

2019

Radio Club de l'Avesnois F6KTN

Lignes de transmission

Généralités	3
Les différents types de lignes.....	3
La ligne bifilaire	3
La ligne coaxiale	4
Les guides d'ondes	5
Propagation des ondes dans un guide d'onde rectangulaire.....	6
Lignes symétriques et asymétriques	7
Lignes symétriques	7
Lignes asymétriques	7
Transfert d'énergie dans les lignes.....	8
Quelques formules	9
Ondes progressives et ondes stationnaires dans les lignes	10
Impédances et propagation dans une ligne.....	10
Formules du coefficient de réflexion	11
Lignes de Lécher	12
Lignes quart d'onde.....	12
Propriétés	12
Utilisations en circuit coupe bande	13
Ligne demi onde.....	14
utilisation en couplage	14
Ligne adaptée	15
Caractéristiques des tronçons de ligne $\lambda/2$, $3\lambda/8$, $\lambda/4$, $\lambda/8$.....	16
Ligne ouverte	16
Ligne fermée	18
Cas pratique d'adaptation par simple Stub	19
Liaison par un coaxial adapté à une charge	21
Liaison par un coaxial non adapté à une charge.....	22

Généralités

Une ligne de transmission est un support physique (cuivre, fibre, guide d'onde...) permettant le passage d'un signal entre un émetteur et un récepteur. Cette présentation concerne la transmission d'un signal sinusoïdal, et non pas d'un signal continu ou d'un signal impulsionnel.

Les différents types de lignes

La ligne bifilaire

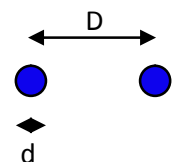
Appelée *twin-lead* dans la littérature anglo-saxonne, Elle est constituée de deux lignes de diamètres identiques, conductrices et parallèles. L'impédance caractéristique des lignes bifilaires est de quelques centaines d'ohms. Elle doit être installée loin de toute masse métallique. Les lignes étant relativement éloignées l'une de l'autre, les pertes de transmission (atténuation) sont plus faibles que dans une ligne coaxiale. C'est la ligne de transmission la moins chère.

Les lignes bifilaires sont des alimentations symétriques. Elles sont utilisables surtout sur des fréquences inférieures à 100 MHz.



ligne bifilaire de 300 Ω

L'impédance d'une ligne bifilaire se calcule avec la formule approchée suivante :


$$Z = 276 \cdot \log \frac{2D}{d}$$

La ligne coaxiale

Elle est constituée de conducteurs coaxiaux. Le conducteur central s'appelle l'âme, le conducteur extérieur s'appelle la tresse. L'impédance varie de 20 à 80 ohms. Ces lignes coaxiales sont peu sujettes aux perturbations extérieures.

Elles sont utilisables sur des fréquences inférieures à 5 GHz, mais il existe des coaxiaux spéciaux jusque 40 GHz.

Les câbles flexibles sont constitués d'une âme multibrins, les câbles rigides d'une âme monobrin.

Les câbles multibrins sont légèrement plus atténuants que leurs versions monobrin.



LMR600 ULTRAFLEX : âme multibrins



LMR600 rigide : âme simple brin

Les guides d'ondes

Les guides d'onde sont des tubes creux dont les dimensions sont calculées pour la fréquence à transmettre. Il existe des guides d'onde rectangulaires (les plus répandus), ronds et carrés, rigides ou flexibles. Ils s'utilisent sur des fréquences de 500 MHz à 500 GHz. Les guides d'onde sont terminés par des brides normalisées permettant de les assembler avec des vis et des écrous.



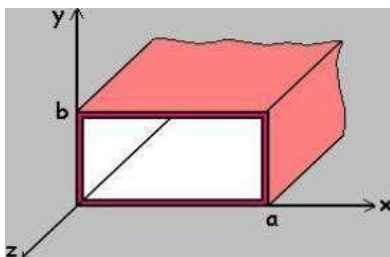
Il existe des éléments d'adaptation pour passer des guides d'ondes aux connecteurs coaxiaux. On les appelle des *transitions*.



différentes transitions guide-d'onde - SMA

La plupart des appareils passifs rencontrés en terminaisons coaxiales sont disponibles en guide d'onde (coupleur directif, circulateur, atténuateur...)

Propagation des ondes dans un guide d'onde rectangulaire



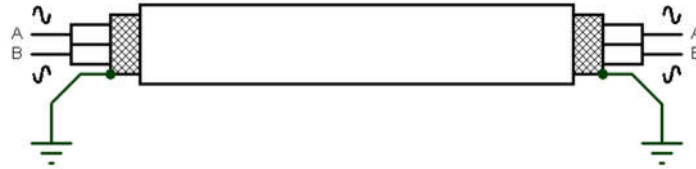
Les ondes sont transmises dans un guide d'onde suivant différentes distributions entre les champs magnétiques et électriques, on les appelle modes TE_{mn} (TE= Transverse Electric) où m indique le nombre de variations de demi périodes dans le guide d'onde en X, et n indique le nombre de variations de demi périodes dans le guide d'onde en Y, (TE_{10} , TE_{20} , TE_{01} , TE_{11} , TE_{30} , TE_{21} , TE_{02}) et modes TM (Transverse Magnétique) : TM_{11} , TM_{21} .

Les transitions rectangulaires sont les plus répandues et sont normalisées par référence. Ci dessous un tableau de quelques guides d'onde montrant leur fréquence d'utilisation, leur atténuation et leur dimensions intérieures.

nom EIA / Anglais	fréq mini / maxi	fréquence en GHz	atténuation en dB/100m	Dimensions intérieures (mm)
WR42 / WG20	18.00 à 26.50 GHz	18.0 20.0 24.0 26.5	44.55 38.66 33.94 33.77	10.668 x 4.318
WR75 / WG17	10.0 à 15.0 GHz	10.0 11.0 12.0 13.0 14.0 15.0	16.54 14.30 13.08 12.34 11.87 11.56	19.050 x 9.525
WR90 / WG16	8.2 à 12.4 GHz	8.2 8.5 9.0 10.0 10.5 11.0 12.0	13.98 13.09 12.05 10.82 10.44 10.16 9.78	22.860 x 10.160
WR229 / WG11A	3.30-4.90 GHz	3.3 4.1 4.9	3.06 2.37 2.17	58.170 x 29.083

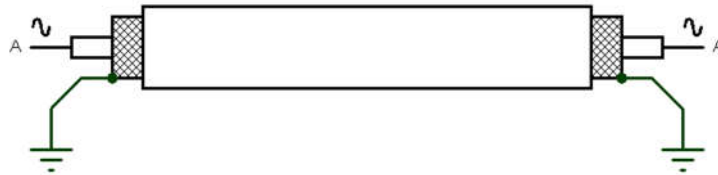
Lignes symétriques et asymétriques

Lignes symétriques



Appelées « balanced » en anglais, les liaisons symétriques sont moins sensibles aux perturbations extérieures. Le signal est transmis sur les deux fils A et B en opposition de phase.

