2018

Radio Club de l’Avesnois F6KTN

Adaptations d’impédances

Introduction

Le problème de l'adaptation d'impédances en radio technique est un des plus ardus car il nécessite des techniques de mesure et des méthodes d'adaptations. Cette présentation montre ces moyens et certaines méthodes graphiques et logicielles basées sur l'utilisation de l'abaque de Smith.

Frédéric F1IWQ

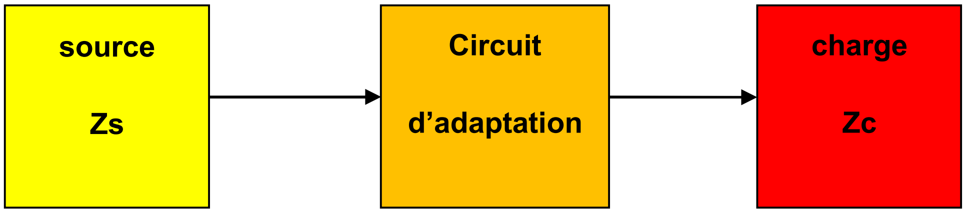
Sources

http://f6crp.pagesperso-orange.fr/ba/smith.htm

www.antenna-theory.com

Adaptation d'impédance

Adapter une impédance entre une charge et une source consiste à placer entre les deux des éléments réactifs, de manière à ce que la source soit adaptée à la charge. Cela permet de transférer la totalité de l'énergie produite par la source à la charge, sans onde en retour vers la source.



Dans le monde radioamateur, l'impédance de la source et des lignes sont presque toujours fixées à 50Ω (impédance complexe de 50 +j0 [c'est à dire 1 + j0 en impédance normalisée]). La charge, par contre peut être d'une impédance « exotique », comme c'est souvent le cas lorsque l'on conçoit une antenne. Le circuit d'adaptation est composé pour la plupart du temps de condensateurs et de selfs, mais des composants tels que des stubs, transformateurs d'impédances ou lignes quart d'onde peuvent également faire l'affaire suivant les cas. Le circuit d'adaptation est déduit de mesures et de méthodes graphiques souvent maintenant informatisées. Lors de la recherche du circuit d'adaptation, deux notions très importantes seront utilisées : l'impédance et l'admittance.

La première partie du travail d'adaptation est la mesure de l'impédance de la charge à adapter. Cette impédance constitue le point de départ du chemin qui va la reconduire vers l'impédance de la source. Pour la mesure des impédances complexes, voir la présentation « mesures complexes en radiofréquence »

La mesure devant fournir une impédance complexe en fonction de S11, seul un analyseur de réseaux vectoriel (VNA) est utilisable. La mesure de S11 (coefficient de réflexion) permet de calculer le ROS et l'impédance du montage étudié pour une fréquence donnée par les formules ci dessous.

Rappels sur les impédances complexes

Rappel de la formulation de l'impédance complexe :

$$\mathbf{Z = R + jX}$$

impédance donnée en fonction de la partie réelle et imaginaire

notation expomentielle : $Z = Re^{jX}$

réactance en Ω

résistance en Ω,

Lorsqu'on ajoute des impédances en **série**, on additionne les **impédances** de chaque nouvelle impédance : $Z_{tot} = Z_1 + Z_2$

---

l'inverse de l'impédance , qui représente l'ajout de charges en parallèle est l'admittance :

$$\mathbf{Y = \frac{1}{Z}}$$

Y est **l'admittance**, son unité est le Siemens.

Cette admittance est complexe et peut donc s'écrire avec une partie réelle et imaginaire :

$$\mathbf{Y = G + jB}$$

G est la **conductance** (partie réelle) B est la **susceptance** (partie imaginaire)

lorsqu'on ajoute des impédances en **parallèle**, on additione l'inverse des impédances c'est à dire **leurs admittances**. $Y_{tot} = Y_1 + Y_2$ càd : $\frac{1}{Ztot} = \frac{1}{Z1} + \frac{1}{Z2}$

L'admittance peut s'exprimer en fonction de la résistance et de la réactance (qui sont les composantes de l'impédance)

$$Y = \frac{R - jX}{R^2 + X^2}$$ soit $$Y = \frac{R}{R^2 + X^2} - j\frac{X}{R^2 + X^2}$$

Donc :

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$ conductance en Siemens (S)

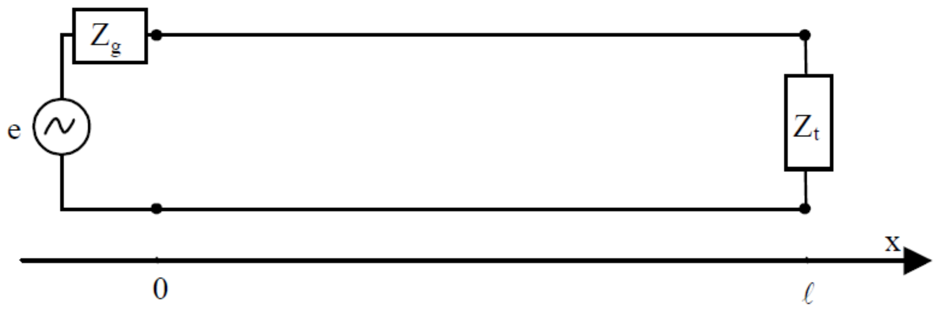
$$B = \frac{X}{R^2 + X^2}$$ susceptance en Siemens (S)

On a aussi : Susceptance d'une self : $\boxed{B = \frac{-j}{L\omega}}$ Susceptance d'un condensateur : $\boxed{B = jC\omega}$

- → **On utilise l'impédance (Z) lorsque l'on ajoute des composants en série.**
- → **On utilise l'admittance (Y) lorsque l'on ajoute des composants en parallèle.**

Ces deux grandeurs sont fondamentales dans l'utilisation de la méthode d'accord des impédances qui utilise le diagramme de Smith.

Impédances et propagation dans une ligne



Le schéma ci dessus représente une source sinusoïdale **e** d'impédance Zg, reliée à une ligne de longueur l à une charge d'impédance Zt. 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 :

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

Γ(x) est le coefficient de réflexion sur une ligne de transmission à un endroit x.
L'argument de Γ(x) noté θ(x) est le déphasage de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente à un endroit x, tandis que le module ρ(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) :

$$\boxed{\Gamma t = \frac{Zt - Zo}{Zt + Zo}}$$

avec Zo l'impédance caractéristique de la ligne (en général 50 Ω)
Zt représente l'impédance en bout de ligne.

Si la ligne est terminée par un **court-circuit**, Zt=0 et Γt= - 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** : Zt=∞ et $\lim_{Zt \to \infty} \Gamma t = 1$
→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** : Zt=50 et Γt= 0
→L'onde est totalement absorbée par la charge sans aucune réflexion.

ROS en fonction du coefficient de réflexion ρ = |S11|

$$ROS = \frac{1+|S11|}{1-|S11]} = \frac{1+\rho}{1-\rho}$$

Relations entre l'impédance complexe Z et le coefficient de réflexion ρ :

Coefficient de réflexion |S11| (ρ) $\quad |S11| = \rho = \frac{Z-1}{Z+1}$

Impédance en fonction de ρ $\quad Z = \frac{1+\rho}{1-\rho}$

Retour en dB $\quad Rl_{(Db)} = 20 \log \rho$
Il vaut -∞ dans le cas ou il n'y a pas d'onde réfléchie et 0 si l'onde incidente est totalement réfléchie.

Si l'on regarde les formules ci dessus, ROS = Z/Zo. Le VNA fournira ainsi l'impédance complexe du montage à la fréquence étudiée.

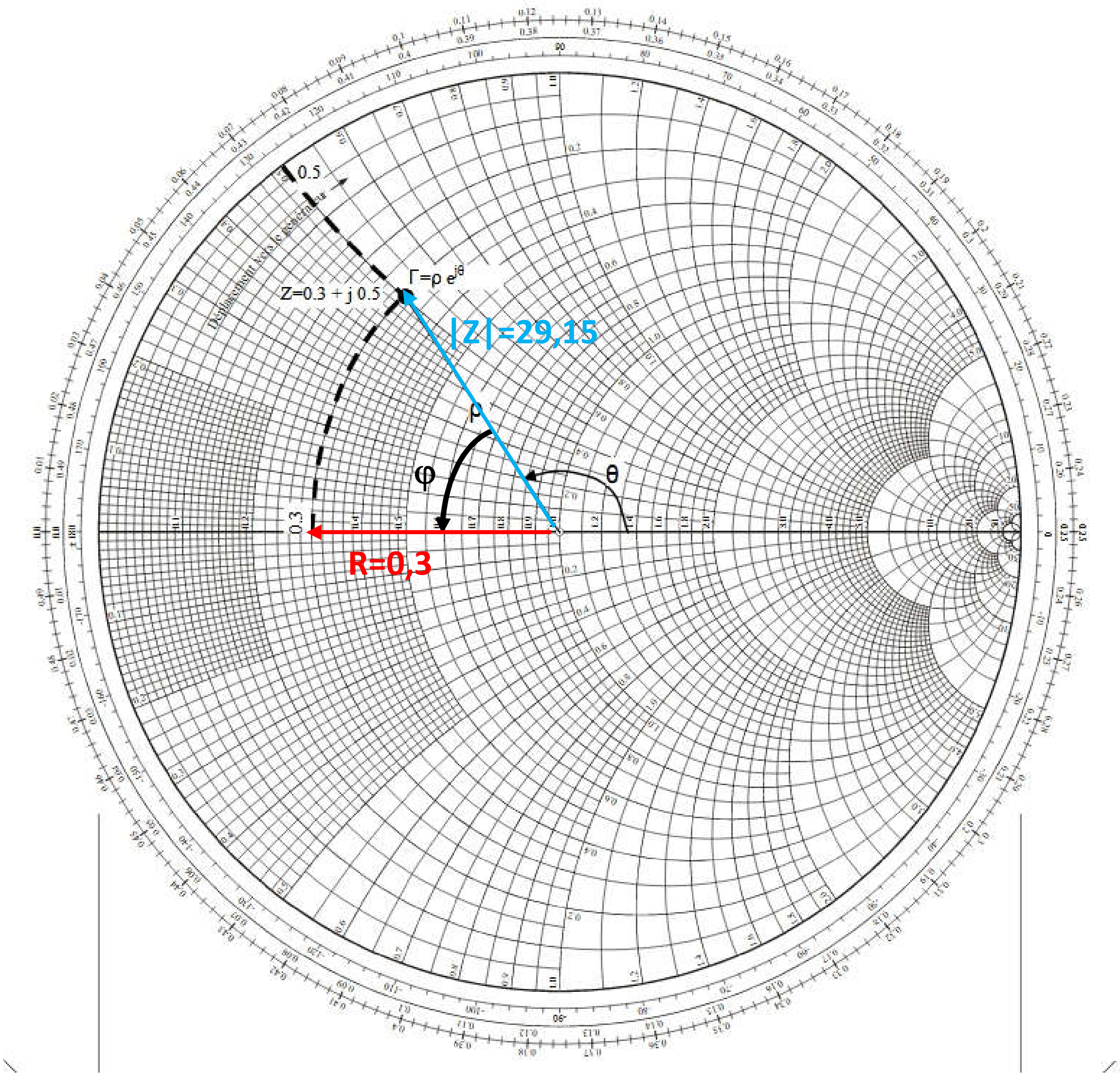
Conséquences d'une charge non adaptée

- Augmentation du coefficient de réflexion, donc du ROS
- Seule une partie du signal transmis par la source est absorbée par la charge, entraînant un mauvais rendement et donc une perte de puissance.
- l'onde réfléchie revient à la source, ce qui entraîne une surchauffe de celle-ci. Dans les cas extrêmes, cette surchauffe peut provoquer sa destruction

L'abaque de Smith

Coordonnées de l'impédance d'un point sur l'abaque de Smith

Ci dessous, on trouve l'exemple d'un point d'impédance Z=0,3 + j0,5 et comment on retrouve ses coordonnées sur l'abaque. 0,3 représente la résistance de l'impédance ; 0,5 représente la réactance (en impédance normalisée).



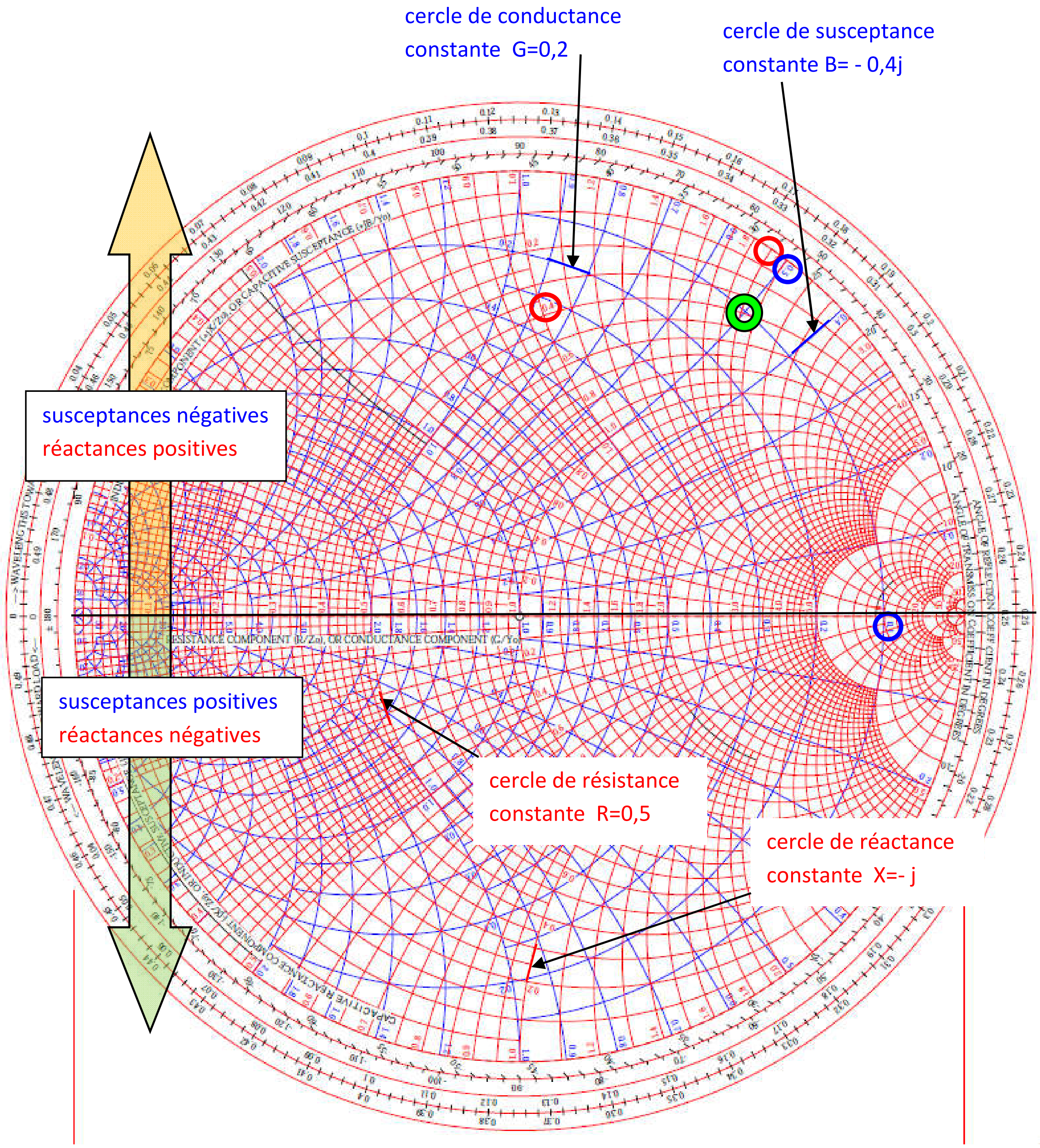
$Z = R + j\,X$ ci dessus, $Z = 0{,}3 + j\,0{,}5$ soit $Z = 15 + j\,25$

$|Z| = \rho = \sqrt{R^2 + X^2}$ ci dessus, $|Z| = \rho = \sqrt{15^2 + 25^2} = 29{,}15\ \Omega$

$\varphi = \arccos \dfrac{R}{|Z|}$ ci dessus, $\theta = 180 - \varphi$ soit : $\theta = 180 - \arccos \dfrac{15}{29{,}15} = 121°$ ou 2,11 rd

$Z = \rho e^{j\theta}$ ci dessus, $Z = 29{,}15e^{j2.11}$ en notation exponentielle.

