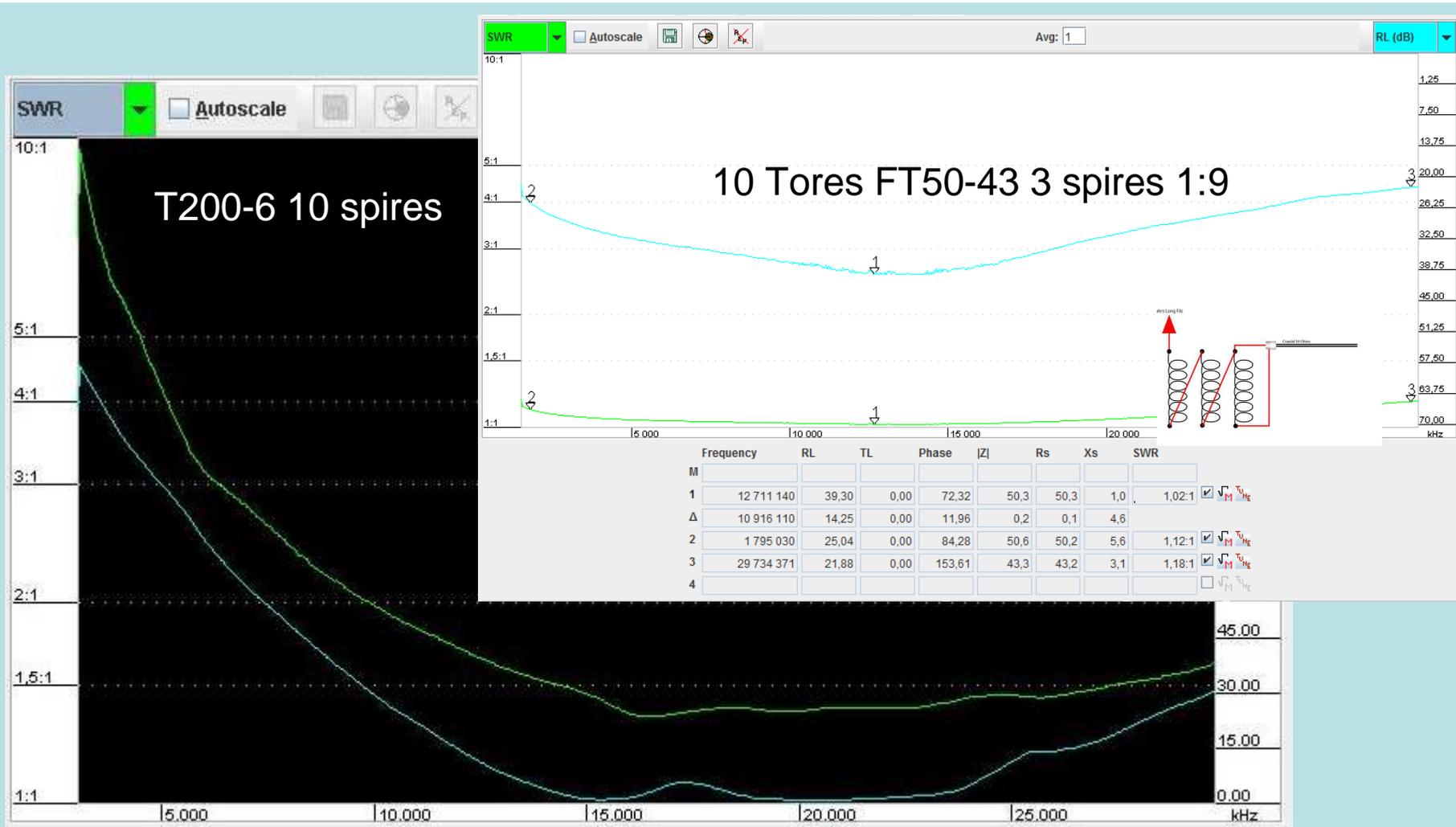


Le balun magnétique

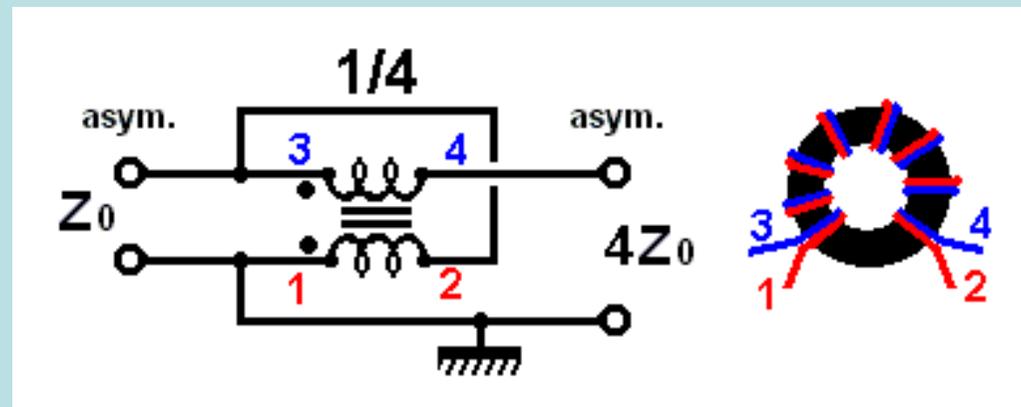
- N'est pas un balun mais un transformateur de tension asymétrique 1:9
- N'a rien de magnétique (sauf son tore 😊)
- Nécessite d'avoir une charge d'impédance résistive pour un fonctionnement correct sinon importantes pertes joule
- A réaliser à l'aide de ferrite et non de poudre de fer