Lignes asymétriques



Appelées « unbalanced » en anglais, les liaisons asymétriques sont plus sensibles aux perturbations extérieures. Le signal est transmis sur le seul fil A.

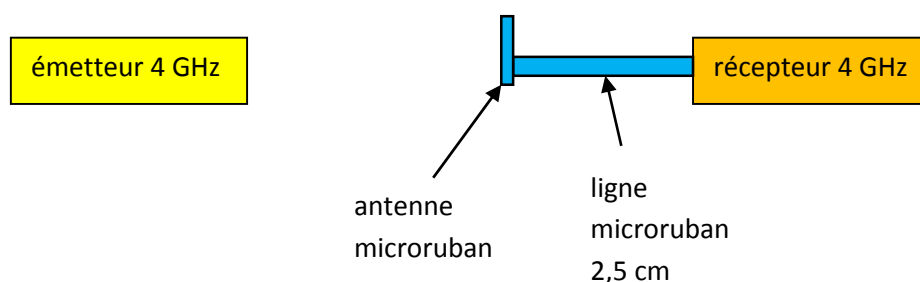
Le choix de lignes symétriques et asymétriques dépend de la fréquence de travail, des sources et des charges. Le choix des lignes est également adapté aux éléments qu'ils raccordent.

Transfert d'énergie dans les lignes

Dans les basses fréquences, les lignes de transmission n'affectent pas le transfert d'énergie depuis la source vers la charge. Cependant, à hautes fréquences, même de courtes longueurs de lignes de transmission affecteront le transfert de puissance même si la désadaptation est faible.

Ce n'est pas la longueur de la ligne de transmission, ni la fréquence à laquelle elle fonctionne qui déterminent si une ligne de transmission affectera un circuit. Ce qui compte, c'est la longueur de la ligne de transmission, mesurée en longueurs d'onde à la fréquence considérée.

Exemple : considérons un émetteur à 4 GHz. Supposons également qu'un récepteur est connecté à une antenne microruban via une ligne de transmission microruban d'une longueur de 2,5 cm (cm). Les effets sur la ligne de transmission doivent-ils être pris en compte?



Réponse: La longueur d'onde à 4 GHz (4×10^9 Hz) est de 7,5 cm. La ligne de transmission a une longueur de 2,5 cm. Par conséquent, la ligne de transmission a une longueur de $2.5/7.5 = 0,33 \lambda$. Étant donné qu'il s'agit d'une fraction significative d'une longueur d'onde (33%), la longueur de la ligne doit être prise en compte lors de l'analyse du système récepteur / ligne de transmission / antenne.

Quelques formules

Longueur d'une ligne l en fonction du coefficient de vélocité d'une ligne v en fonction de la fréquence f avec $c=300$ (vitesse de la lumière) :

$$l = \frac{c \times v}{f}$$

Exemple : $v=0,66$ $f=500$ MHz $\lambda=0,396$ m soit 396 mm.

le coefficient de vélocité v peut être calculé en fonction de la constante du diélectrique d (permittivité relative) du câble utilisé :

$$v = \frac{1}{\sqrt{d}}$$

Exemple : pour le RG58 $d = 2,3$ $v = 0,659$

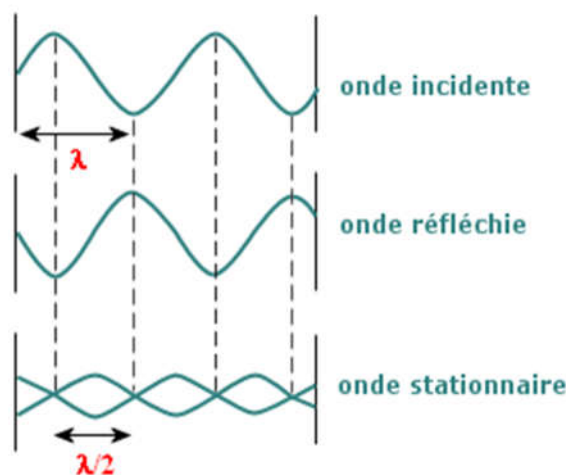
Ondes progressives et ondes stationnaires dans les lignes

Une onde **progressive** est une onde générée dans une source (émetteur, oscillateur) et qui se propage de façon libre dans la ligne à la vitesse de la lumière multipliée par le coefficient de vélocité de la ligne.

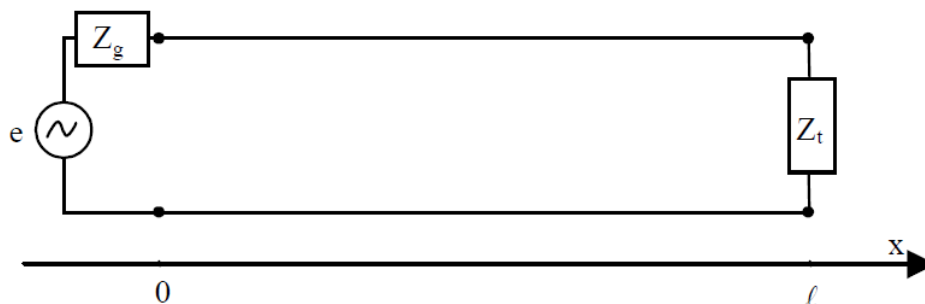
Une onde **stationnaire** se localise à des endroits spécifiques de la ligne qui dépendent de la longueur de la ligne et de la fréquence de l'onde. Les intensités minimales et maximales de l'onde stationnaire sont fixes et se situent à des endroits fixes de la ligne, d'où son nom *d'ondes stationnaires*.

Une onde stationnaire est la somme de l'onde progressive, et du retour de celle-ci en bout de ligne lorsque l'onde incidente n'est pas complètement absorbée par la charge d'extrémité.

<http://science.sbccc.edu/physics/flash/oscillationswaves/standingwaves.swf>



Impédances et propagation dans une ligne



Le schéma ci dessus représente une source sinusoïdale e d'impédance Z_g , reliée à une ligne de longueur l à une charge d'impédance Z_t . L'abscisse x représente un point quelconque de la ligne entre 0 et L .