L’abaque de Smith représente des impédances Z (en rouge), mais il existe aussi présenté en admittances Y (bleu). Cet abaque à double entrée est obligatoire pour les adaptations d’impédances.



Exemple : Le point vert a pour impédance normalisée Z1 = 0,4 + 1,9j
Quelle est son admittance normalisée Y1? Il faut utiliser les formules de la page précédente :

$$Y1 = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} \qquad\qquad Y1 = \frac{0,4 - 1,9j}{0,4^2 + 1,9^2} = \frac{0,4 - 1,9j}{3,77} = \mathbf{0,1 - 0,5j}$$

On peut lire aussi le résultat sur l’abaque par détermination graphique.

La relation entre une impédance Z et l'impédance normalisée Z' est $Z' = \frac{Z}{Zo}$

Si Z1'= 0,4 + 1,9j alors Z = Z1' × Zo avec Zo = 50 Ω (impédance caractéristique)
donc **Z1 = 20 + 95j**
R1 = 20 Ω et X1 = 95Ω

La relation entre une admittance Y et l'admittance normalisée Y' est $Y' = \frac{Y}{Yo}$

Si Y1' = 0,1 – 0,5j alors Y = Y' × Yo avec $Yo = \frac{1}{Zo} = \frac{1}{50}$ S (admittance caractéristique)
Donc **Y1 = 0,002 – 0,01 j**
G1 = 2 mS et B1 = - 10 mS

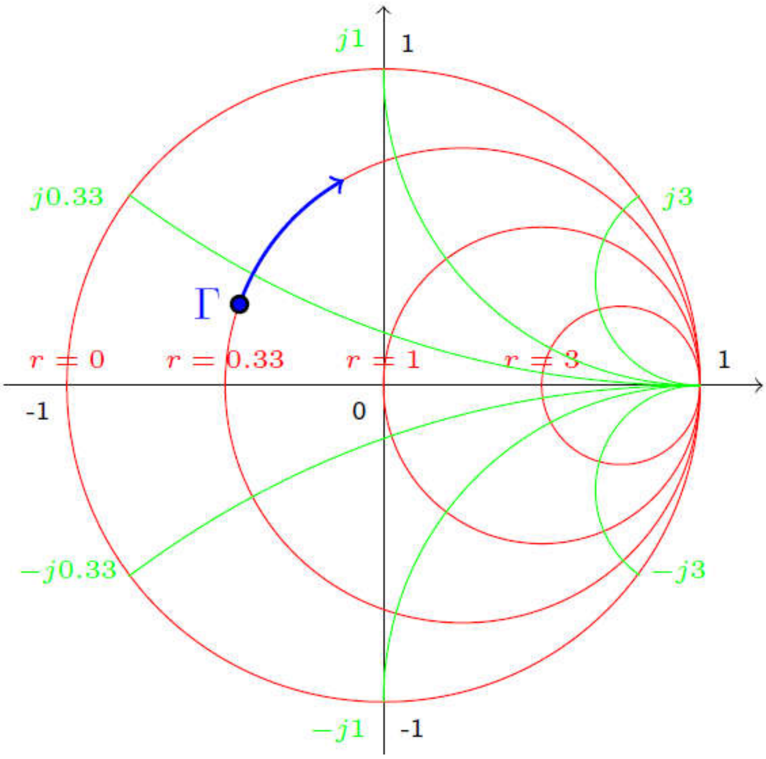
Relations entre impédances Z, impédances normalisées Z', admittances Y et admittances normalisées Y' :

$$Y' = \frac{Y}{Yo} = \frac{Zo}{Z} = \frac{1}{Z'}$$

NB. l'impédance normalisée s'appelle également impédance réduite.

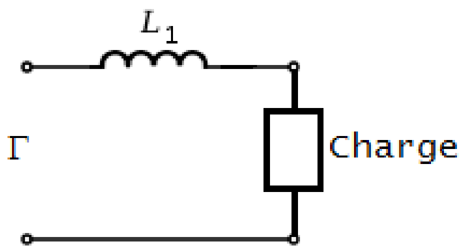
Effets de l’ajout de composants sur l’abaque de Smith

Ajout d’une inductance série

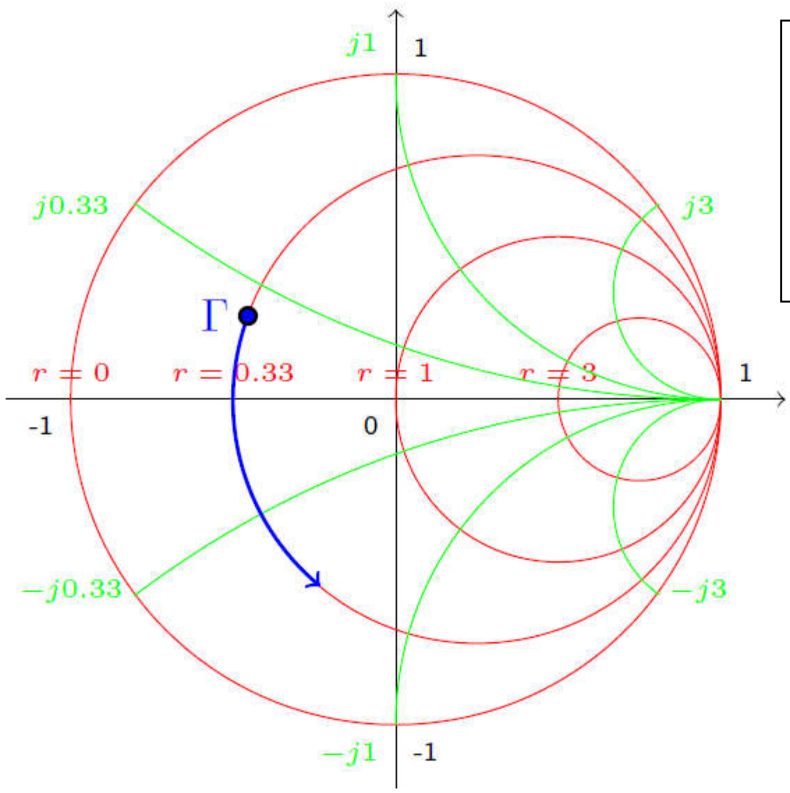


Un point quelconque sur l’abaque de Smith (exemple en bleu) se trouve forcément à un point d’intersection entre un cercle de résistance constante (rouge) et un cercle à réactance constante (vert).

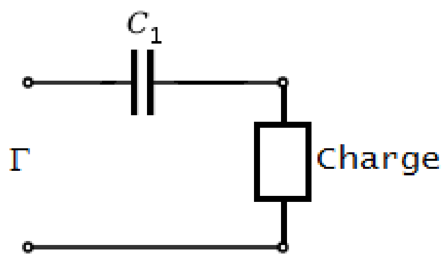
Si on rajoute en série une inductance sur la charge d’impédance Γ, le point se déplace le long du cercle des résistances dans le sens horaire.
Le déplacement correspond à la valeur de l’inductance.



Ajout d’une capacité série



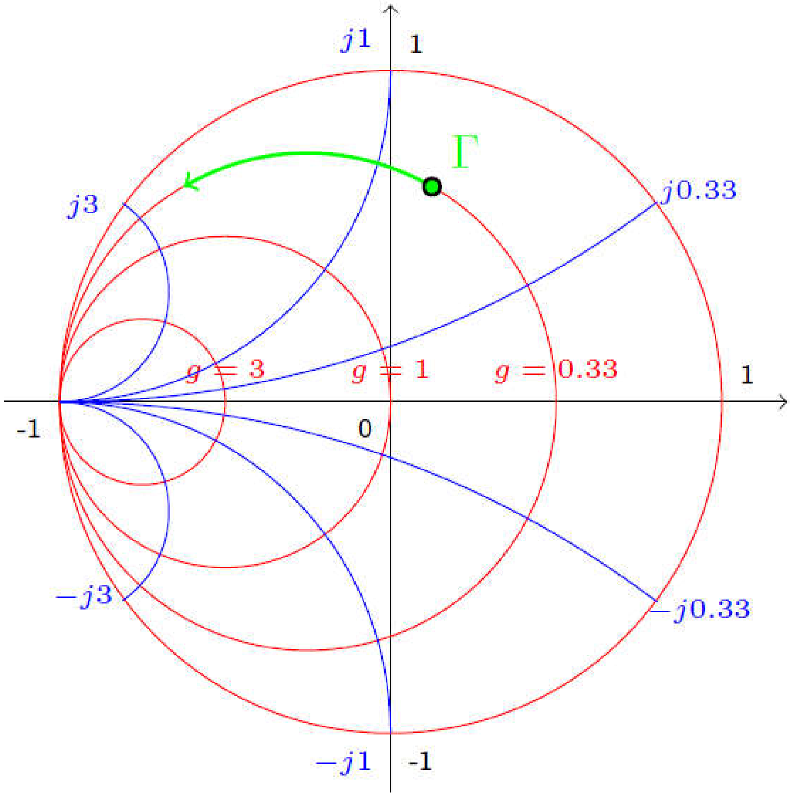
Si on ajoute une capacité sur la charge d’impédance Γ, le point se déplace le long du cercle des résistances dans le sens anti-horaire .
Le déplacement correspond à la valeur de la capacité.



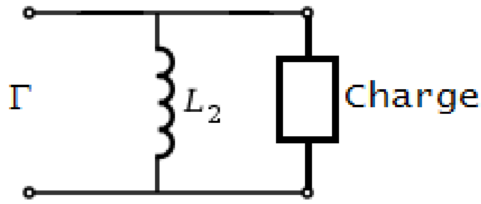
La valeur de la capacité ou de l’inductance détermine la « longueur » du déplacement.

Ajout d'une inductance en parallèle

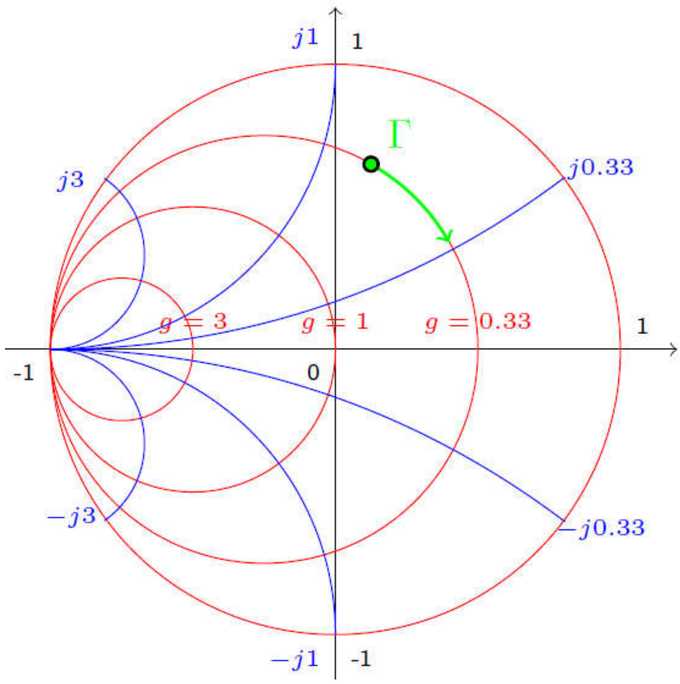
L'ajout d'éléments en parallèle oblige à utiliser l'abaque de Smith représenté par les conductances et les susceptances.



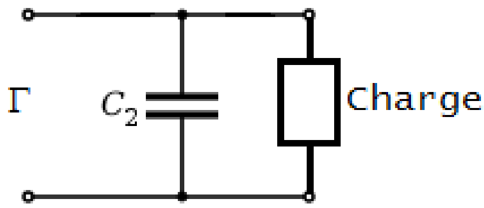
Si on ajoute une inductance en parallèle sur la charge d'impédance Γ, le point se déplace le long du cercle des conductances constantes dans le sens anti-horaire.



Ajout d'une capacité en parallèle



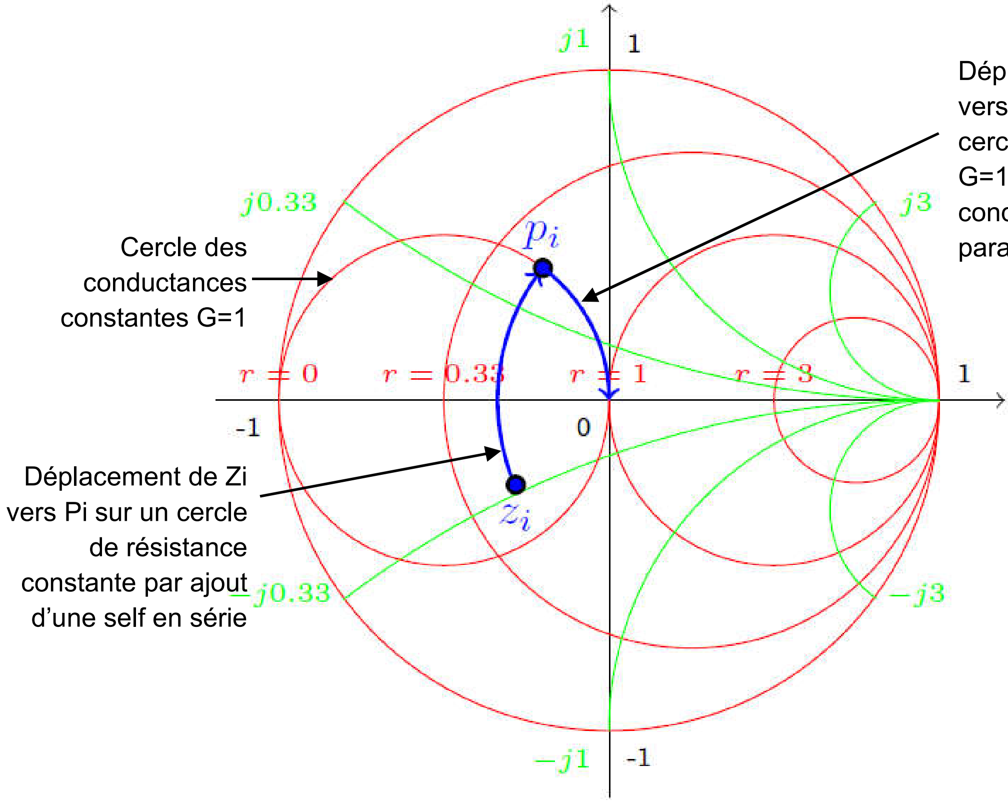
Si on ajoute une capacité en parallèle sur la charge d'impédance Γ, le point se déplace le long du cercle des conductances constantes dans le sens horaire.