Le balun magnétique poudre de fer vs ferrite

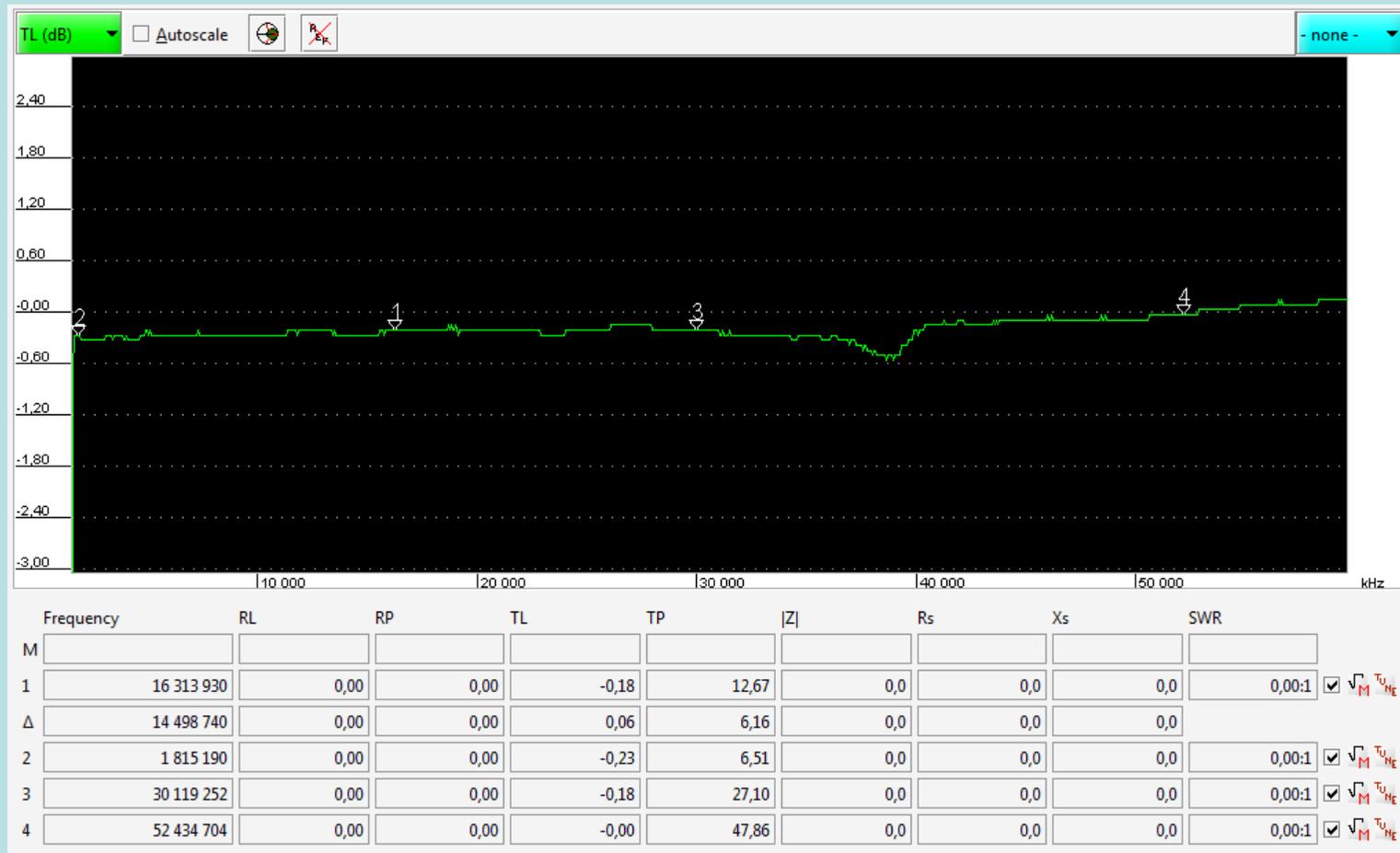


Le transformateur de tension 1:4 de Ruthroff



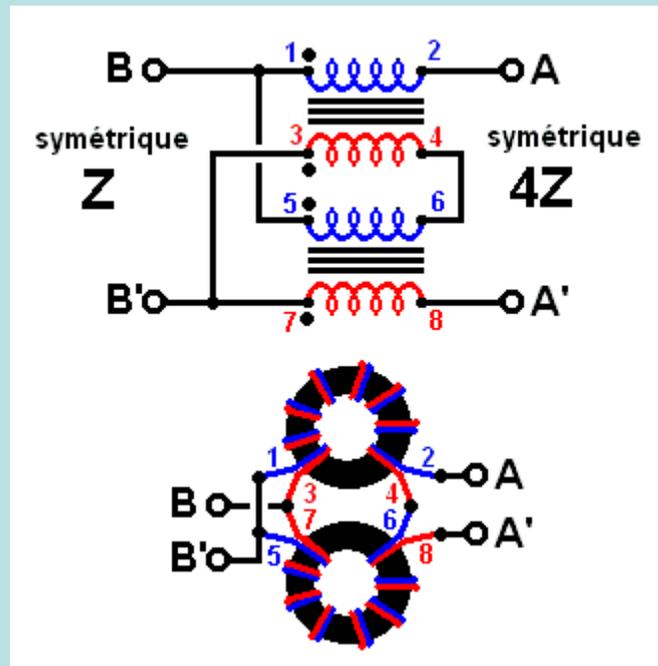
- Impédance caractéristique de ligne pour $50 > 200$ ohms : 100 ohms

Le transformateur de tension 1:4 de Ruthroff perte de 2 transfos dos à dos



Transformateur de ligne 1:4

Le transformateur de ligne de Guanella



- Faibles pertes, grande bande passante et bonne résistance aux charges hors spécifications
- Ne peut relier deux charges asymétriques sans l'adjonction d'un autre balun
- Nécessite 2 ou plusieurs tores selon configuration