Formules du coefficient de réflexion

Comme toutes les mesures et grandeurs en radiofréquences, le **coefficient de réflexion** Γ est un nombre complexe :

$$\Gamma(x) = \rho(x)e^{j\theta(x)} = \rho(x) + j\theta(x)$$

$\Gamma(x)$ est le coefficient de réflexion sur une ligne de transmission à un endroit x .

L'argument de $\Gamma(x)$ noté $\theta(x)$ est le déphasage de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente à un endroit x , tandis que le module $\rho(x)$ représente la fraction de tension réfléchie à ce même endroit x .

Impédance Z en x en fonction du coefficient de réflexion :

$$Z(x) = \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)}$$

Coefficient de réflexion Γ en x en fonction de l'impédance :

$$\Gamma(x) = \frac{Z(x) - 1}{Z(x) + 1}$$

En bout de ligne ($x=l$) :

$$\Gamma_t = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0}$$

avec Z_0 l'impédance caractéristique de la ligne (en général 50 Ω)

Z_t représente l'impédance en bout de ligne.

Si la ligne est terminée par un **court-circuit**, $Z_t=0$ et $\Gamma_t= -1$

→ L'onde est donc totalement réfléchie par le circuit ouvert en changeant de signe à la réflexion.

Si la ligne est terminée par un **circuit ouvert** : $Z_t=\infty$ et $\lim_{Z_t \rightarrow \infty} \Gamma_t = 1$

→ L'onde est donc totalement réfléchie par le circuit ouvert sans changer de signe à la réflexion.

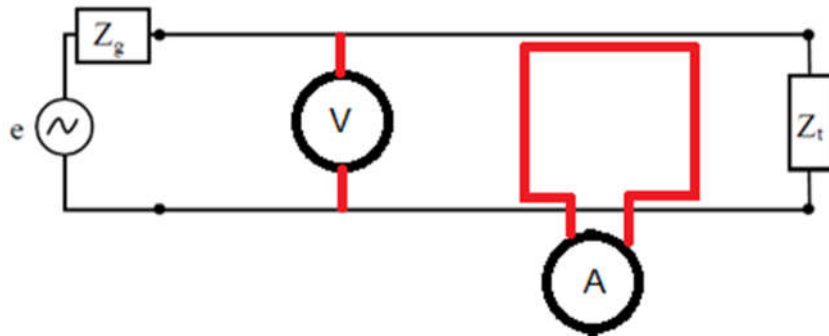
Si la ligne se termine par une **charge adaptée** : $Z_t=50$ et $\Gamma_t= 0$

→ L'onde est totalement absorbée par la charge sans aucune réflexion.

Lignes de Lécher

Les lignes de Lécher sont un instrument de mesure qui permettent de mesurer la répartition des ventres et des noeuds de courant d'une onde stationnaire dans une ligne de transmission bifilaire.

Il comprend un voltmètre pour mesurer la tension et un ampèremètre par couplage pour mesurer l'intensité. Pour mesurer la tension, la ligne doit être accessible.

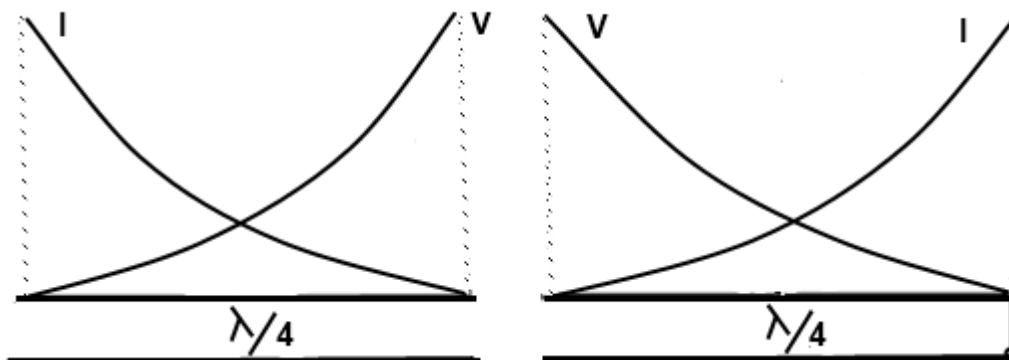


On déplace le voltmètre et l'ampèremètre sur la ligne pour visualiser les mesures.

Si la ligne ne comporte pas d'onde stationnaires (charge adaptée à la ligne et à la source) alors les mesures de V et I seront constantes le long de la ligne.

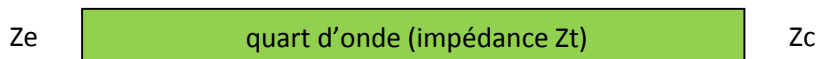
Lignes quart d'onde

Propriétés



distributions du courant et de la tension sur une ligne quart d'onde ouverte (à gauche) et fermée (à droite)

Une ligne quart d'onde a une longueur électrique de $\lambda/4$, et une longueur mécanique de $l=v.\lambda/4$ (v =coefficient de vélocité de la ligne). Elle sert à faire la transition entre deux impédances différentes à ses deux extrémités.



L'impédance Z_t d'une ligne quart d'onde connectée à des impédances Z_e et Z_c est de :

$$Z_t = \sqrt{Z_e Z_c}$$

à 500 MHz, la longueur mécanique du quart d'onde, pour un coefficient de vélocité $v=0,66$ est de :

$$l = \frac{v.\lambda}{4} \quad \text{soit } l = \frac{cv}{4f} \quad \text{soit } l = \frac{0,66 \times 300}{4 \times 500} = 0,099 \text{ m soit } 99 \text{ mm}$$

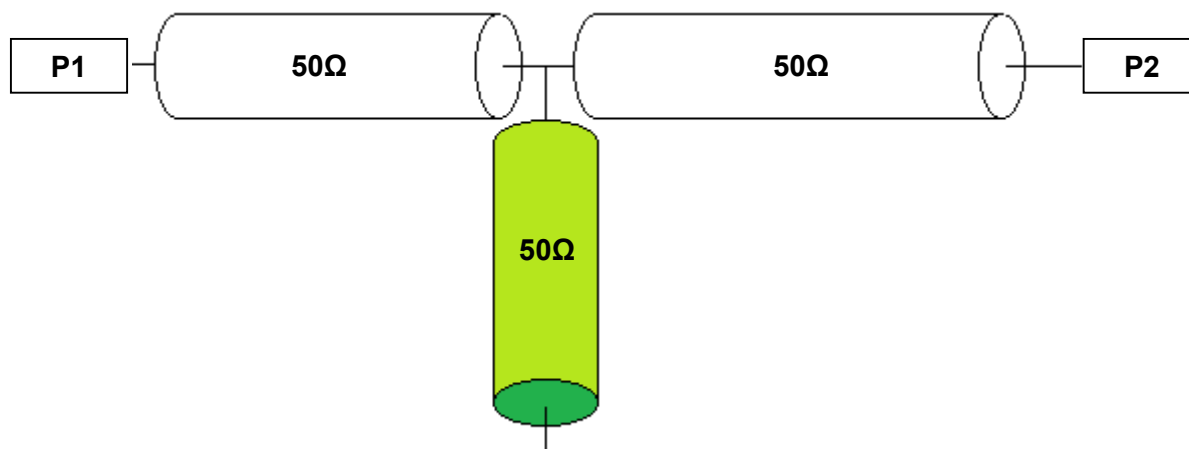
c =vitesse de la lumière

v = coefficient de vélocité du quart d'onde

f = fréquence en MHz

Utilisations en circuit coupe bande

Voici une ligne quart-d'onde (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 vélocité 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.