Il existe d'autres possibilités de se déplacer sur le diagramme. Pour se déplacer sur un cercle de ROS constant, on utilise des stubs (série ou parallèle en shunt ou en court-circuit)

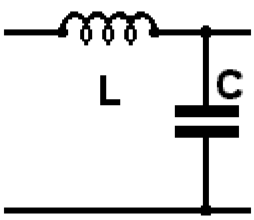
Exemple 1 d'adaptation

Cet exemple montre une impédance Zi que l'on va réadapter sur P_i en utilisant un des cercle des résistances constantes puis d'admittance constante. On va utiliser un composant en série. Ensuite, P_i sera déplacé sur le cercle des conductances G=1 pour le ramener au point central Z=1, ce qui signifie que l'on va utiliser un composant en parallèle.



Le point d'impédance Zi = 0,5 – 0,3j est à accorder, c'est à dire qu'il faut le ramener au point central de l'abaque Z=1 + 0j. On procède en deux opérations. :

1. On ajoute une inductance (car le point Zi est dans la zone des impédances capacitives (X<0)). Zi se déplace sur le sens des résistances constantes (car Zi peut être ramené dans le sens horaire jusqu'au point de cercle de conductance G=1. (point p_i)). La self est calculée de façon à se positionner sur ce cercle.
   Comme on utilise les cercles de résistances constantes pour se déplacer sur l'abaque, cela signifie que l'on place un élément en série
2. On rejoint le point Z1 par le cercle de conductance constante G=1. On ajoute donc un condensateur en parallèle. La capacité est calculée pour se déplacer de la valeur exacte pour atteindre Z=1.



Calculs des composants. On souhaite accorder le point Zi sur 145 MHz.

Calcul de la self :

Zi = 0,5 – 0,3j (25-15j) et ZPi = 0,5 + 0,5j (25+25j) (lecture sur le diagramme)

NB : On voit bien que l'on a déplacé Zi vers Zpi sur le cercle R=0,5, on utilise donc les formules de l'impédance.

La différence d'inductance correspond à la valeur de la self :

X = - 0,3 – 0,5 = - 0,8 soit une réactance de 0,8 $\times$50 = 40 Ω.

X = Lω soit $L = \frac{X}{\omega} = \frac{40}{2\pi F} = \frac{40}{2\pi 145e6}$ **=43,9 nH**

Calcul de la capacité :

la capacité étant ajoutée en parallèle, il faut travailler avec les admittances à partir du point Pi.

Impédance du point Pi : Zpi = 0,5 + 0,5j

Admittance du point Pi : $YPi = \frac{R}{R^2+X^2} - j\frac{X}{R^2+X^2} = \frac{0,5}{0,5^2+0,5^2} - j\frac{0,5}{0,5^2+0,5^2}$

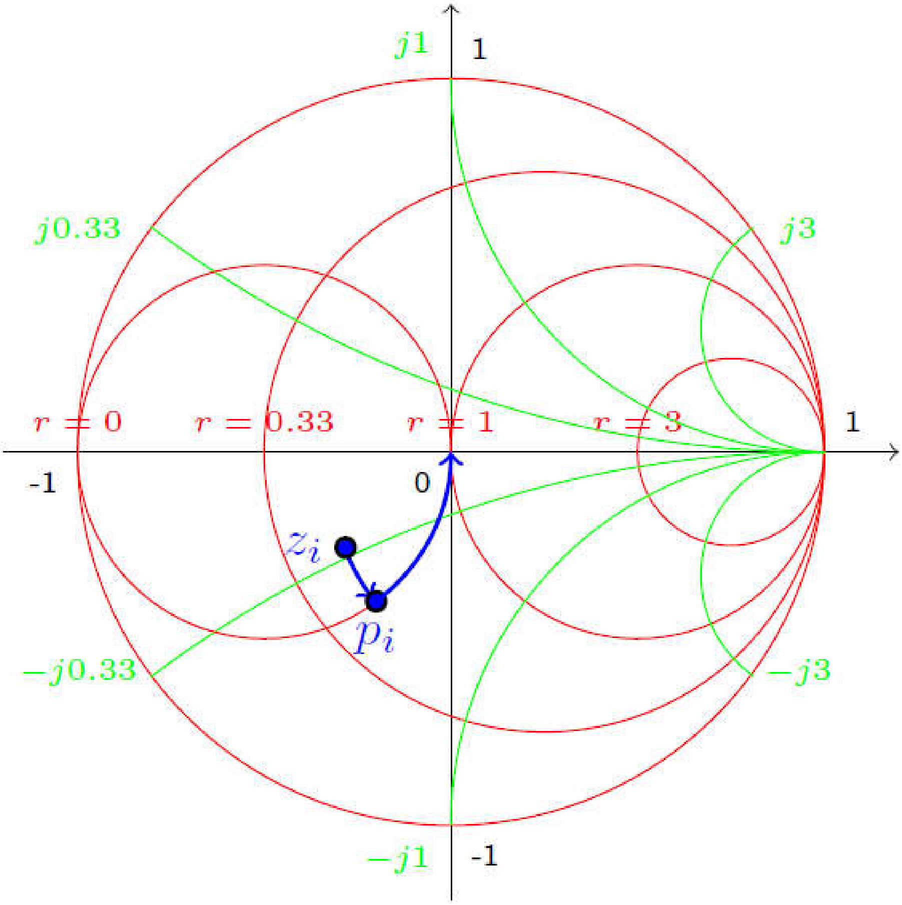
YPi = 1 – 1j

La différence de susceptance entre le point Pi et Z0 (centre) correspond à la valeur de la capacité :

B = -1 – 0 = -1 soit une susceptance de $\frac{-1}{50} = -0,02\ S$

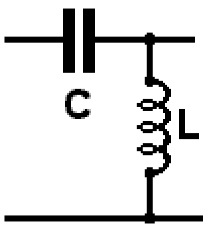
B = - Cω Soit $C = \frac{B}{\omega} = \frac{0,02}{2\pi F} = \frac{0,02}{2\pi 145e6}$ = **21,95 pF**

Exemple 2 d'adaptation



Le même point d'impédance Zi = 0,5 – 0,3j est à accorder, c'est à dire qu'il faut le ramener au point central de l'abaque Z=1 + 0j. On procède en deux opérations. :

1. On ajoute une capacité en série : le point se déplace sur le sens des résistances constantes dans le sens anti-horaire jusqu'au point de cercle de conductance G=1. (point p_i). La capacité est calculée de façon à se positionner sur ce cercle.
   Comme une place un élément en série, on utilise les cercles de résistances constantes pour se déplacer sur l'abaque.
2. On ajoute ensuite une inductance en parallèle, on utilise les cercles de conductance constante pour se déplacer. La capacité est calculée pour se déplacer de la valeur exacte pour atteindre Z=1.



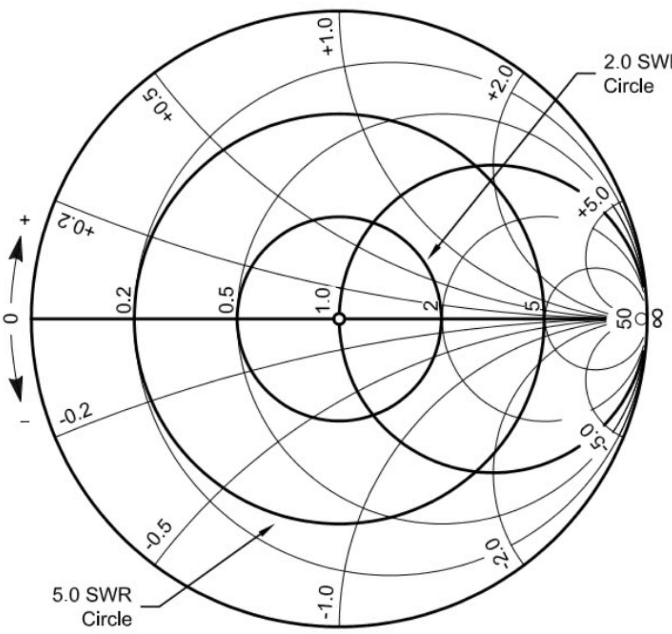
Dans les deux exemples ci dessus, on a deux solutions pour arriver au même résultat depuis le même point de départ. Le choix de l'une ou l'autre des solutions dépend de l'application :

Avec la solution 1, la self est un court-circuit en courant continu, si une composante continue est générée à la source, elle sera transmise à la charge.

Avec la solution 2, la charge est en court-circuit en courant continu.

Déplacement sur les cercles de ROS constants

Dans les deux solutions présentées ci dessus, on a utilisé les cercles en R ou G constant pour se déplacer. On peut aussi utiliser le réseau de cercles de ROS constant l'abaque de Smith pour se déplacer :



Ces cercles sont concentriques et ont donc tous pour centre commun le point Z=1.

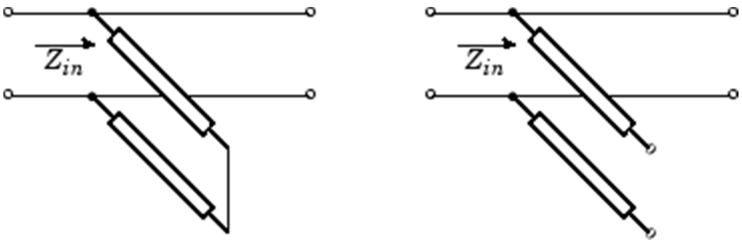
Pour se déplacer sur ces cercles, on utilise des stubs (lignes dont la longueur d'onde est calculée pour le déplacement souhaité). Ces stubs peuvent être positionnés en série ou en parallèle sur l'impédance que l'on souhaite ramener sur Z=1.

Nota : la rotation complète sur un cercle de ROS constant représente une géométrie de 360°, mais elle représente deux longueurs d'onde, soit 720°.

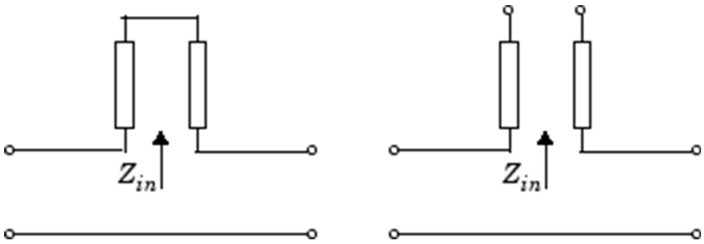
Adaptation avec des stubs

Un stub est un élément de ligne de transmission de longueur définie. Il peut être mis en shunt (court-circuit) ou en série, soit fermé ou ouvert dans chacun des modes :

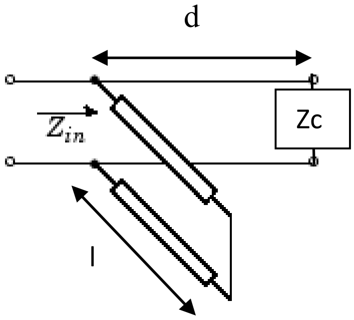
mode shunt fermé et ouvert:



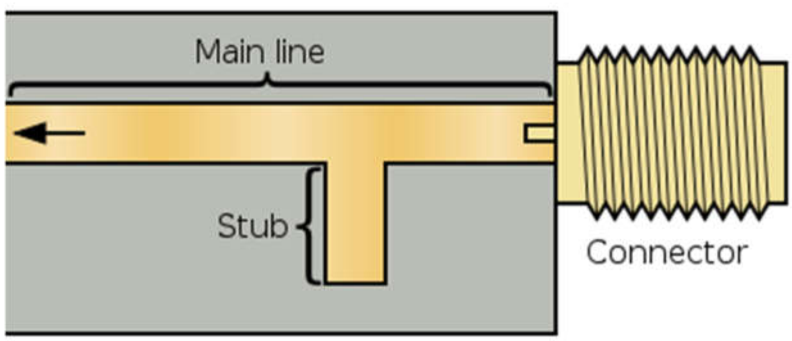
mode série fermé et ouvert:

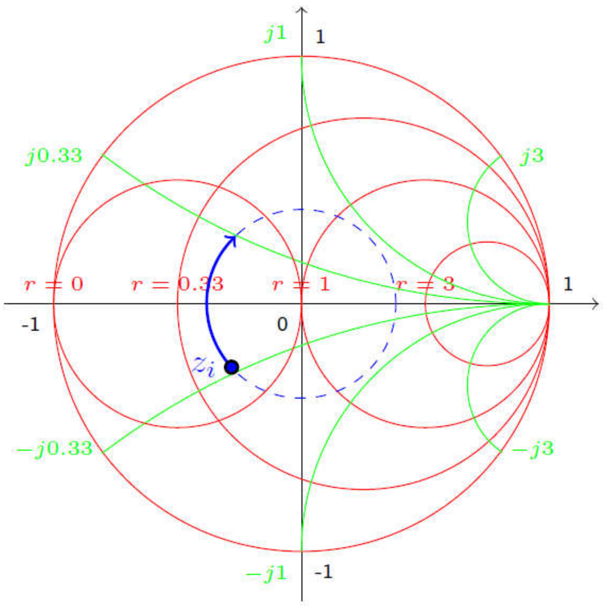


Le stub doit être placé à une distance stratégique de la charge Zc :



Exemple de stub stripline :

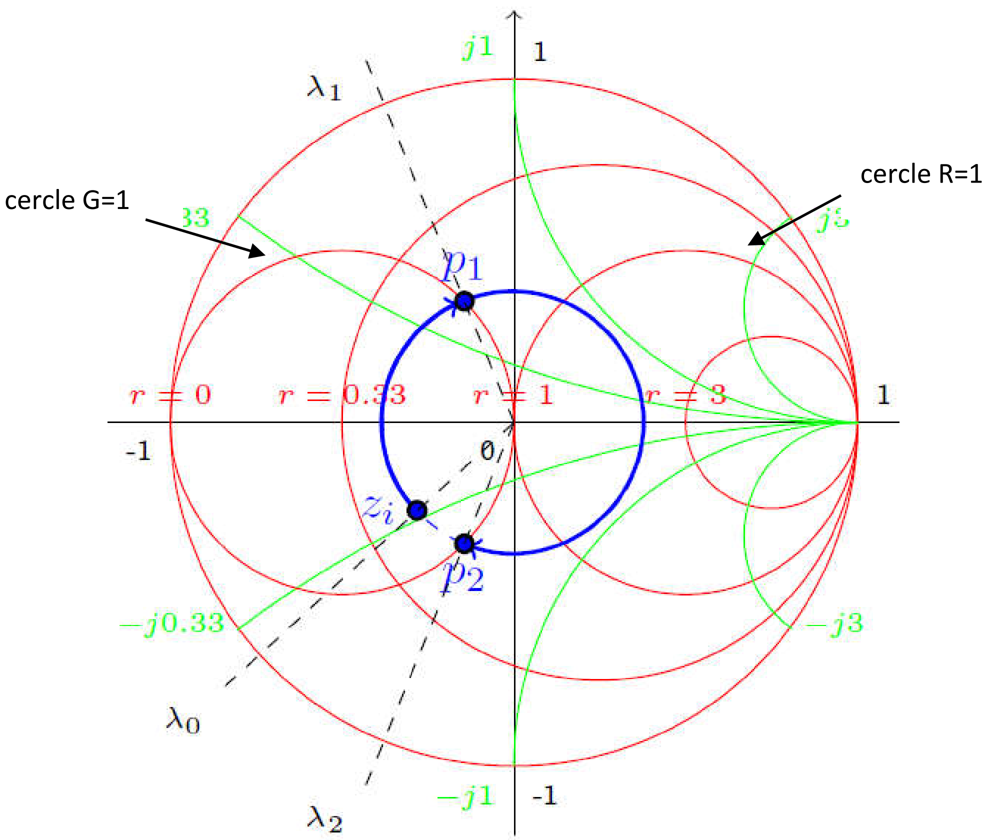




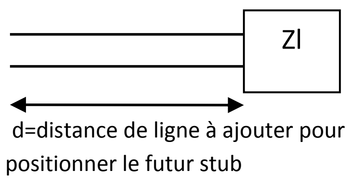
Ajouter un stub sur une impédance fait déplacer son impédance de telle manière qu'elle se déplace de la valeur de la longueur d'onde du stub sur le cercle de ROS constant qu'elle décrit.