Un transformateur de ligne 1:4 de Guanella



ROS d'un transformateur de ligne 50:200 compensé sur charge 200 ohms



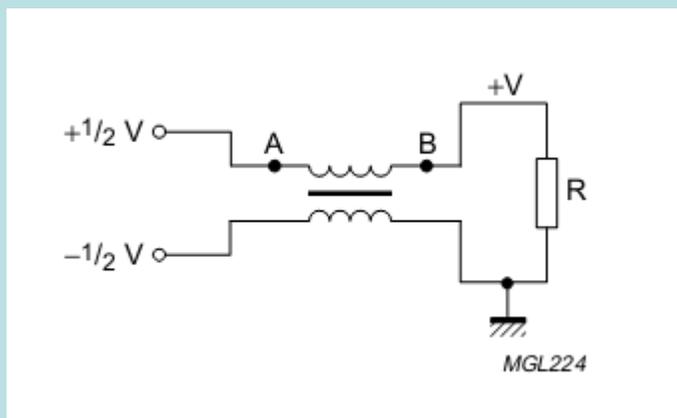
Symétrique vs symétriseur

- Est dit **symétrique** (balanced) un dipôle dont chaque pôle présente une impédance identique vis-à-vis de la terre (masse, ...)
- Est dit **symétriseur** un quadripôle qui assure (ou rétablit) dans une certaine mesure la symétrie du dipôle de charge quelque soit la symétrie du dipôle de source

>>> symétrique ne veut pas dire symétriseur !



Symétriseur



L'impédance caractéristique de ligne étant généralement de 50 ohms, il est pratique de bobiner un coax sur le tore.

On construit simultanément un "choke balun" qui réduit le mode commun de l'antenne

L'impédance requise d'un choke balun est de 1000 ohms voire 5000 ohms selon certaines sources

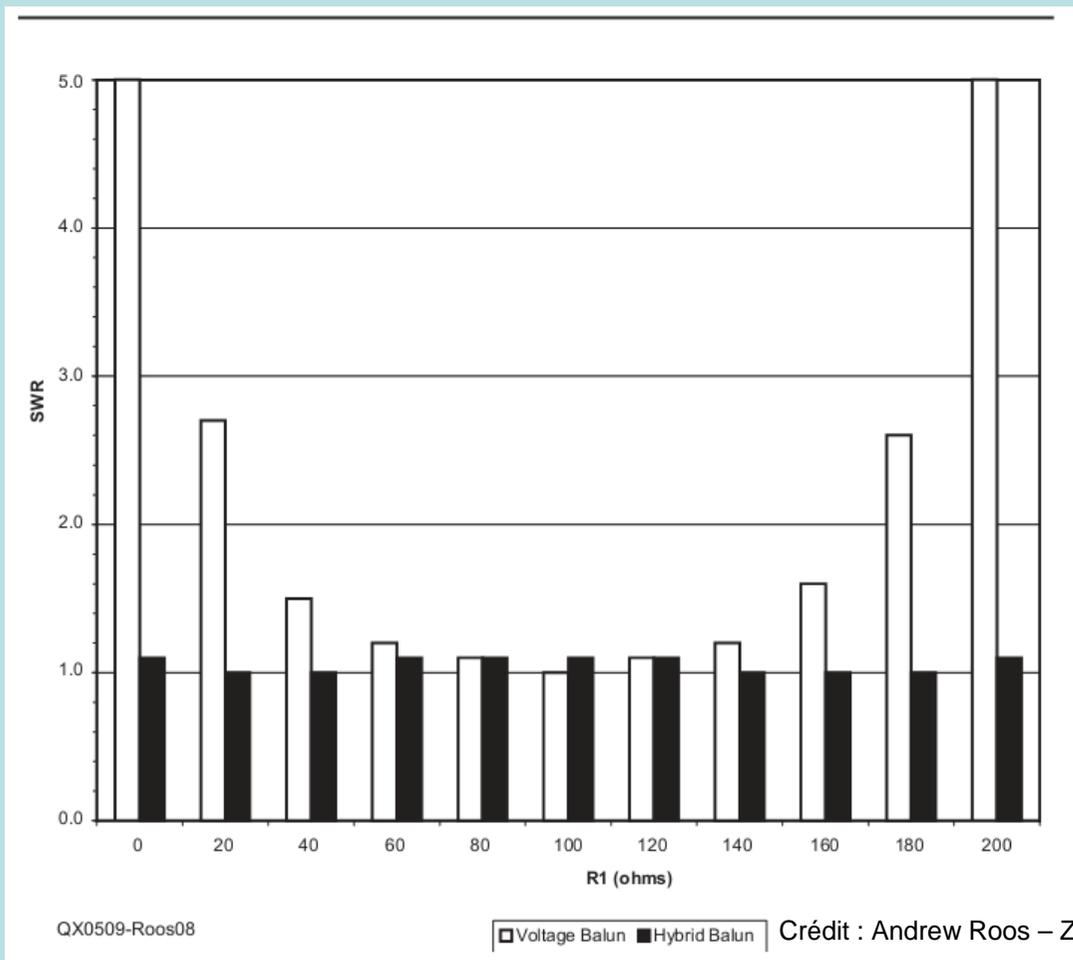
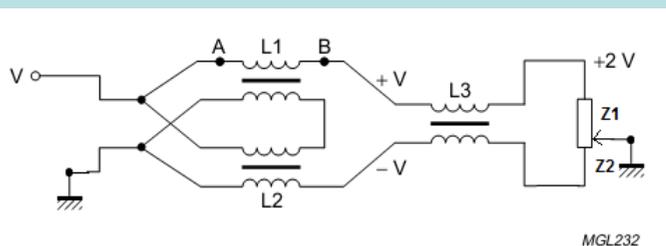
Il est plus efficace de réaliser un symétriseur sur des lignes d'impédance caractéristique faible