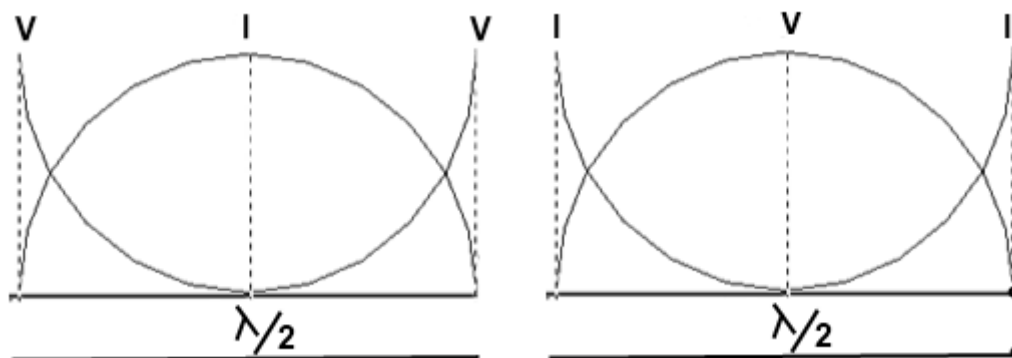


NB. La ligne quart d'onde a le même rôle qu'une cavité montée en coupe bande.

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.

Ligne demi onde

La ligne demi-onde

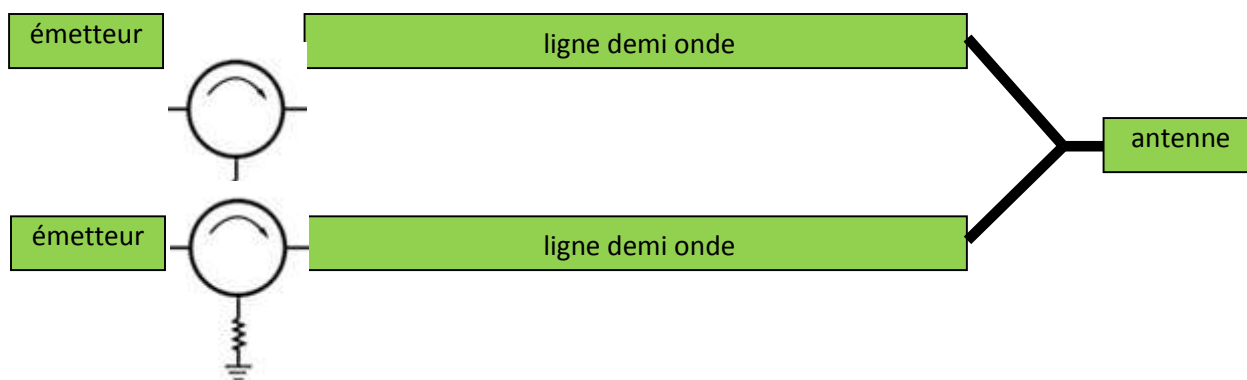


distributions du courant et de la tension sur une ligne demi onde ouverte (à gauche) et fermée (à droite)

Dans une ligne demi-onde, l'impédance d'entrée est égale à l'impédance de la charge : $Z_{in} = Z_L$

$$Z_{in} \boxed{\text{ligne demi onde (ou } n \times \text{demi onde)}} = Z_L \text{ (charge)}$$

utilisation en couplage

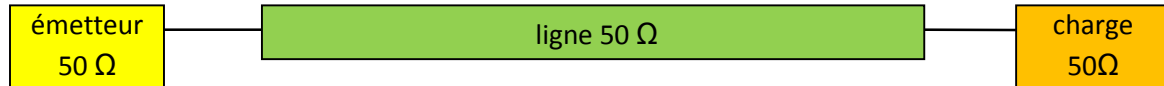


Les lignes demi-onde peuvent être utilisées pour coupler deux émetteurs.

Voir présentation « Composants radioélectriques passifs particuliers » page 29 : diagramme d'un combinateur procomm PRO-COM450-SRC-2 dans lequel on utilise cette technique.

Ligne adaptée

Lorsqu'une ligne est adaptée à la charge et à la source, on dit que le système est accordé sur l'impédance nominale :



Dans la ligne, il n'y a qu'une onde progressive, aucune onde stationnaire ; le courant et la tension sont constantes le long de la ligne, **quelque soit sa longueur**. Une longueur importante de ligne se traduira par une atténuation du signal **sans** apparition d'onde stationnaire.

Caractéristiques des tronçons de ligne $\lambda/2$, $3\lambda/8$, $\lambda/4$, $\lambda/8$

Rappels sur l'abaque de Smith :

une ligne de λ est représentée par 2 tours de l'abaque de Smith

une ligne de $\lambda/2$ est représentée par un tour de l'abaque de Smith

une ligne de $\lambda/4$ est représentée par un $\frac{1}{2}$ de tour de l'abaque de Smith

une ligne de $\lambda/8$ est représentée par un $\frac{1}{4}$ de tour de l'abaque de Smith

déphasage entre courant et intensité : $\text{tg } \theta = \frac{X}{R}$

D'autre part, lorsque l'on se déplace dans le sens horaire de l'abaque, on se déplace vers le générateur.