Insérer un stub demande donc de déterminer la longueur du stub (l) et la distance à la charge (d)

Adaptation avec un stub parallèle fermé (stub shunt)



But : le point zi doit être ramené sur le cercle de conductance G=1 en utilisant le cercle de son ROS.



Etape 1 :

Il y a deux points possibles (intersection de 2 cercles en deux points) : p1 et p2, définissant deux chemins différents.

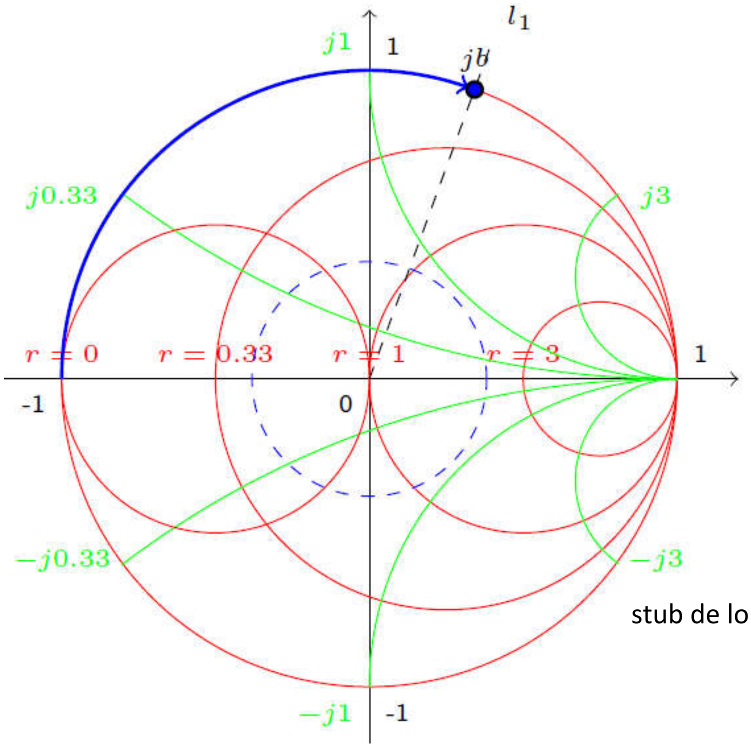
p1 = 1 + jb_1 Admittance de P1 d1 = λ1 - λ0

p2 = 1 - jb_2 Admittance de P1 d2 = λ2 - λ0

Note : on aurait pu également choisir de se positionner sur le cercle de résistance R=1. Voir le cas suivant (stub série)

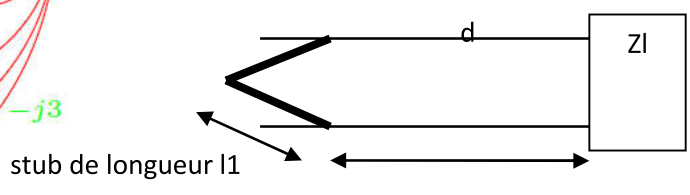
Etape 2 : Annuler la susceptance de p2 : b2 avec un stub en parallèle (stub shunt), mais de signe contraire

avec un stub de court circuit (l1)

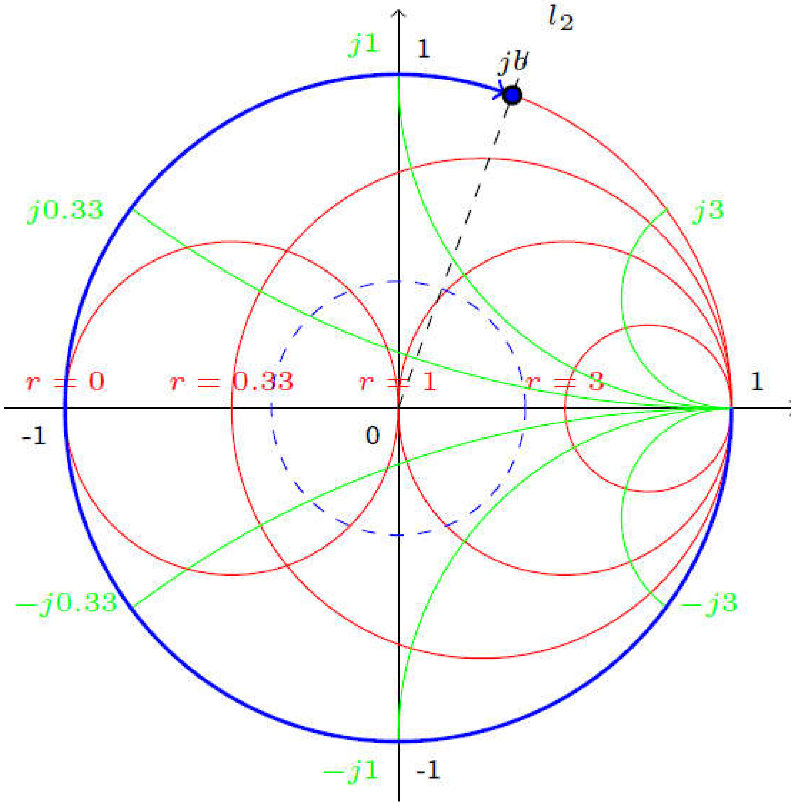


On prend le symétrique du point P2 par rapport au centre du diagramme de smith.

La longueur du stub est lue sur l'abaque : l1

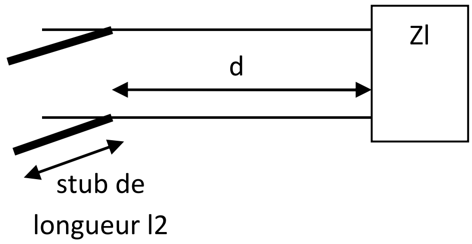


ou avec un stub ouvert (l2)



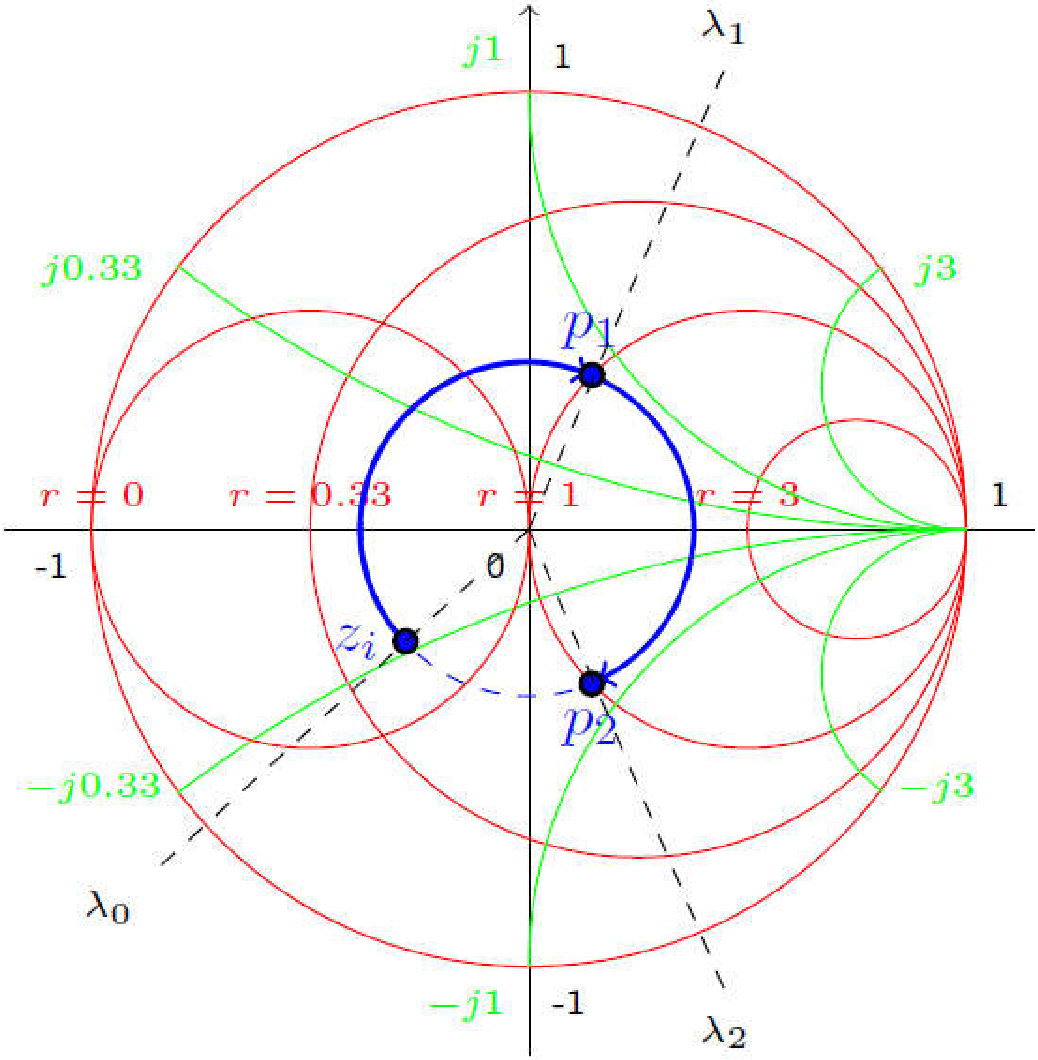
utilisation d'un stub parallèle (stub shunt) ouvert

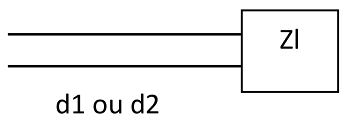
l2 : stub de circuit ouvert



Adaptation avec un stub série

L'adaptation en série avec un stub recherche l'intersection avec le cercle R=1. Il y a 4 solutions possibles : 2 longueurs de stubs différentes, et deux types de stubs.





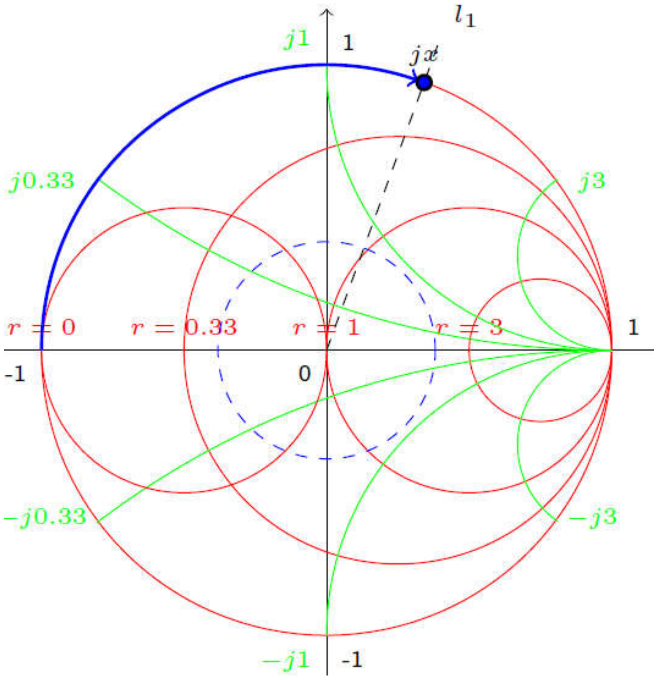
étape 1 :

Il y a deux points possibles (intersection de 2 cercles en deux points) : p1 et p2, définissant deux chemins différents donc deux solutions possibles

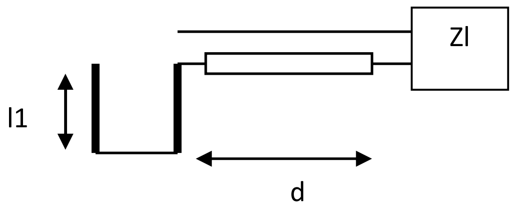
$p1 = 1 + jb_1$ Admittance de P1 $d1 = \lambda_1 - \lambda_0$

$p2 = 1 + jb_2$ Admittance de P1 $d2 = \lambda_2 - \lambda_0$

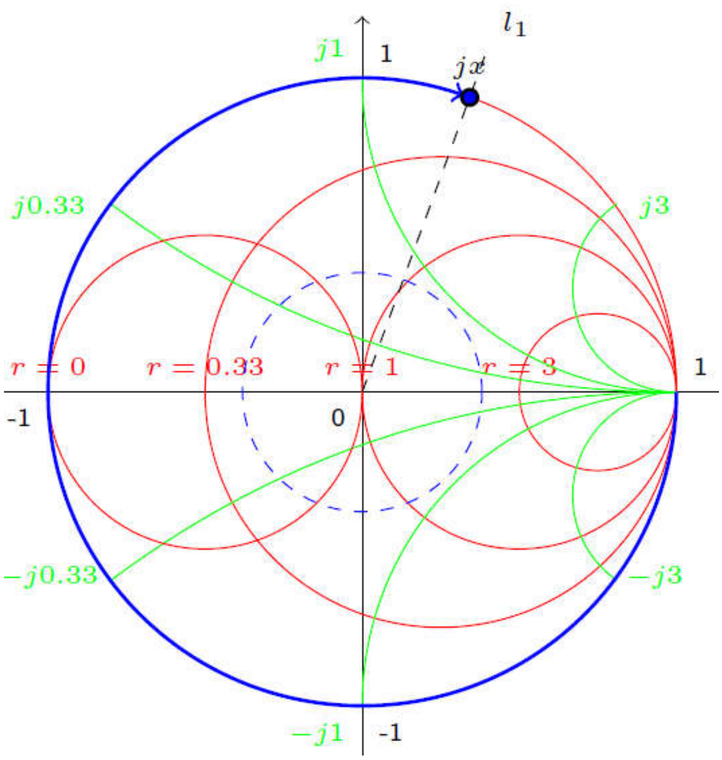
étape 2a : avec un stub série court-circuit



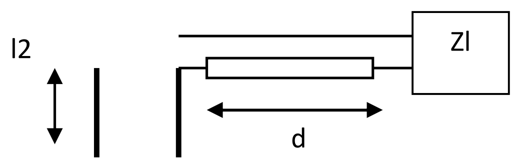
Il faut ensuite annuler la réactance de p1 ou p2 par une réactance de signe opposé avec un stub série. On lit sur l'abaque la longueur de la ligne L1. L1 est un stub court-circuit.



étape 2b : avec un stub série ouvert



On lit sur l'abaque la longueur de la ligne l1. L2 est un stub circuit ouvert.



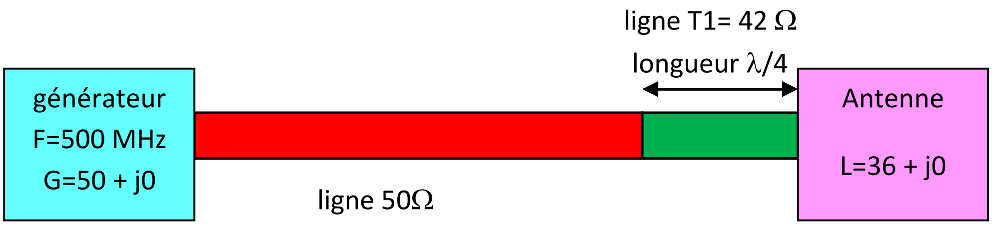
De ces 4 solutions, on choisira celle dont les longueurs de stub sont les plus courtes. Les stubs peuvent être en technologie circuit imprimé.

Adapatation d'impédance avec les lignes λ/4

Cas d'une réactance nulle

Il est possible d'utiliser uniquement une ligne quart d'onde si et seulement si la charge est **purement réelle** et ne présente pas de composante réactive à la fréquence de travail.