Tester la fonction symétriseur

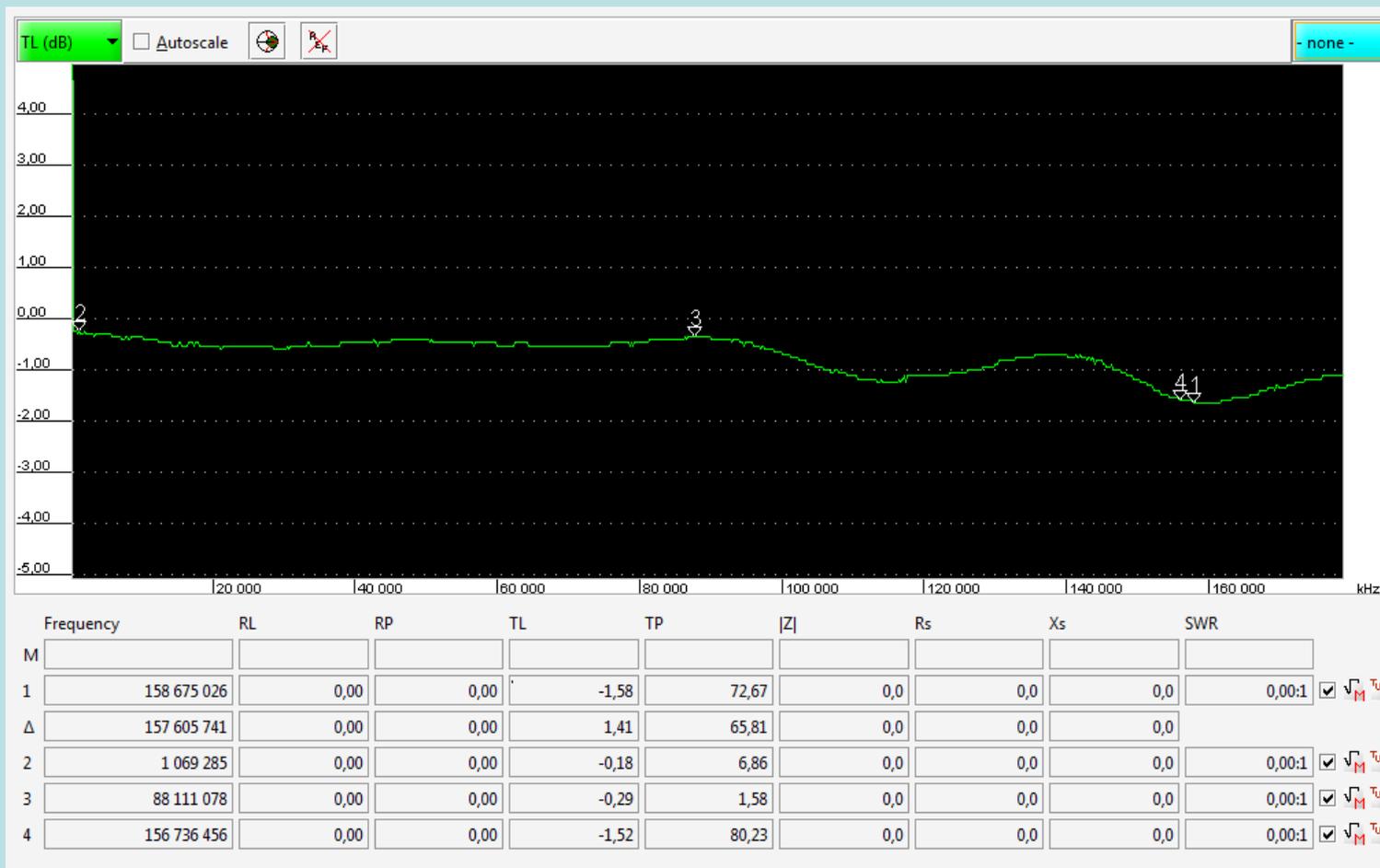
On fait varier $Z1/Z2$ en maintenant l'impédance de charge $Z1+Z2$ constante

Résultats en blanc : sans symétriseur et résultat en noir avec symétriseur





Pertes d'un symétriseur



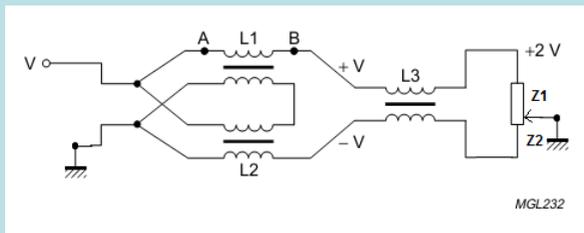
9 spires coax RG58 sur FT114-43

Resistance à la dissymétrie d'un balun 1:4 (2 x 9 FT50-43 3 spires) + balun 1:1 (9 spires sur FT114-43)