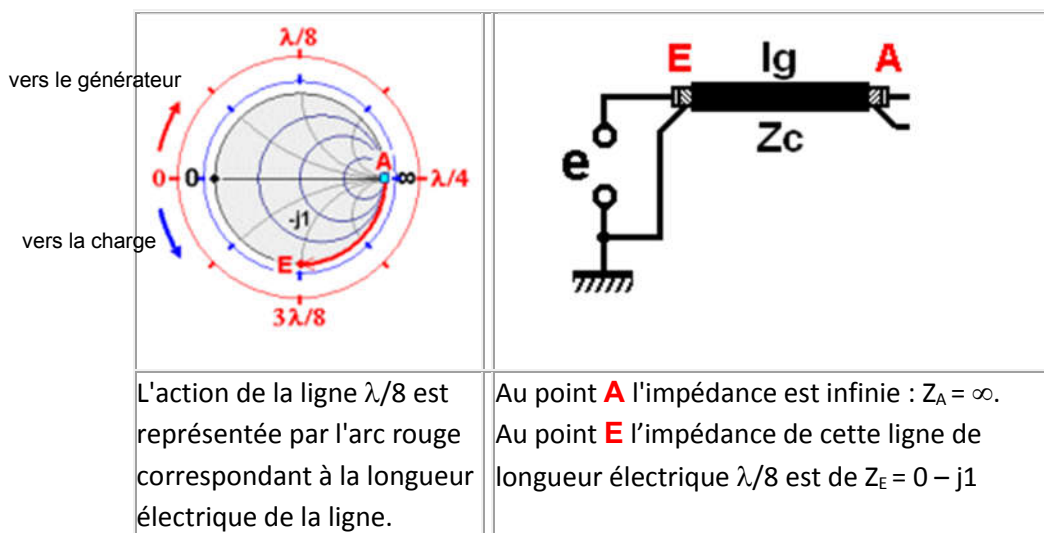
Quand on se déplace dans le sens trigonométrique, on se déplace vers la charge.

Ligne ouverte

d'après f1bro

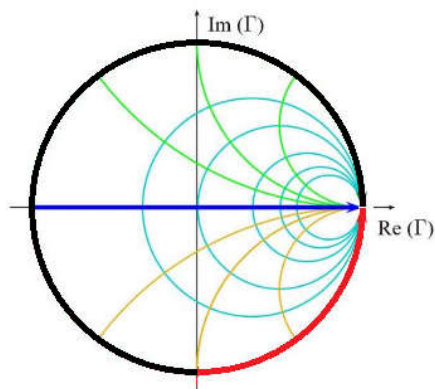
La ligne ouverte peut être considérée comme branchée sur une charge d'impédance infinie, incapable d'absorber la moindre énergie : toute celle qui lui sera envoyée par le générateur sera réfléchie. Le ROS à son extrémité non connectée est infini : sur l'abaque de Smith le point correspondant à l'impédance mesurée en E (voir schéma) est toujours situé sur le cercle des résistances égales à zéro, celui qui marque la limite de l'abaque et qui est aussi celui du ROS infini.

Exemple avec une ligne ouverte $\lambda/8$: cette longueur de ligne correspond à $\frac{1}{4}$ de tour sur l'abaque :

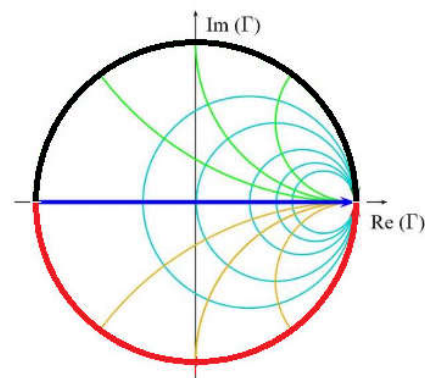


Lignes ouvertes de longueurs particulières

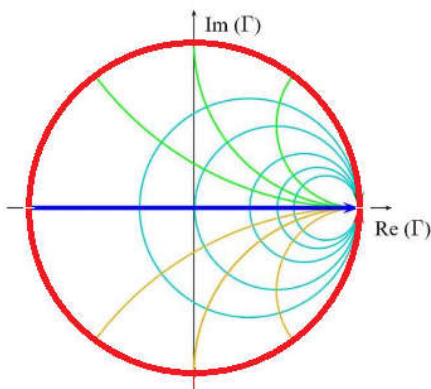
Ci-dessous, on trouve l'impédance de la ligne (en rouge) que l'on retrouvera à son extrémité "côté générateur" (point E). Comme il s'agit d'une ligne ouverte, le point de départ sera toujours $Z_A = \infty$ (à droite de l'abaque).



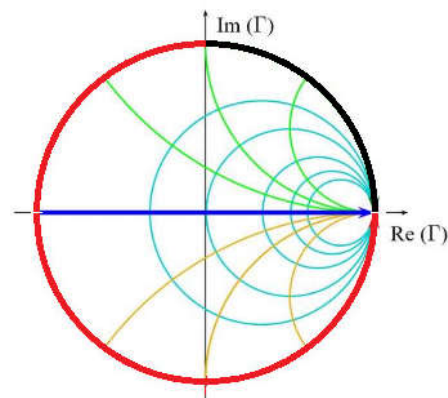
ligne $\lambda/8$: $Z_E = 0 - j1$



ligne $\lambda/4$: $Z_E = 0 + j0$



ligne $\lambda/2$: $Z_E = 0 + j\infty$ (retour à la case départ)



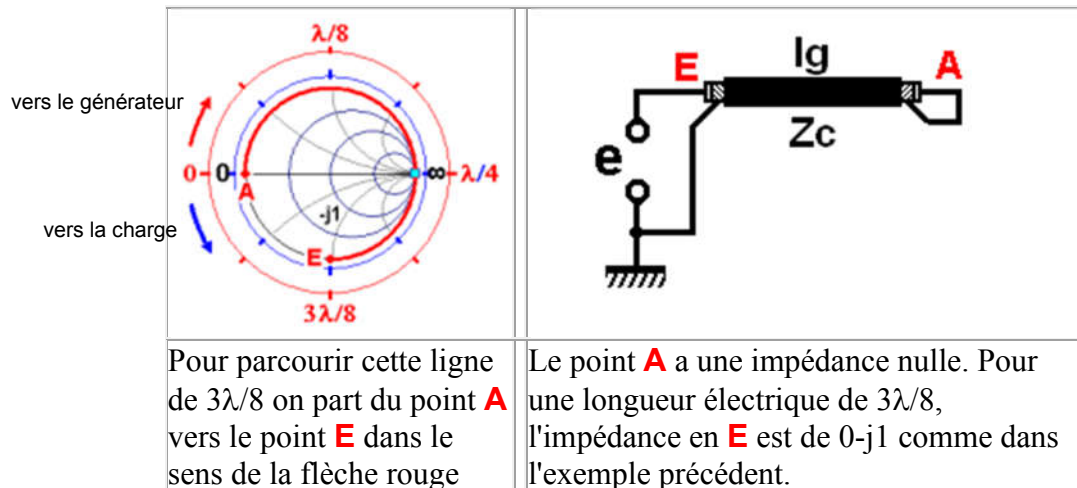
ligne $3\lambda/8$: $Z_E = 0 + j1$

Au bout d'une ligne demi-onde ($\lambda/2$) ouverte à son extrémité on retrouve la même impédance qu'à son autre extrémité. Cette particularité est utilisée pour mesurer l'impédance au point d'alimentation d'une antenne sur une gamme de fréquences étroite, quelque soit l'impédance.