Exemple : fréquence de travail = **500 MHz**. Générateur 50Ω, antenne de **36 Ω** sans composante réactive (X=0)



$$T1 = \sqrt{Ze\ Zc} = \sqrt{50 \times 36} = 42{,}4\ \Omega$$

Pour brancher un câble coaxial de 50 ohms sur une antenne verticale 1/4 d'onde d'une impédance **pure** de 36 ohms, il suffit d'un 1/4 d'onde en câble coaxial 42 ohms. Pour un fonctionnement à 500 MHz, avec un câble de coefficient de vélocité de 0,66 la longueur λ de la ligne T1 est de

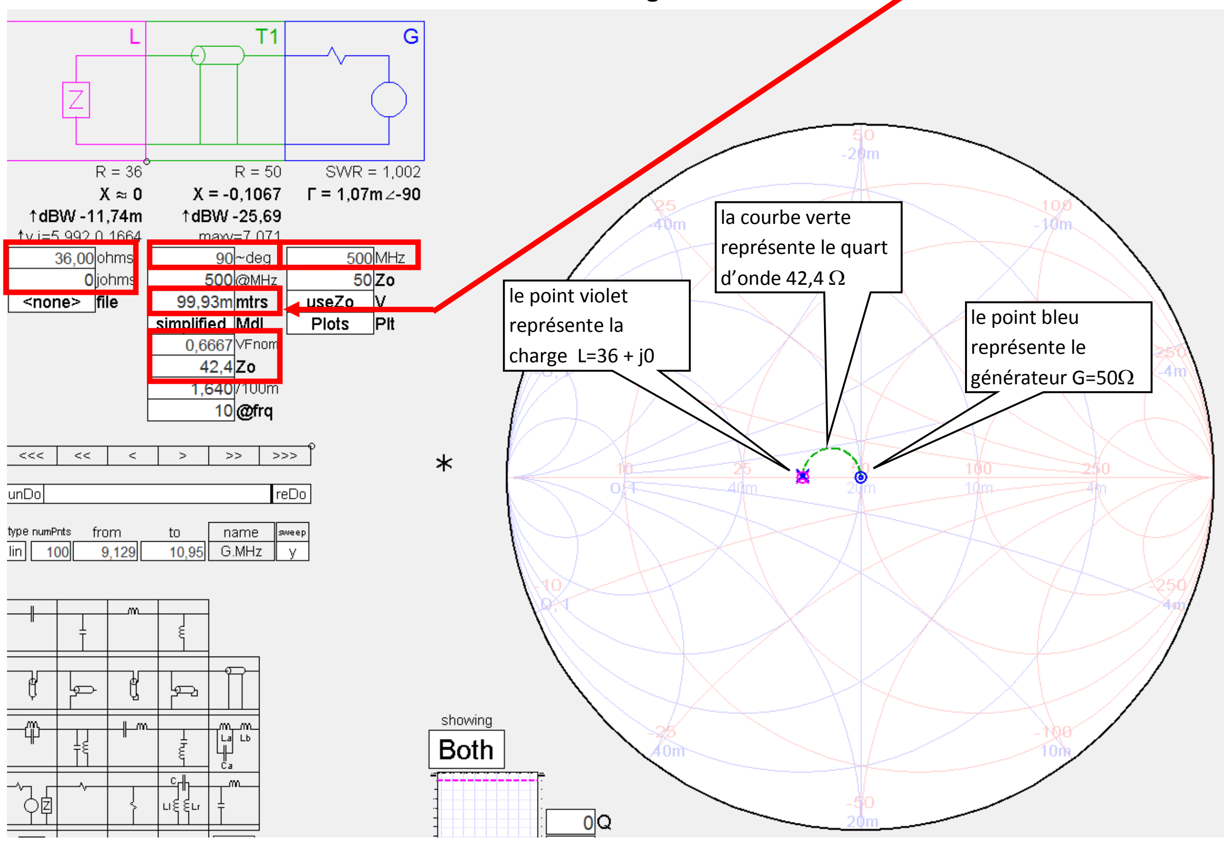
$$\lambda = \frac{c \times v}{f} = \frac{300 \times 0{,}66}{500} = 0{,}396 \text{ m} \quad \text{soit pour un quart d'onde : } 396/4 = 99 \text{ mm}$$

c=vitesse de la lumière

v = coefficent de vélocité du câble de 42 Ω

f = fréquence en MHz

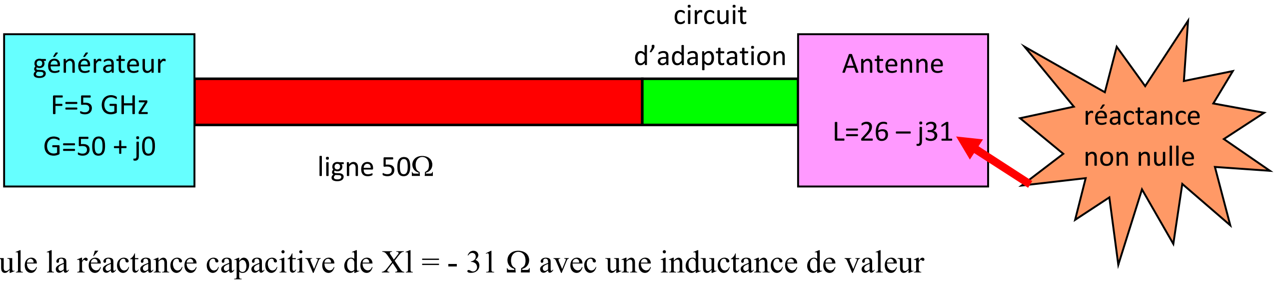
vérification avec le logiciel SimSmith:



Cas d'une réactance non nulle

Pour transformer une impédance en une autre, on peut aussi utiliser des lignes λ/4, mais il faut d'abord annuler la réactance soit avec des stubs, des capacités ou des inductances.

Exemple. On travaille sur la fréquence **5 GHz** avec une impédance de charge **L = 26 – j31** sur 50 Ω, soit ZL=0,52 – 0,62j en impédance normalisée.



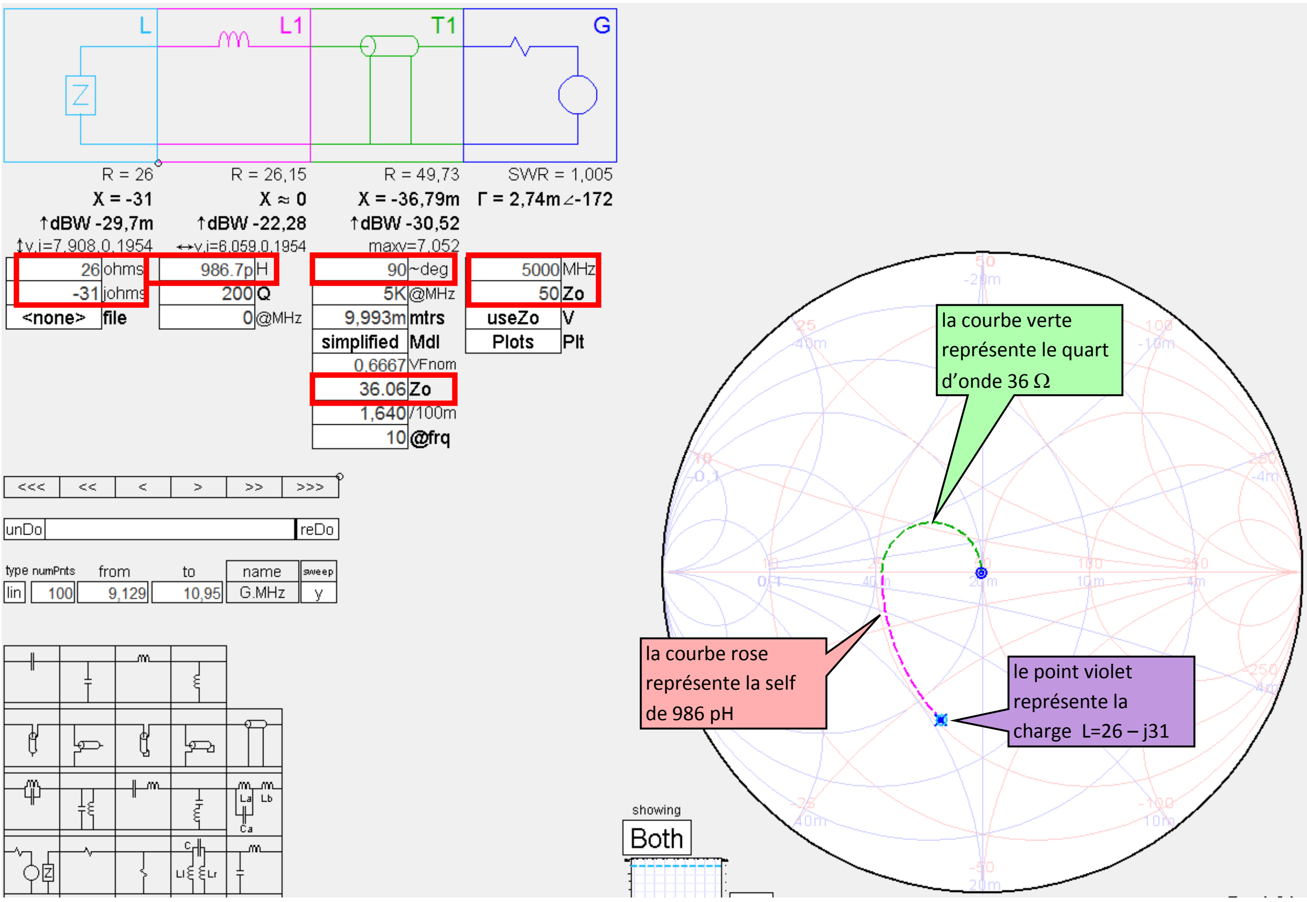
On annule la réactance capacitive de Xl = - 31 Ω avec une inductance de valeur

Xl = jL1ω soit $L1 = \frac{Xl}{2\pi F}$

$L1 = \frac{31}{2\pi 5.10e9}$ soit L1 = $9{,}867.10^{-10}$ H soit **986,7 pH**

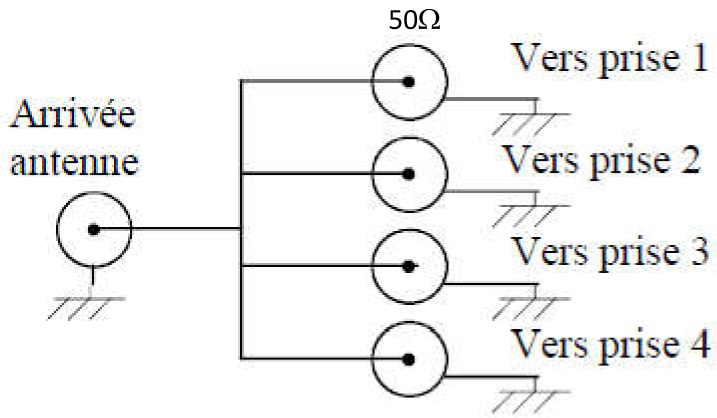
Impédance du quart d'onde T1= $\sqrt{Z0\ Zl} = \sqrt{50 \times 26}$ = **36,06 Ω**

vérification avec le logiciel SimSmith:



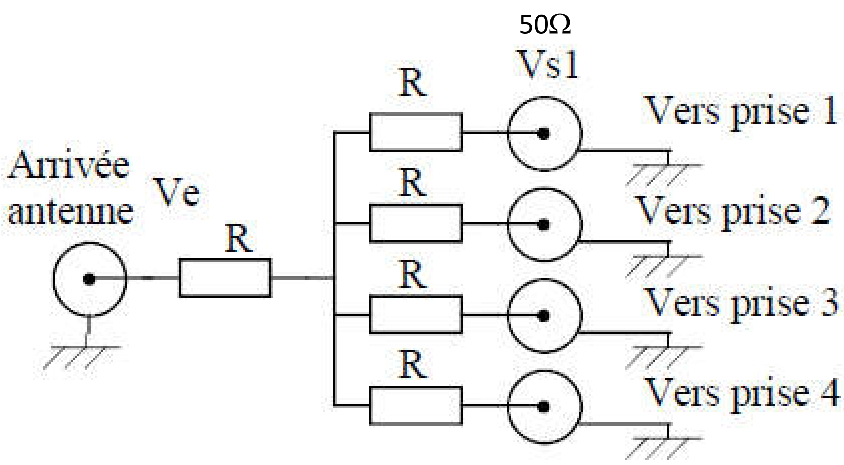
Exemple d'adaptation : le répartiteur

On souhaite distribuer l'arrivée d'une antenne 50 Ω vers 4 récepteurs simultanément, pour cela on choisit de faire une dérivation simple :



Chaque câble voit 4 résistances de 50Ω en parallèle, soit 50/4=12,5 Ω ⇒ aucune ligne n'est adaptée, des réflexions parasites dégraderont le signal.

Schéma n°1 d'un répartiteur :

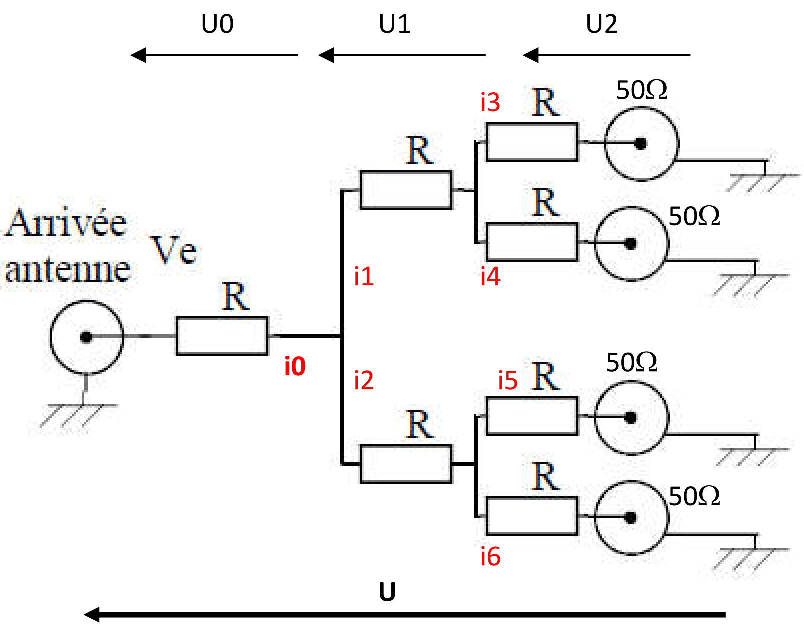


Le câble d'arrivée d'antenne voit une résistance R en série avec un ensemble de 4 résistances R+50 en parallèle. Cet ensemble doit être égal à 50 ohms soit :

$$R + \frac{R+50}{4} = 50\ \Omega \qquad \text{soit } R=30\Omega$$

L'atténuation introduite est alors de Att=10 log (1/4) = **-6 dB** (car on divise le signal par 4)
Si on débranche le câble sur la voie 4, l'adaptation n'est plus réalisée
Si une prise n'est pas utilisée, il faut donc **obligatoirement** y brancher une charge de 50 Ω.

Schéma n°2 d'un répartiteur :



Pour calculer la résistance R en fonction de la résistance totale équivalente Rtot (que l'on veut être égale à 50 Ω), on utilise la loi d'Ohm : (on pourrait utiliser la loi des mailles, la loi de Kirchhoff...)