A gauche : $Z1=Z2=100$ ohms

Ci-dessous : $Z1=0$



Impédance d'un choke balun vs F

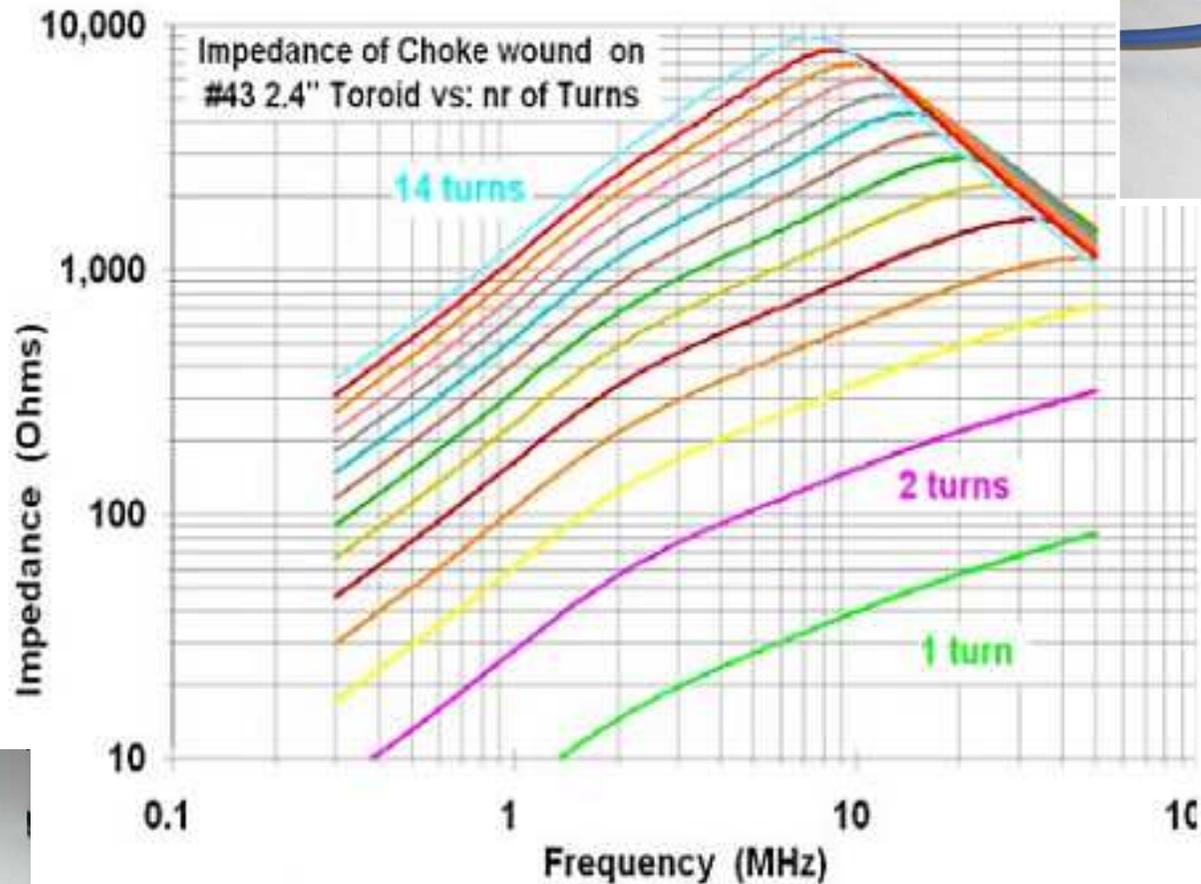


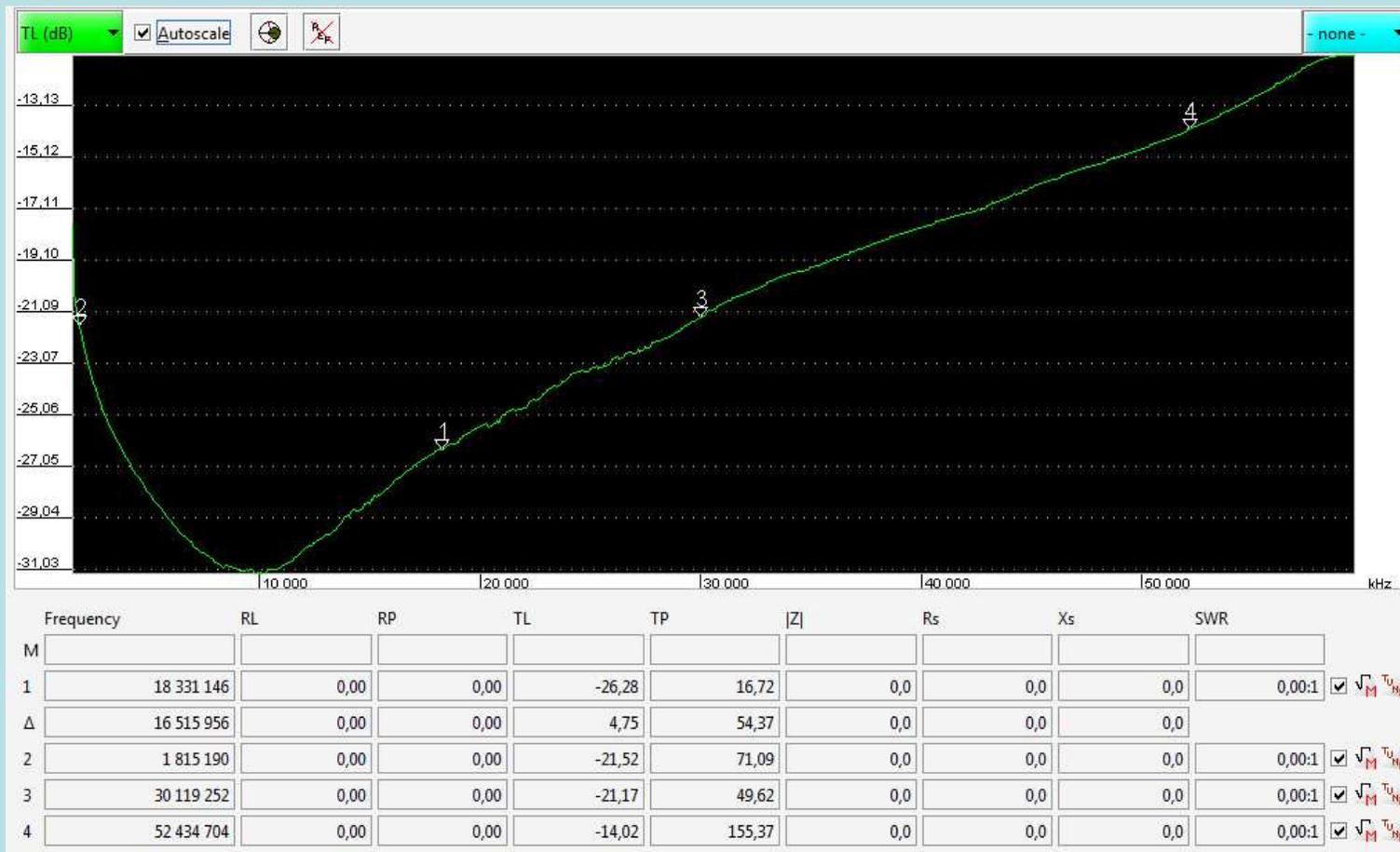
Fig 10 – Impedance of multi-turn chokes wound on the core of Fig 4 (Fair-Rite #43). (Measured data)