Ligne fermée

La ligne fermée est en court-circuit à son extrémité "côté charge" ; autrement dit elle est chargée par une impédance nulle. C'est donc du point $0 + j0$ que l'on partira. Sur cet exemple d'une ligne $3\lambda/8$, on se déplace de $3\lambda/8$ dans le sens de la flèche rouge "vers le générateur".

Exemple avec une ligne fermée $3\lambda/8$: cette longueur de ligne correspond à $1/4$ de tour sur l'abaque :

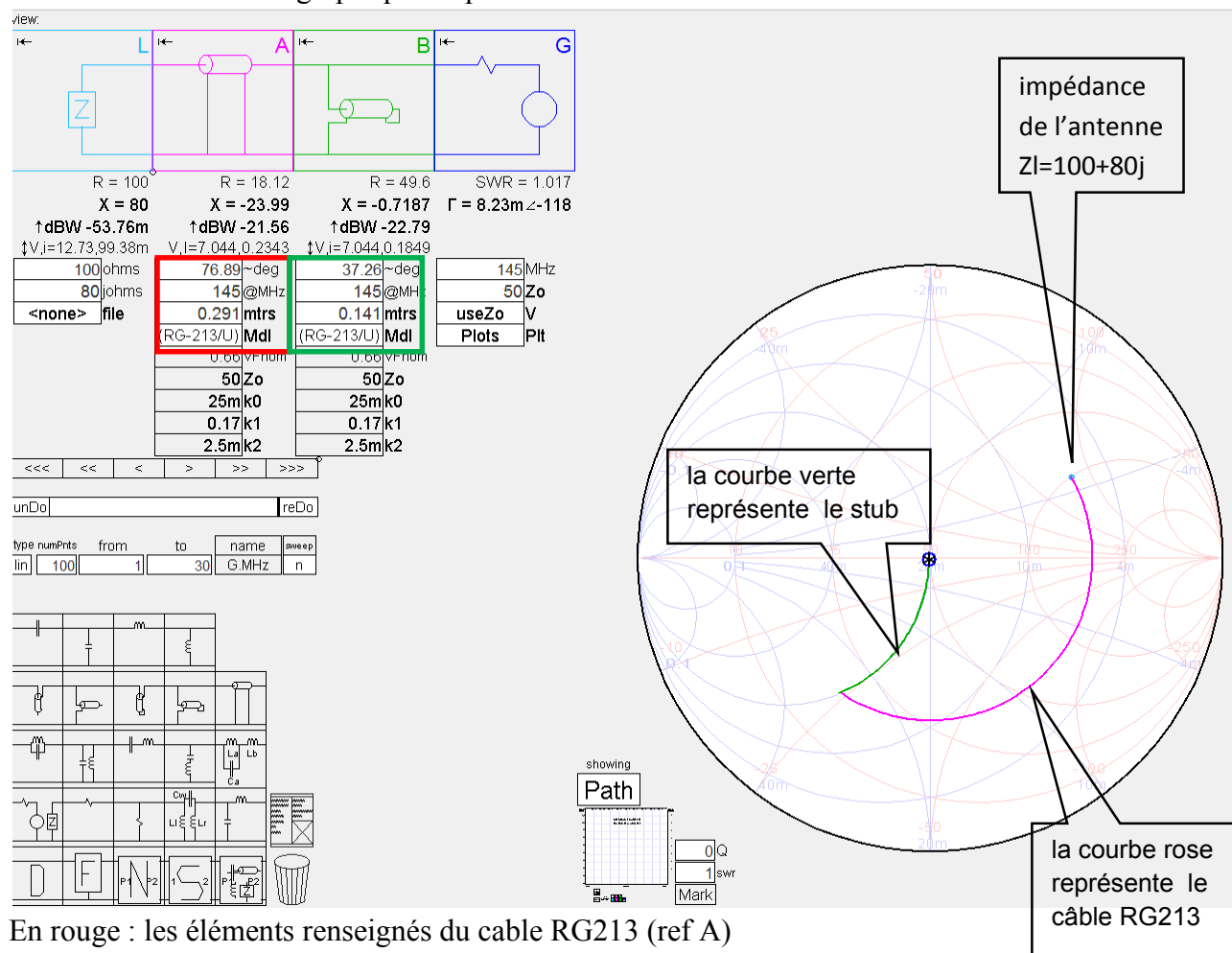


L'abaque de Smith est un auxiliaire idéal pour comprendre le fonctionnement des lignes et en particulier pour trouver l'impédance d'une antenne (ou d'une charge quelconque) à partir de l'impédance mesurée au bas de la ligne

Cas pratique d'adaptation par simple Stub

Soit une antenne qui présente à ses bornes une impédance complexe de $Z_L = 100 + j80 \Omega$ à une fréquence de travail de 145 MHz. Le câble d'antenne est un câble coaxial RG213U d'impédance caractéristique de 50Ω . On veut réaliser une adaptation par un *Stub court-circuit* en parallèle sur la ligne. Le *Stub* est réalisé avec le même câble coaxial que celui de la ligne de transmission. À quelle distance de l'antenne doit se situer ce *Stub* ? Quelle doit être la longueur du *Stub* si celui-ci est du type en court-circuit ?

On utilise la résolution graphique du problème :



En rouge : les éléments renseignés du câble RG213 (ref A)
longueur 291 cm

En vert : les éléments calculés par le logiciel pour le stub (ref B)
longueur 141 cm.

Pour balayer le circuit en fréquence, il faut renseigner le bandeau ci dessous :

type	numPnts	from	to	name	sweep
lin	100	100	200	G.MHz	y

mettre « y » dans le champ sweep lance le balayage selon les paramètres renseignés.