U = Rtot × i0 donc Rtot = $\frac{U}{i0}$

i0 = i1 + i2 = i3 + i4 + i5 + i6 Comme les résistances (R+50) sont égales, i3 = i4 = i5 = i6
et i1 = i2

i0 = 4 × i3
i1 = 2 × i3

$$\text{Rtot} = \frac{U}{i0} = \frac{U2+U1+U0}{i0} = \frac{(R+50)i3+Ri1+Ri0}{i0} = 50$$

Exprimons tout en fonction de i3 :

$$\text{Rtot} = \frac{(R+50)i3+R(2i3)+R(4i3)}{4i3} = \frac{R+50+2R+4R}{4} = \frac{7R+50}{4} = 50$$

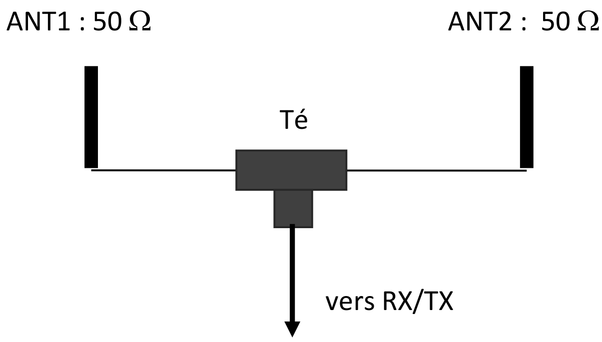
Comme Rtot = 50 Ω, $\frac{7R+50}{4} = 50$ d'ou **R= 21,4 Ω**

L'atténuation introduite est alors de Att=10 log (1/2) + 10 log (1/2) = -3 -3 **= -6 dB** (car on divise le signal par 2, puis à nouveau par 2).

Raccordements sur un Té par quart d'onde

On souhaite raccorder deux équipements vers un équipement commun ; par exemple :

- raccorder deux antennes vers un récepteur /émetteur
- raccorder deux cavités vers une antenne pour faire un duplexeur



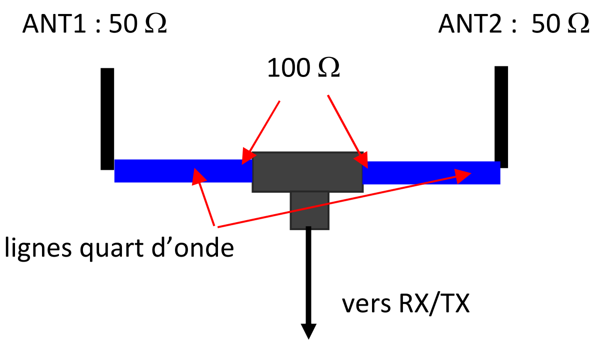
La mise en parallèle de deux éléments d'impédance Z1 et Z2 utilise la formule:

$$Z = \frac{Zant1 \times Zant2}{Zant1 + Zant2} \quad \text{comme Z1=Z2 : } Z = \frac{Zant^2}{2 \times Zant} \quad \text{avec Zant = 50}$$

Sans adaptation, le RX/TX voit deux charges (les antennes) de 50 Ω en parallèle, soit 25 Ω : le système est désadapté. On va utiliser des quarts d'onde pour réaliser l'adaptation.

Si l'impédance des antennes étaient chacune de **100 Ω**, leur mise en parallèle serait l'équivalent d'une antenne unique de 50 Ω. Les deux entrées du Té doivent donc voir 100 Ω sur leurs deux entrées. L'adaptation d'impédance au travers de quarts d'onde d'impédance Zc est donnée par la formule :

$$Zc = \sqrt{Z1 \times Z2}$$



Zc : impédance de la ligne quart d'onde
Z1 : impédance d'entrée du quart d'onde ; ici 50Ω
Z2 : impédance de sortie du quart d'onde : ici 100Ω

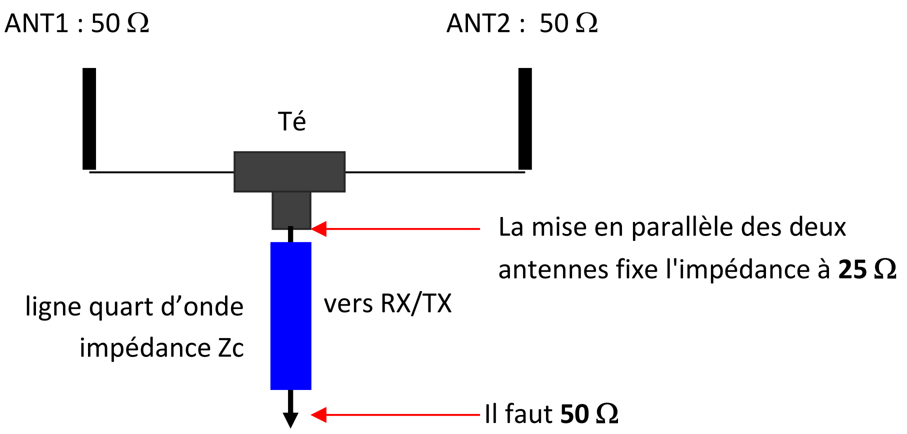
$$Zc = \sqrt{50 \times 100} = \mathbf{70,7\ \Omega}$$

Pour l'approvisionnement de la ligne, on arrondira à 75 Ω ; il faudra calculer, en fonction de la fréquence, la longueur du quart d'onde en fonction du coefficient de vélocité du câble.

Longueur du quart d'onde λ/4 *pour un coefficient de vélocité* c *à une fréquence* f *(en MHz):*

$$\text{long } (\lambda/4) = \frac{300c}{4f} \quad \text{soit } \frac{75c}{f}$$

Montage 2:



$$\text{Impédance du quart d'onde: } Zc = \sqrt{25 \times 50} = 35\ \Omega$$

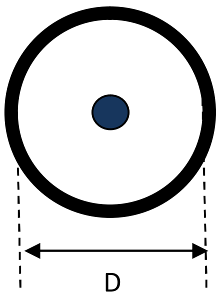
Exemple de calcul d'un quart d'onde pour une fréquence de 144,3 MHz et un câble c=0,66 :

$$\text{long } (\lambda/4) = \frac{300 \times 0{,}66}{4 \times 144{,}3} = 0{,}343\ m \text{ soit 34,3 cm (fiches incluses)}$$

Mécaniquement, s'il est impossible d'utiliser des câbles de 34 cm pour raccorder les antennes, il faut utiliser un multiple **impair** de ce quart d'onde. Exemple : **9** x 0,343m = 3,08 m.

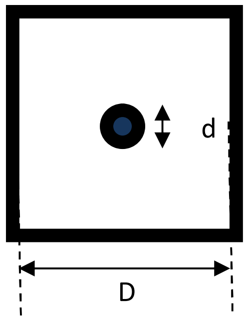
NB. La mise en parallèle des antennes nécessite également leur **mise en phase** correcte, qui utilise une mise en œuvre et des techniques spécifiques plus ou moins compliquées suivant les types d'antennes installées et le type de montage (Mise en phase verticale, horizontale)

Impédances de montages mécaniques caractéristiques



Ligne coaxiale

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



Ligne carrée à conducteur central rond

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

Exemple : D=35 d=14 on a Z=57 Ω

D est la mesure interne du tube extérieur ; d est la mesure externe du tube intérieur.

Application : le coupleur d'antennes 2 voies ou 4 voies

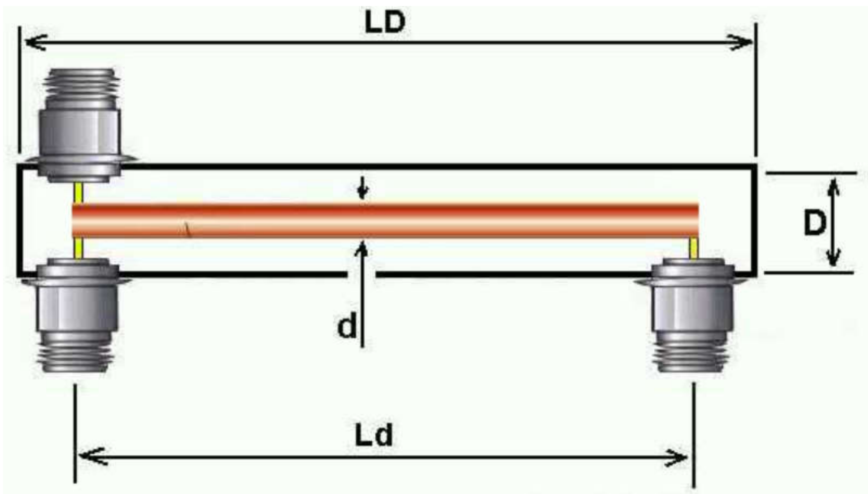


Tableau des dimensions en millimètres pour un coupleur 2 antennes

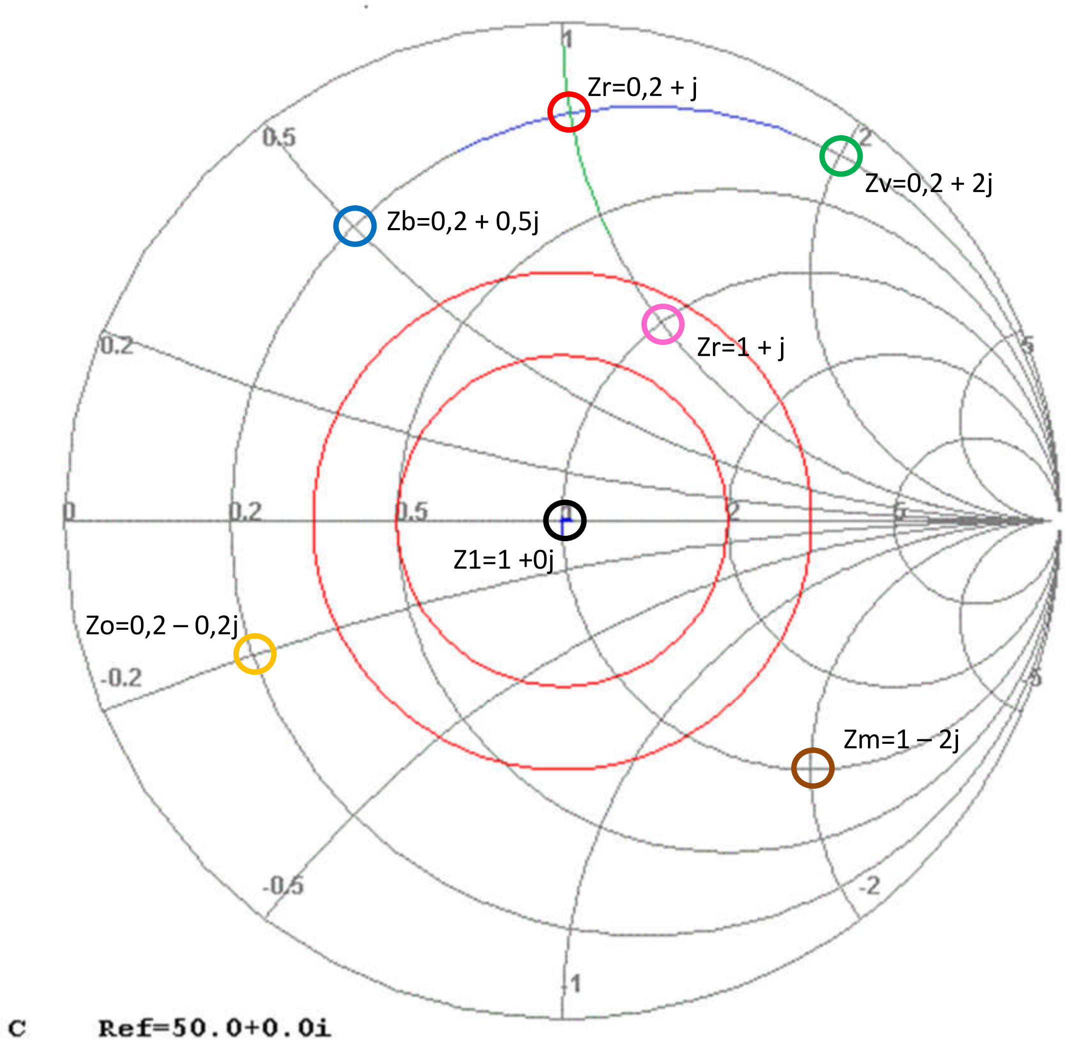
Fréquence	d int/ext (rond cuivre)	D int/ext (carré alu)	LD	Ld

145 MHz	12/14	24/26	517	549
435 MHz			172	204
1296 MHz			58	90

Tableau des dimensions en millimètres pour un coupleur 4 antennes

Fréquence	d int/ext (rond cuivre)	D int/ext (carré alu)	LD	Ld
145 MHz	16/18	26/28	517	549
435 MHz			172	204
1296 MHz			58	90

Utilisation de l'abaque de Smith pour adapter l'impédance



Exemple :

1. le point rouge a pour impédance normalisée Zr=0,2 + 1j. Si on se déplace vers la droite vers le point vert Zv=0,2 + 2j , on a augmenté l'inductance de +1j.

2.Si on se déplace vers la gauche vers le point bleu Zb=0,2 + 0,5j, on a diminué l'inductance de -0,5j, mais on peut dire aussi que l'on a augmenté la capacité de +0,5j.

3. Si on se déplace du point rouge vers le point orange Zo=0,2 - 0,2j , on a introduit une capacité de 1j – (-0,2)j = -0,8j

Cas 1 : l'impédance du point est capacitive et sur le cercle R=1

Il faut rajouter une self pour compenser. Le point **marron** se situe à l'impédance Zm = 1 – 2j pour une fréquence de 145 MHz. On souhaite ramener ce point vers l'impédance centrale Z_1=1 afin d'accorder l'antenne. Pour se rapprocher de ce point il faut augmenter l'inductance car l'impédance est capacitive (ajouter une self Z_L en série car on va se déplacer sur le cercle de résistance constante).

$Z_L = j2\pi FL/Zo$ impédance d'une self normalisée

Z = R + jX (cas général)

Impédance au point 1 avec la self pour : $Z_1 = Z_L + Z$

$$Z_1 = j2\pi FL/Zo + R + jX$$

$$Z1 = R + j\underbrace{\boxed{\left(X + \frac{2\pi FL}{Zo}\right)}}_{\text{réactance}}$$

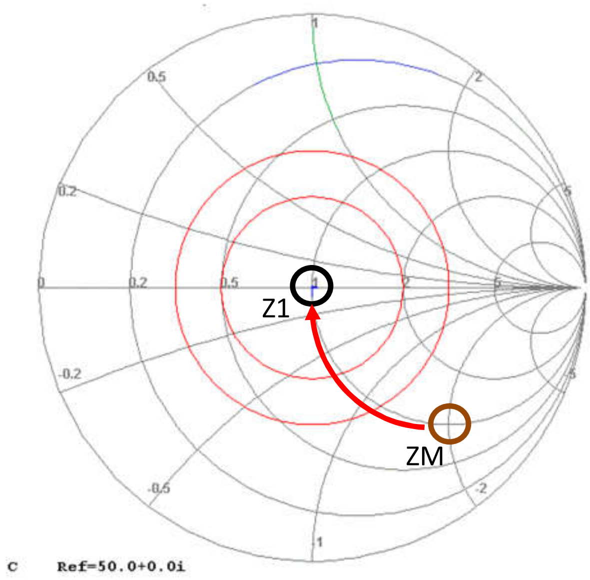
Calcul de la self pour que l'impédance soit de Zo=50 Ω, et de résistance pure :
Pour que le ROS soit nul au point Z1, il faut que la réactance de son impédance soit nulle, c'est à dire $X + \frac{2\pi FL}{Zo} = 0$

soit $L = \frac{-X\,Zo}{2\pi F}$

$$\boxed{\text{Pour } Zo=50\Omega : \quad L = \frac{-25X}{\pi F}}$$

Pour le point Z_M = 1 – 2j ramené sur le cercle des résistances pures sur la ligne X=0 à 145 MHz :

$$L = \frac{-25 \times (-2)}{\pi 145e6} = 1{,}1\text{e-}7 = \mathbf{0{,}1\ \mu H}$$



Le point d'impédance Zm (145 MHz) a été ramené au point Z1 d'impédance normalisé 1-0j (soit 50+0j) par adjonction d'une self de 0,1 µH, ce qui a pour effet d'annuler l'effet capacitif de l'antenne sur 145 MHz. L'antenne a été réaccordée.