Crédit : Jim Brown K9YC





Impédance d'un choke balun

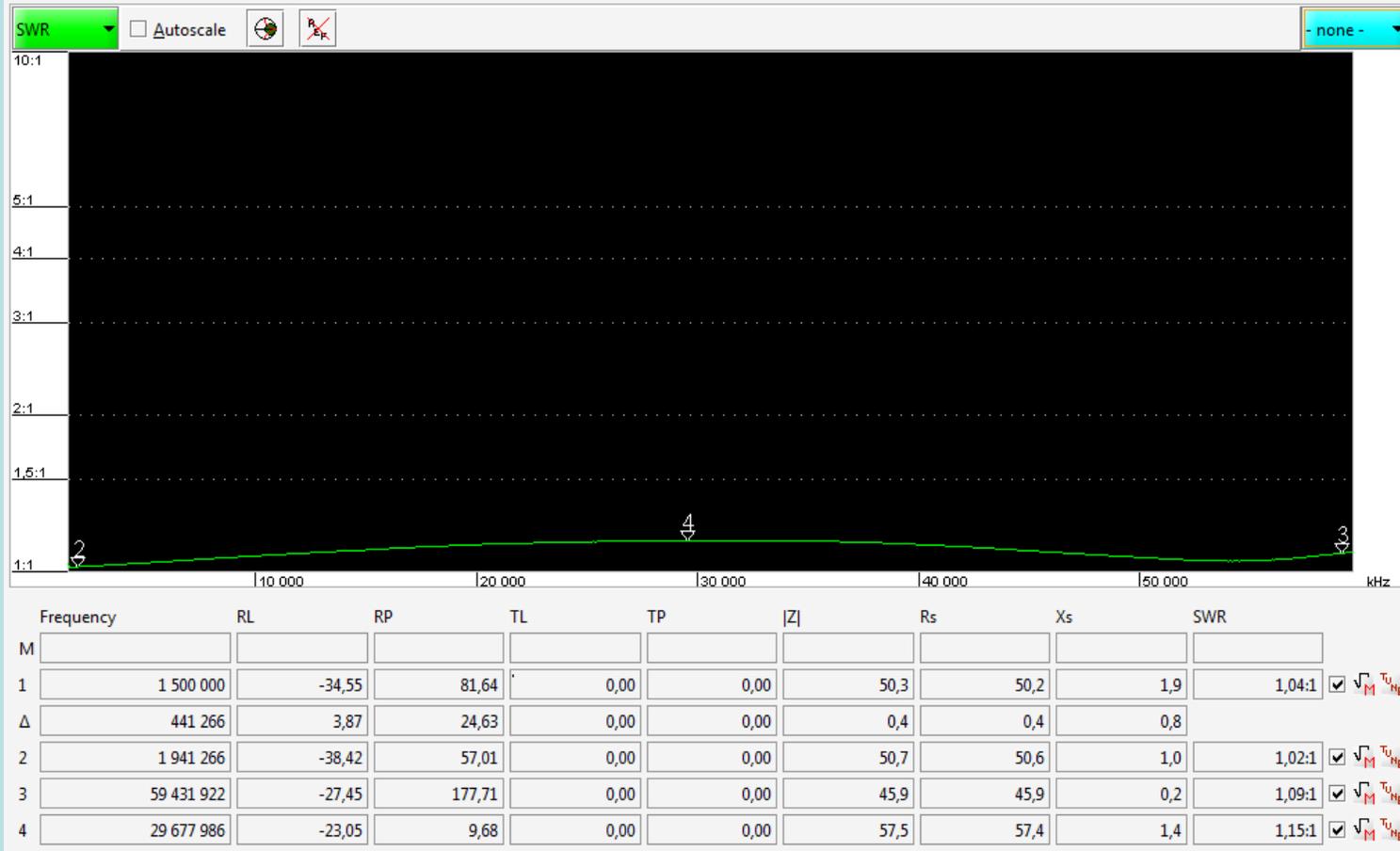


3 X BN43-202 en série avec 3 spires chacun

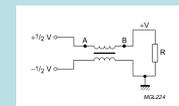
Plus de 1000 ohms de 1.8 à 30 mhz et 3440 Ohms à 10 mhz