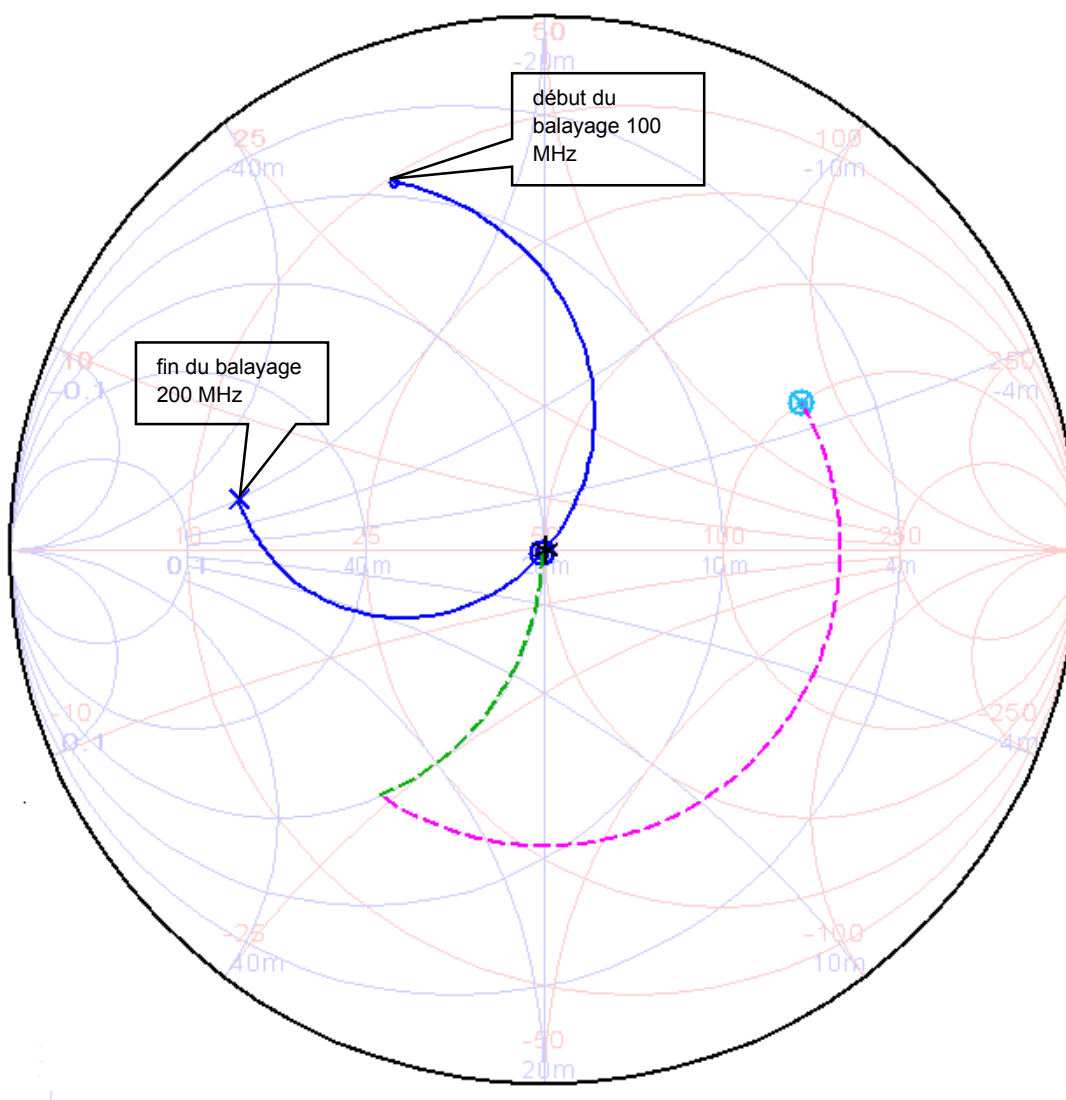
showing

Both

Le bouton permet d'afficher le balayage dans le diagramme :

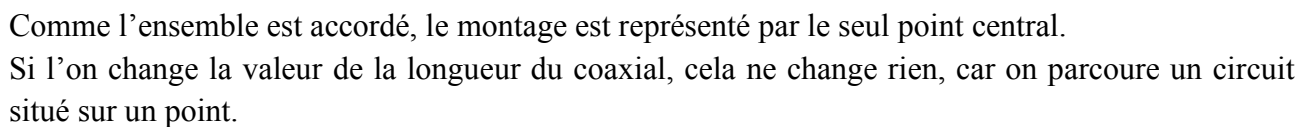
le bouton **2** ^{SWR} permet de tracer le cercle de SWR 2/1 ou de la valeur entrée. Pour tracer plusieurs cercles de ROS, il faut les entrer séparés par un espace (Ex : 1.5 2 3 4)

La courbe bleue représente l'impédance du montage de 100 à 200 MHz. L'étoile représente le point final du balayage (200 MHz)



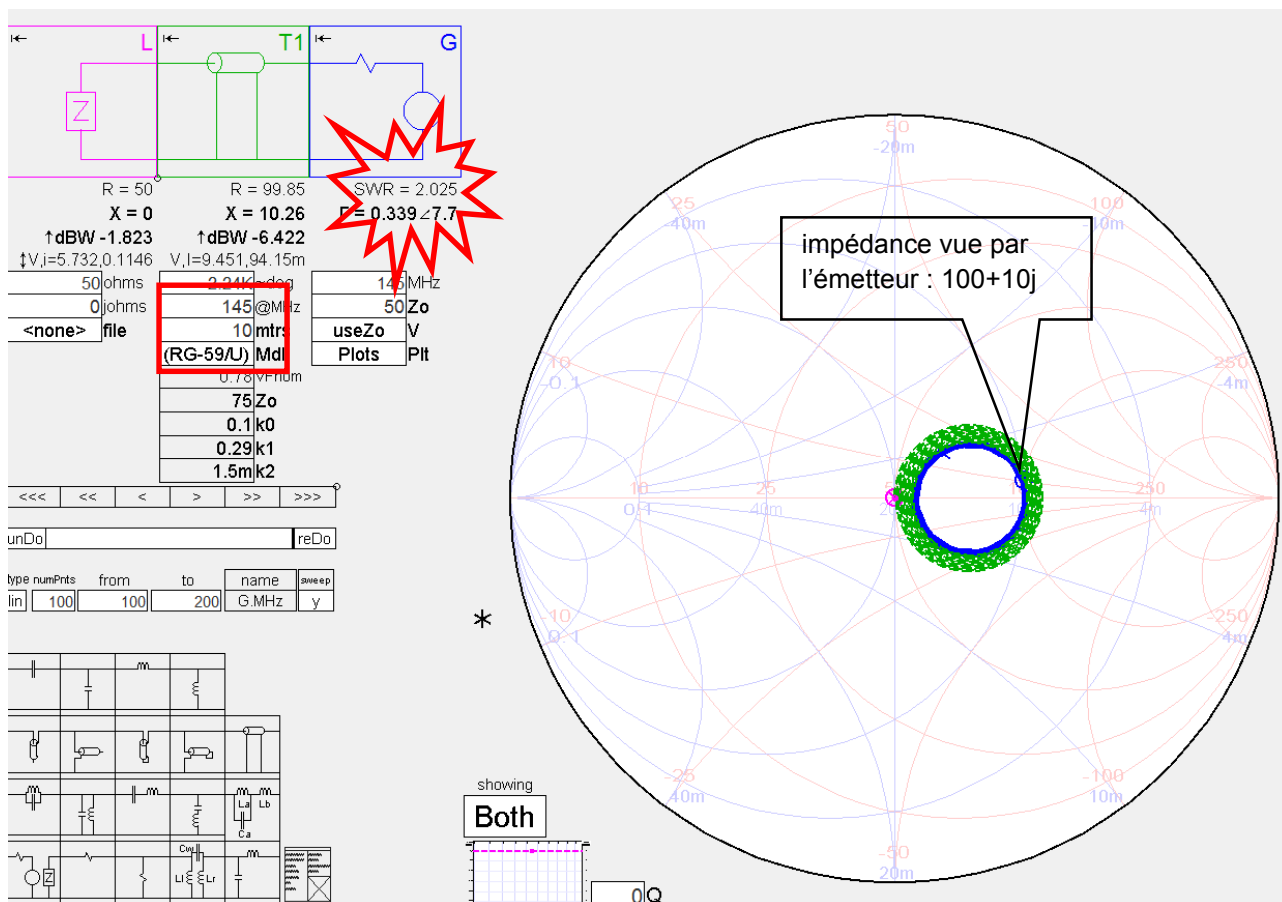
La courbe bleue passe bien par le point central à la fréquence de travail (145 MHz)