En augmentant la self, on fait remonter le point Zm vers Z1 le long du cercle de résistance constante.

Ceci n'est possible que si le point Zm est sur le cercle des résistances normalisées égal à 1 (soit 50Ω)

Cas 2 : l'impédance du point est inductive

De plus, ce point n'est pas sur le cercle d'impédance 1.

Il faut rajouter une capacité pour compenser

$Zc = \frac{-j}{Zo\ 2\pi FC}$ impédance normalisée d'une capacité

$Z = R + jX$ (cas général)

Impédance au point Zr avec la capacité: $Zr = Zc + Z$

$$Zr = \frac{-j}{Zo\ 2\pi FC} + R + jX$$

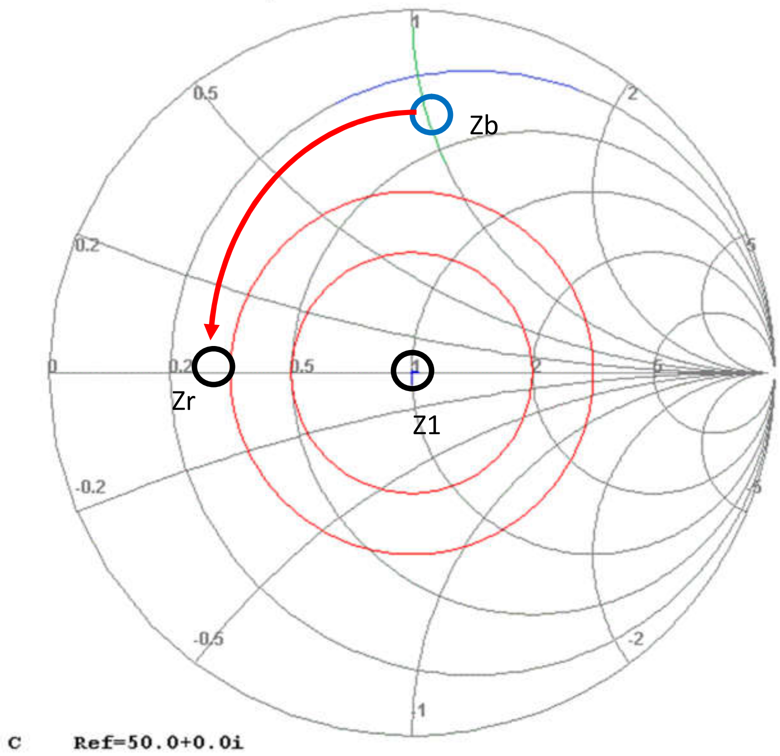
$$Zr = R + j\left(X - \frac{1}{Zo\ 2\pi FC}\right)$$

Pour que la réactance de Z1 soit nulle, il faut que $X - \frac{1}{Zo\ 2\pi FC} = 0$

soit $C = \frac{X}{Zo\ 2\pi F}$ Pour Zo=50 Ω $C = \frac{X}{100\pi F}$

Exemple : soit le point d'impédance Zb = 0,3 + j à 500 MHz, il n'est pas situé sur le cercle d'impédance 1. Pour ramener ce point Zb sur l'axe des résistances pures (point Zr), il faut insérer un condensateur dont la valeur est :

$$C_1 = \frac{1}{100\pi 500e6} = 6{,}36\ e\text{-}12 = 6{,}36\ pF$$

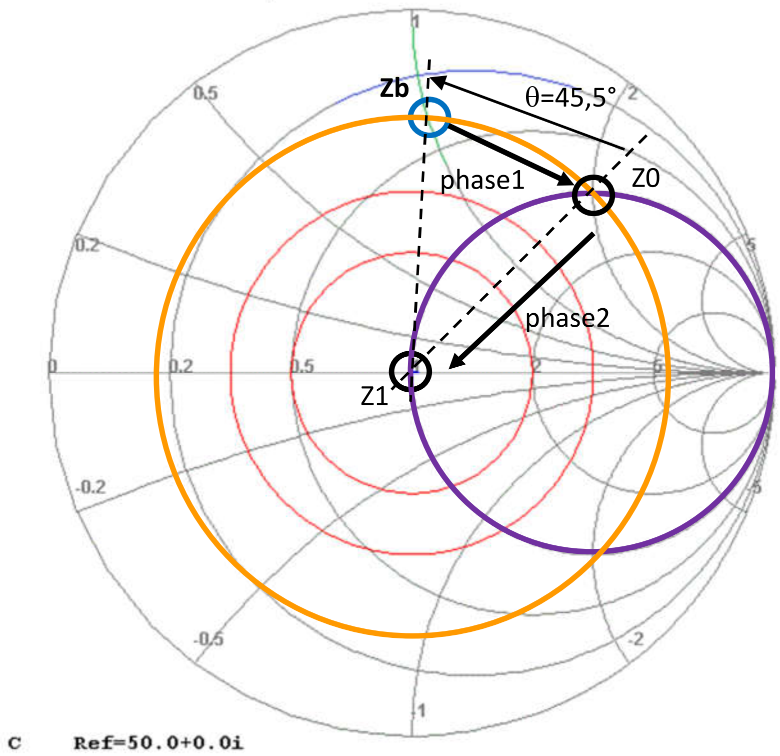


Le point d'impédance Zb (500 MHz) a été ramené au point Zr d'impédance normalisé 0,3+0j (soit 15+0j) par adjonction d'une capacité de 6,36 pF, ce qui a pour effet d'annuler l'effet inductif de l'antenne sur 500 MHz.

L'antenne n'est cependant pas encore réaccordée car elle présente une impédance pure de 15Ω.

Cas d'un point non situé sur le cercle R=1

Le point Zb a pour impédance Zb = 0,3 + j (15 + 50j) à 500 MHz. n'est pas situé sur le cercle R=1 (cercle violet). Pour accorder l'antenne sur 500 MHz, le point Zb doit d'abord être déplacé sur le cercle de résistance R=1 en violet en suivant sur le cercle orange de ROS constant passant par Zb jusqu'au point Z0 (phase 1) puis, ramené au point Z1 par le cercle violet de résistance 1 (phase 2) :



Phase 1 :

Le rapporteur donne l'angle de déplacement de Zb vers Z0 de θ=45,5°. Sur un diagramme de Smith, une longueur d'onde entière correspond à 2 tours soit 720°: 1λ = 720°

donc l'angle θ de 45,5°correspond à $\frac{45{,}5\lambda}{720} = 0{,}0632\ \lambda$

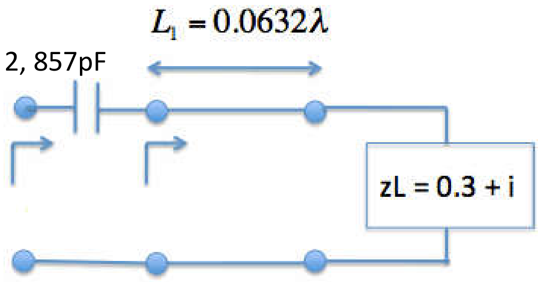
Le déplacement du point Zb vers Z0 est réalisé par une ligne de **0,0632λ à la fréquence d'accord désirée (ici 500 MHz).** Cette ligne est réalisée par exemple un un coaxial d'impédance Zo.

Phase 2 :

on lit sur le diagramme de Smith l'impédance de Z0 = 1 + 2,228 j

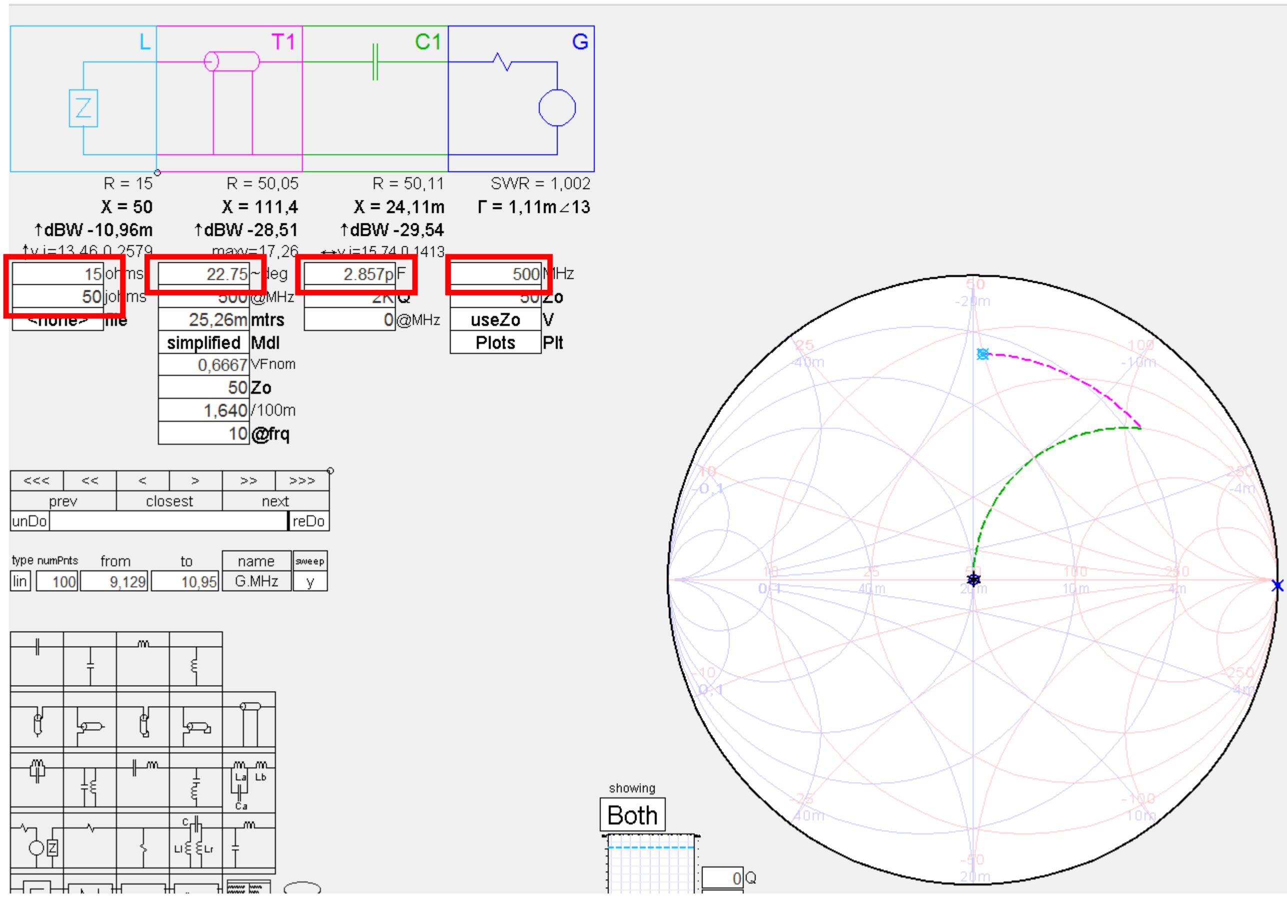
L'impédance Z0 étant inductive (X=2), on doit utiliser une capacité pour ramener Z0 vers Z1.

$$C = \frac{1}{X.2\pi F} = \frac{1}{2.228 \times 50 \times 2\pi 500e6} = \mathbf{2{,}857\ 10^{-12}\ F = 2{,}857\ pF}$$



L'antenne est maintenant parfaitement adaptée pour une utilisation sur 500 MHz.

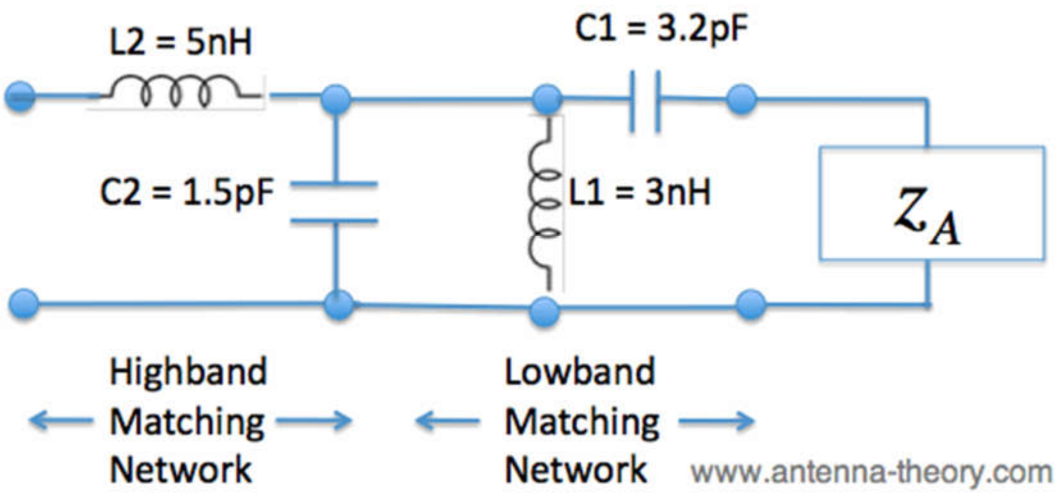
Vérification avec le logiciel simSmith



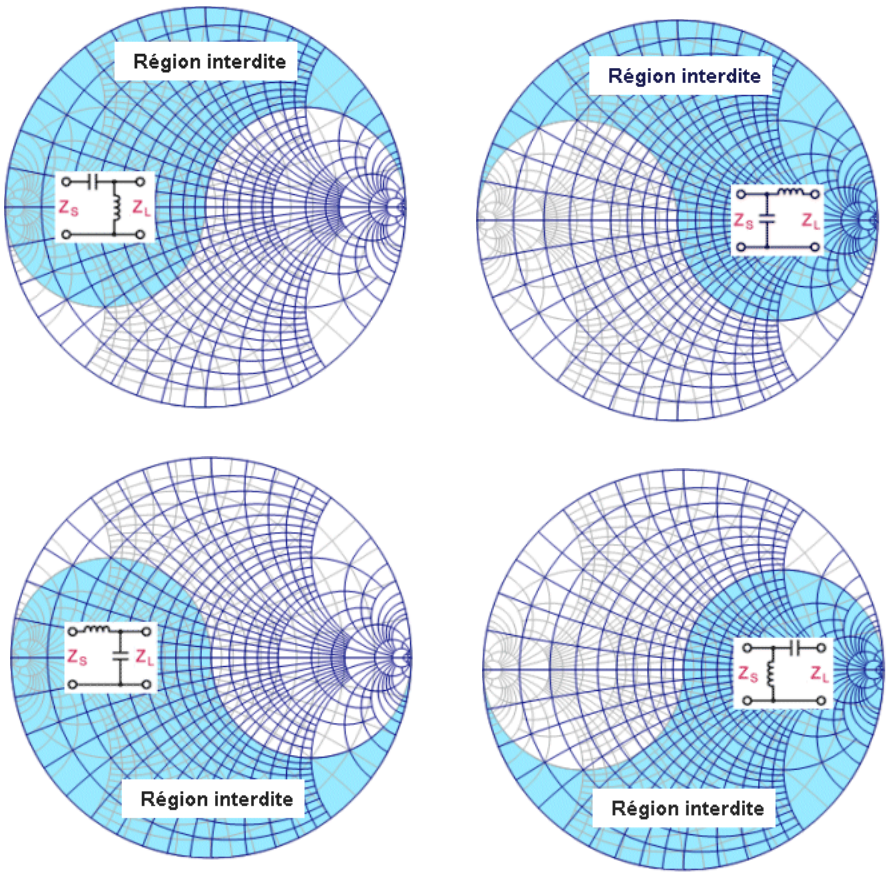
Fréquence de travail : 500 MHz

Angle du quart d'onde : 22,75 ° soit 45,5/2 (par rapport à l'abaque de Smith, l'angle réel est divisé par 2)