Symétriseur ou choke balun

ROS sous 50 Ohms

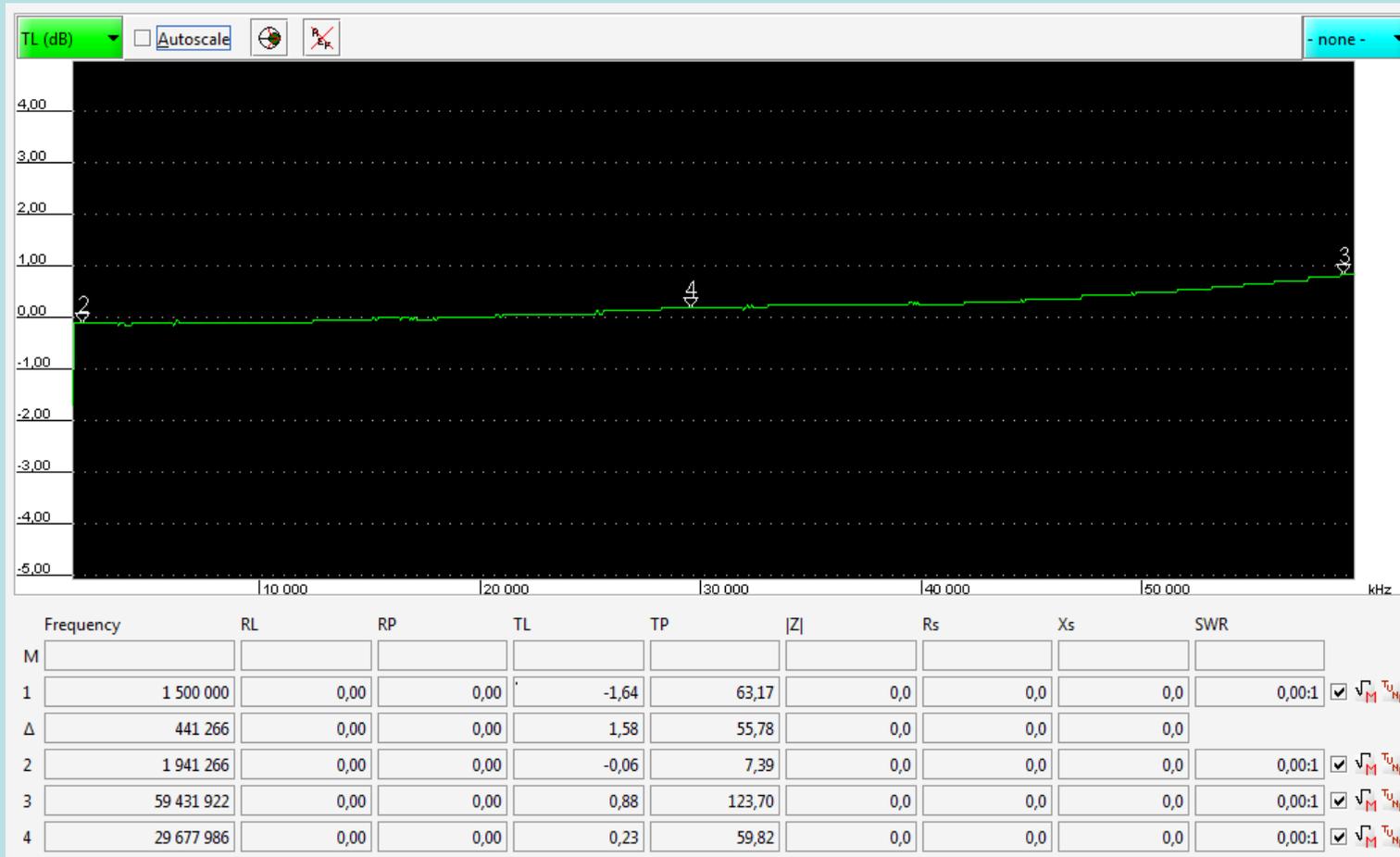


14 spires de coax 50 ohms sur tore FT140-43 sous charge de 50 ohms

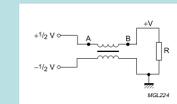


Symétriseur ou choke balun

Pertes de transmission (TL)

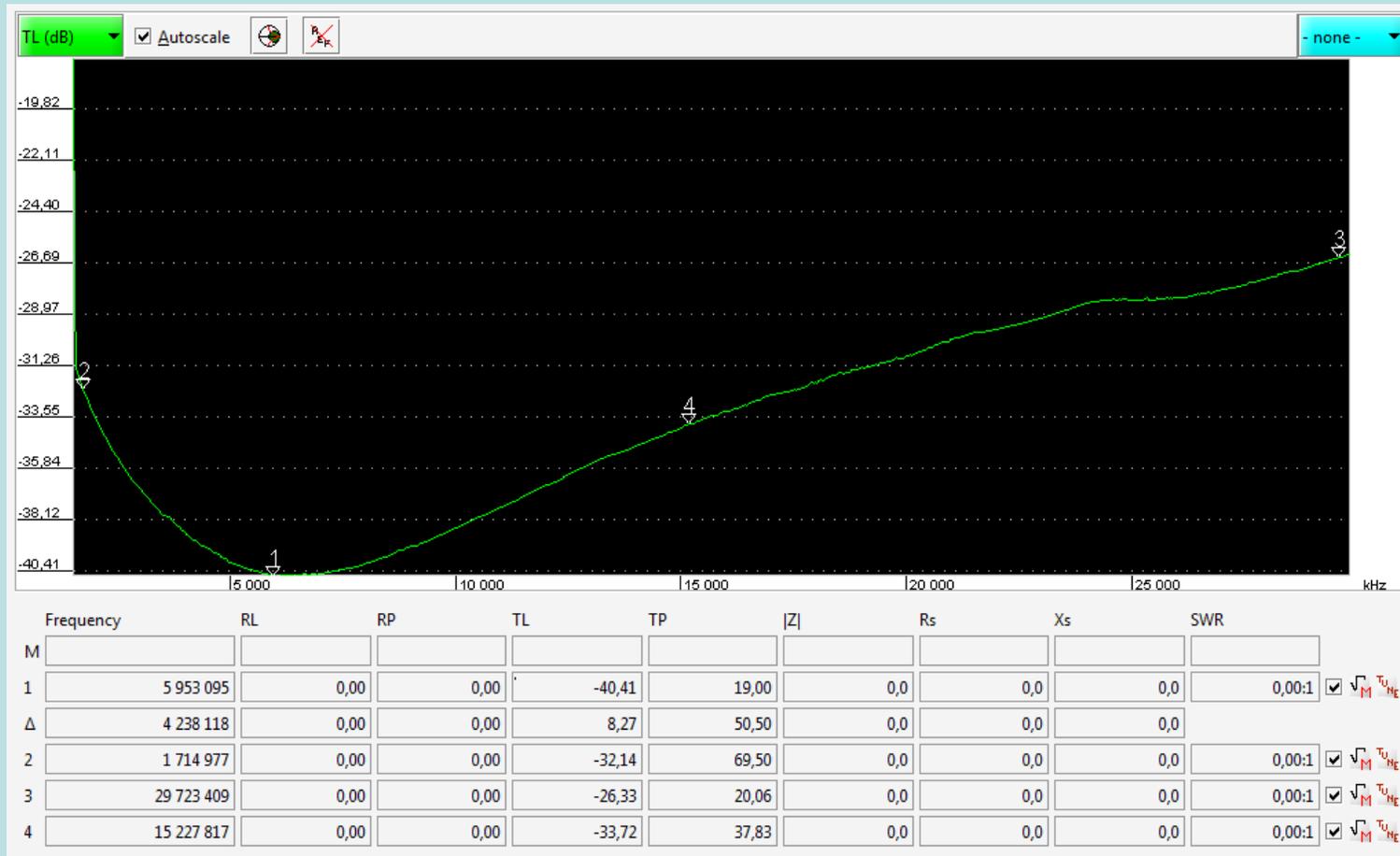


14 spires de coax 50 ohms sur tore FT140-43



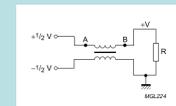
Symétriseur ou choke balun

Impédance en mode commun



14 spires de coax 50 ohms sur FT140-43

Plus de 1800 ohms de 1.8 à 30 MHz - Plus de 3800 ohms de 1.8 à 18 MHz – Plus de 10 000 ohms à 6 MHz