Voici le diagramme de Smith d'un émetteur $50\ \Omega$ raccordé à une charge $50\ \Omega$ par l'intermédiaire d'un câble coaxial LMR400 de $10\text{m} - 50\ \Omega$.



Liaison par un coaxial non adapté à une charge

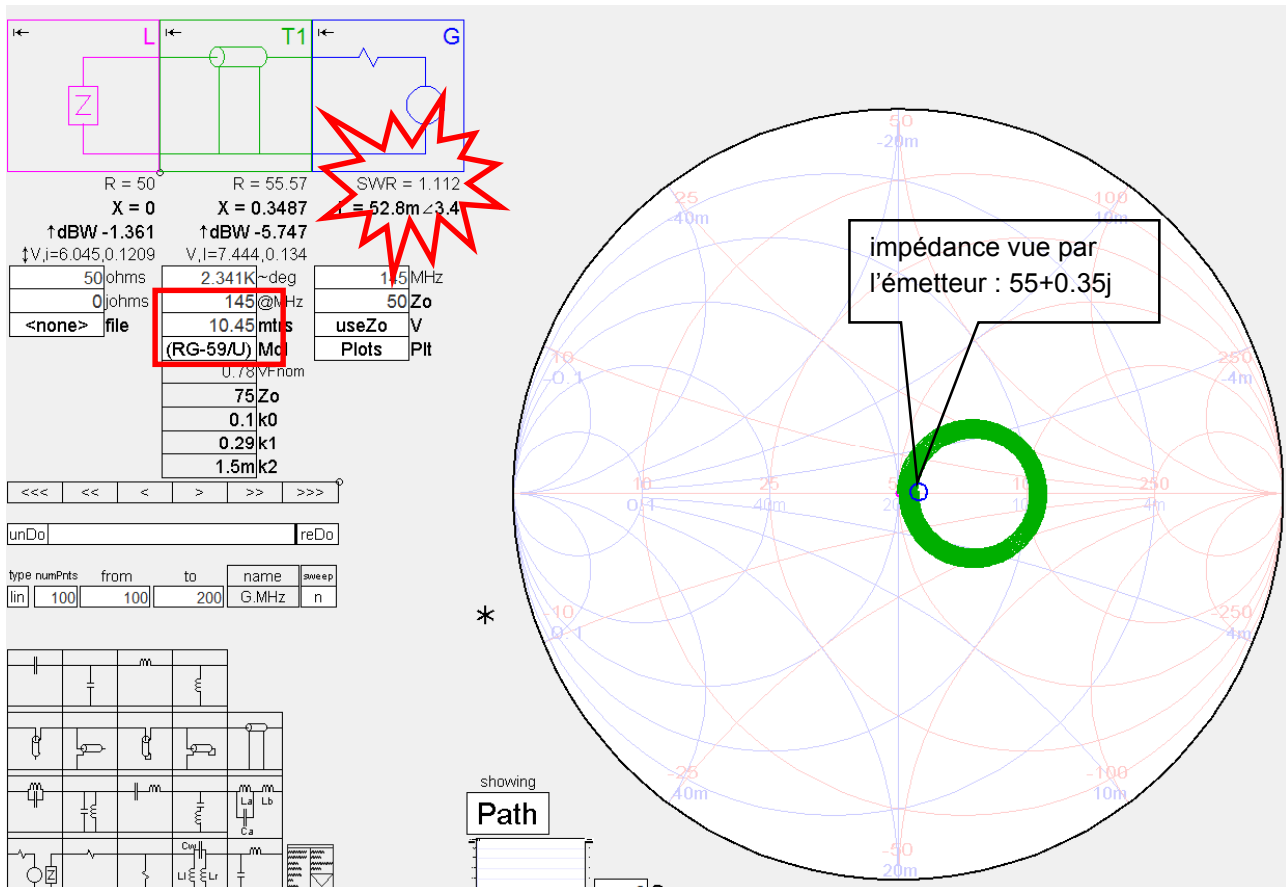
Voici le diagramme de Smith d'un émetteur $50\ \Omega$ raccordé à une charge $50\ \Omega$ par l'intermédiaire d'un câble coaxial RG59 de 10m – $75\ \Omega$.



Le fait de mettre 10 m de câble $75\ \Omega$ **change** l'impédance du système en fonction de la fréquence. A 145 MHz, le ROS vu par l'émetteur est de **2,025**. En vert on a la courbe d'impédance du montage qui décrit plusieurs tours à cause de la longueur du câble (10 m). En bleu on a la courbe en réponse en fréquence de 100 à 200 MHz.

Conclusion : un câble non adapté a une réponse en fréquence en fonction de la longueur. Au mieux, on peut tailler le câble de manière à être le plus proche possible du point central (voir ci après).

Ci-dessous la mesure faite avec 10,45 m de câble 75 Ω , le ROS n'est plus que de **1,112**.



D'une manière générale, il suffit d'un seul élément désadapté pour que tous les autres éléments, même s'ils sont adaptés, participent à la désadaptation.

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