Les clés d'une bonne conception d'un transformateur HF large bande

- Définir les impédances d'entrée, les impédances de sortie et le rapport de transformation
- Choisir le tore de ferrite et le nombre de spires requis (compromis)
 - Inductance mini de 4 fois l'impédance à traiter à la fréquence la plus basse (le plus de spire possible ...)
 - Longueur de ligne inférieure à 5% de la longueur d'onde la plus courte (ligne la plus courte possible pour une bande la plus large possible ...)
- Bobiner le tore avec une ligne d'impédance adaptée
- Vérifier la réalité:
 - du rapport de transformation
 - des faibles pertes
 - de la qualité de la bande passante escomptée
 - De la non saturation du tore (échauffement si ferrite, calcul si poudre de fer)
- Compenser la ligne si nécessaire et si possible



Tester son transformateur

- Quelques pistes :
 - Vérifier le rapport de transformation attendu (ROS sous impédance de test)
 - Vérifier les pertes (TL)
 - Vérifier la tolérance du transformateur aux charges en dehors des valeurs nominales (ROS à $\pm 50\%$ de l'impédance de test, ...)
 - Vérifier la saturation (calcul pour tore poudre de fer) et test sous charge pour tous les types

Vérification de la non saturation du tore



On effectue le calcul à la fréquence d'utilisation la plus basse

Formule pour calculer l'induction B maximale en gauss (10 gauss = 1 millitesla)

$$B = \frac{100 \cdot U}{4.44 \cdot f \cdot N \cdot S} + \frac{N \cdot I_{DC} \cdot A_L}{10 \cdot S}$$

avec :

U : tension efficace appliquée au bobinage

f : fréquence en MHz

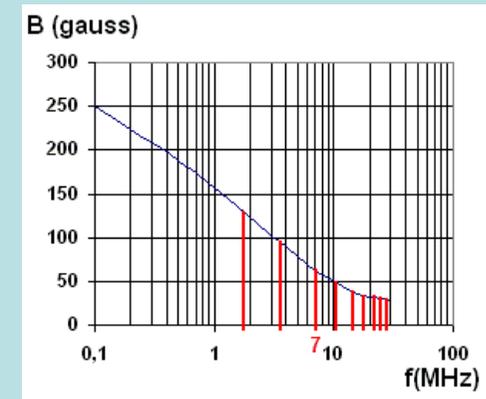
S : section du tore en cm²

N : nombre de tours de l'enroulement

IDC : courant continu traversant l'enroulement

AL : inductance/tour (voir tableau de caractéristiques du tore concerné)

On compare la valeur de l'induction calculée pour la fréquence f avec la courbe ci-contre (les traits rouges repèrent les bandes amateur) et si l'induction calculée dépasse la valeur limite admissible, il faudra choisir un tore de dimensions supérieures et effectuer à nouveau le calcul.



Extraits du site de F5ZV

Pour des tores en ferrite, la vérification du bon comportement (pas d'échauffement) sur charge fictive est souvent suffisante (attention cependant aux configurations avec Ros élevé)



Diminuer la saturation du tore

- Eviter les courants dans les lignes (alimentations fantômes, courant de polarisation,)
- Augmenter le nombre de spires
- Choisir un matériau à perméabilité plus grande
- Empiler les tores (ce qui augmente la section)

Ce que ne fera jamais un transformateur large bande



- Améliorer le ROS (sauf si le transfo fait partie du système d'adaptation - ex : transfo 1:4)
- Arrêter un coup de foudre pour protéger votre installation
- Améliorer la bande passante de votre antenne sauf s'il présente des pertes (ex : balun magnétique avec tore poudre de fer)



Cas d'emploi de courant de gaine

- Contrairement à un croyance, on peut être intéressé à avoir un courant de gaine :
 - Carolina Windom
 - Dipôle 50/75 ohms alimenté par l'extrémité (end fed resonant feedline dipole)

Ce que ne supporte pas un transfo large bande



- Des impédances hors cahier des charges et en particulier les impédances réactives
- Votre ATU utilisé sans analyse critique (à utiliser uniquement pour ajuster légèrement le ROS)



Conclusion

- L'usage de ferrite permet de réaliser des transformateurs HF large bande avec de très bonnes performances lorsque ses règles de construction sont respectées (par ex: adaptation des impédances caractéristiques de ligne)
- Dans ce cas d'emploi, elle présente des avantages incontestables sur la poudre de fer qui est adaptée à d'autres cas d'application
- Il faut cependant bien maîtriser les conditions d'emploi car dans le cas contraire le tore ferrite offrira de mauvais résultats dans les situations de:
 - Lignes non adaptées (diminution de la bande passante)
 - Impédances de charges non-conformes au dimensionnement prévu
 - charge réactive (perte joule dans le tore)
- Le transformateur de courant (Guanella) est plus performant et plus tolérant aux conditions non maîtrisées que le transformateur de tension (Ruthroff) mais au prix d'une complexité plus grande (schéma moins intuitif, usage de plusieurs tores, bobinages plus importants ...)



Bibliographie

- Des lectures sérieuses dans lesquelles on apprend inévitablement quelque chose :
 - Transmission Line transformer - Jerry Sevick
 - A Simplified Analysis of the Broadband Transmission Line Transformer - Jerry Sevick
 - The design of Ruthroff broadband voltage transformers – M. Ehrenfried – G8JNJ
 - Design of HF wideband power transformers – Note d'application Philips
 - <http://toroids.info/> pour caractéristiques et calculateur de tores
 - Site de F1FRV <http://f1frv.free.fr/> (explications et tableurs)
 - Site de F5ZV <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM07/RM07j/RM07j05.html> (explications)



Et merci mini-Vna !



Crédit : F6CRP