Adaptation pour deux fréquences sur une antenne : création d'une antenne bibande



Zone interdites de l’abaque de Smith

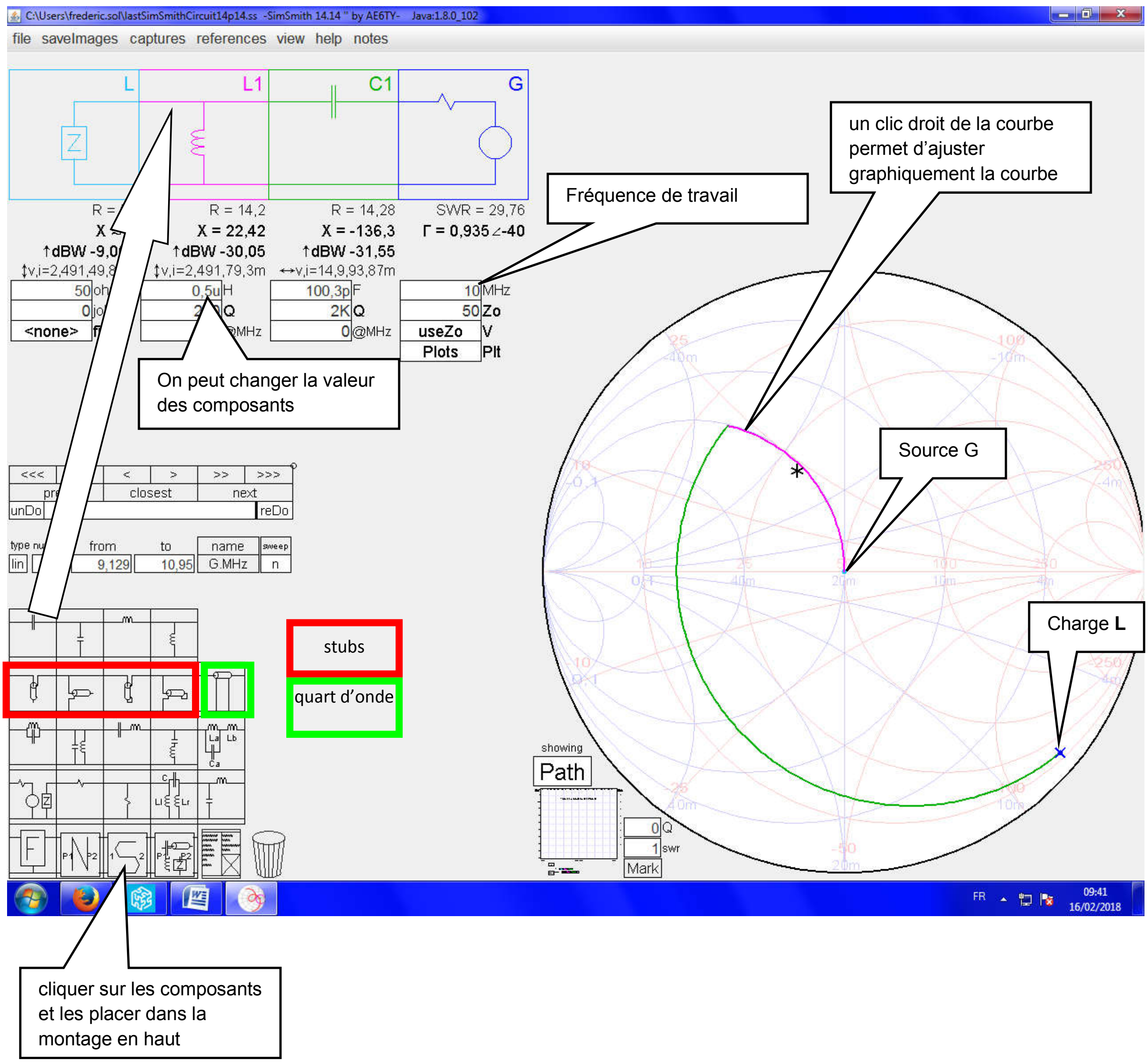


En fonction de la combinaison des composants utilisés, il y a des zones inaccessibles. ZL étant la charge et Zs la source, si le point de départ se situe dans une zone interdite pour le montage considéré, on ne pourra pas revenir au centre de l’abaque pour annuler la réactance et transformer l’impédance vers 50 ohms pur. Pour atteindre ces zones interdites, il faudra changer de montage.

Logiciels de calculs informatiques

Il existe un certain nombre de logiciels qui permettent de calculer les adaptations sur un diagramme de smith depuis un point complexe.

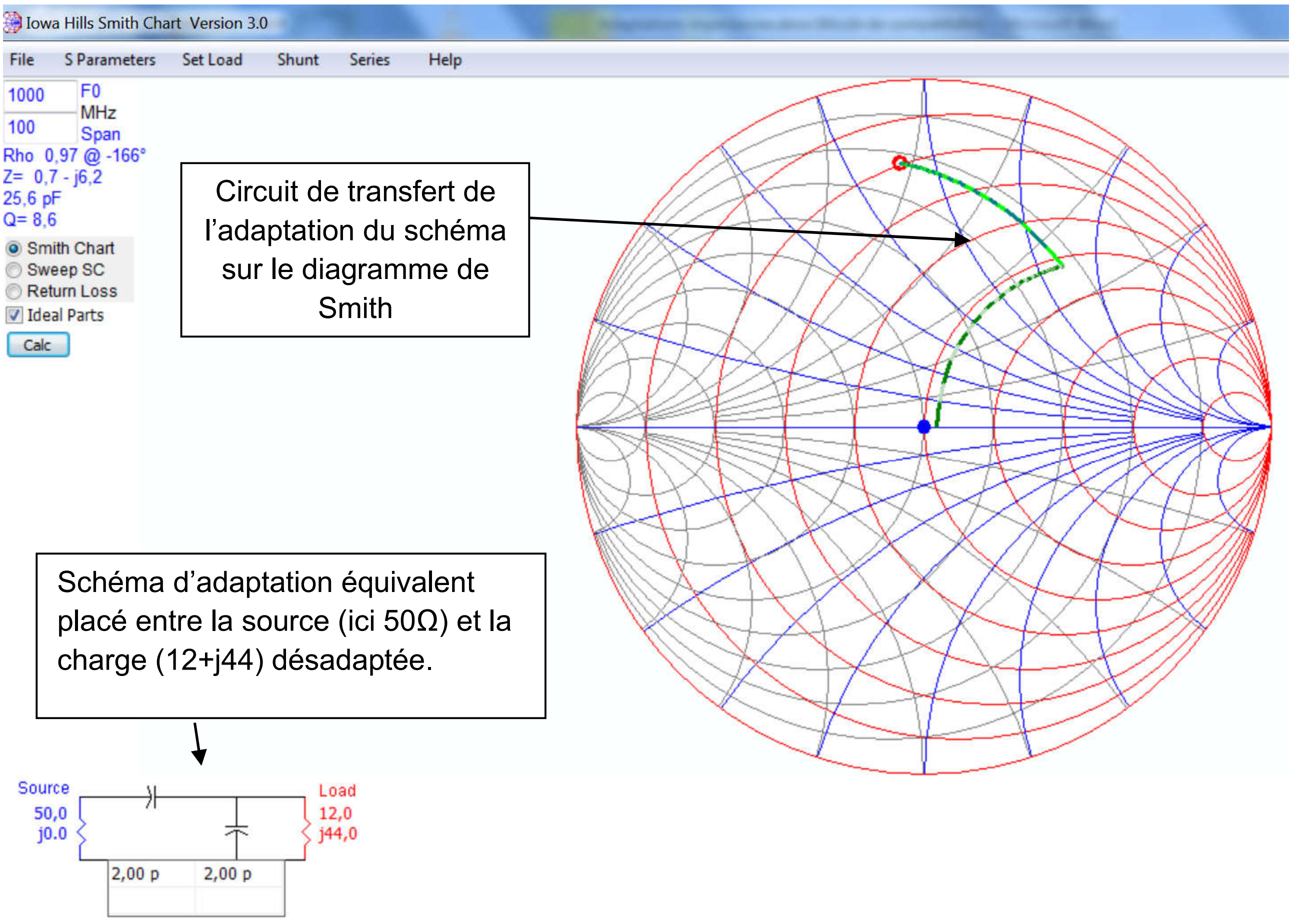
SimSmith



En cas d'erreur, le CTRL Z est fonctionnel

Iowa Hills Smith Chart

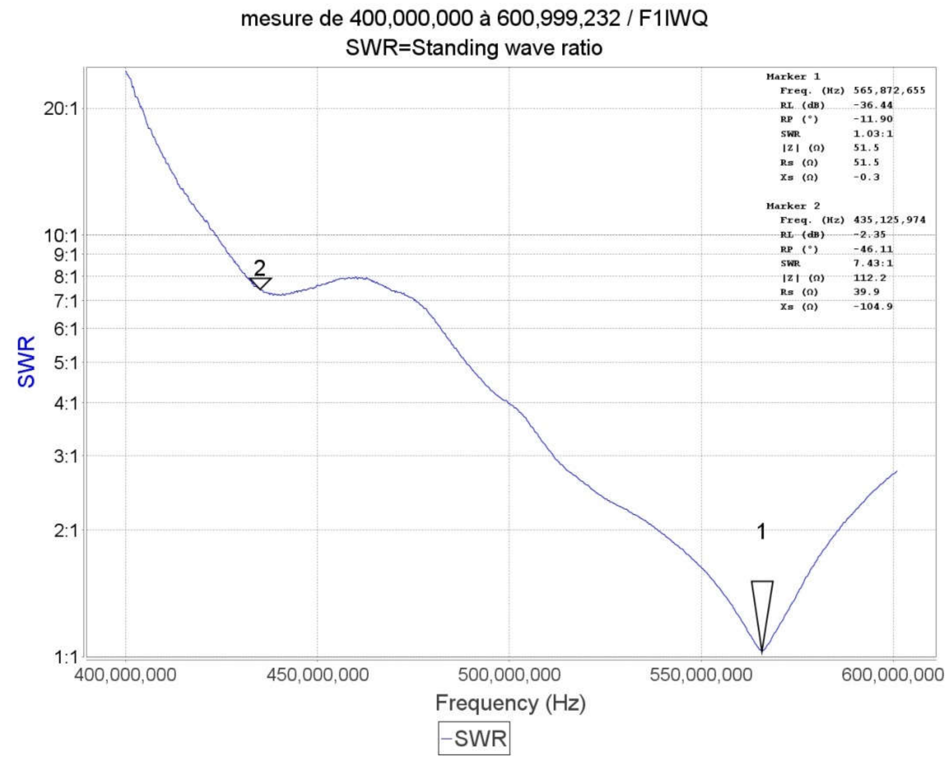
On donne le point d'impédance de la charge (ici 12+j44 en point rouge), et on insère des composants soit en série ou en parallèle pour atteindre le point bleu 50+j0. On indique la fréquence de travail (ici 1000 MHz). Le logiciel dessine le réseau d'adaptation équivalent avec la valeur des composants :



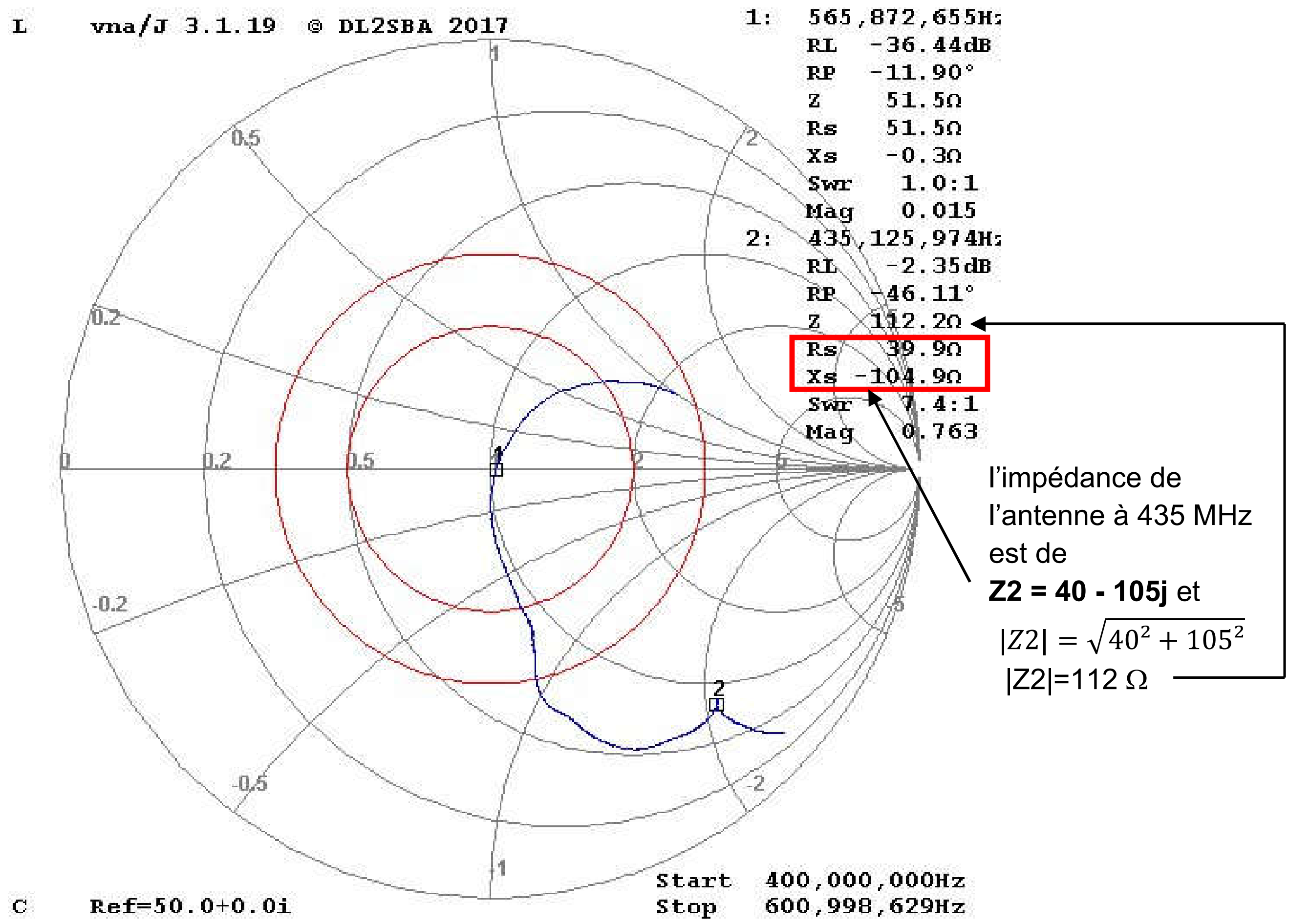
Nous allons montrer ici un exemple d'adaptation d'impédance sur une antenne non accordée par logiciel.

Adaptation sur une antenne avec logiciel

On désire réaccorder une antenne sur 435 MHz, voici la courbe de ROS de l'antenne et le tracé sur l'abaque de Smith effectué avec un mini VNA



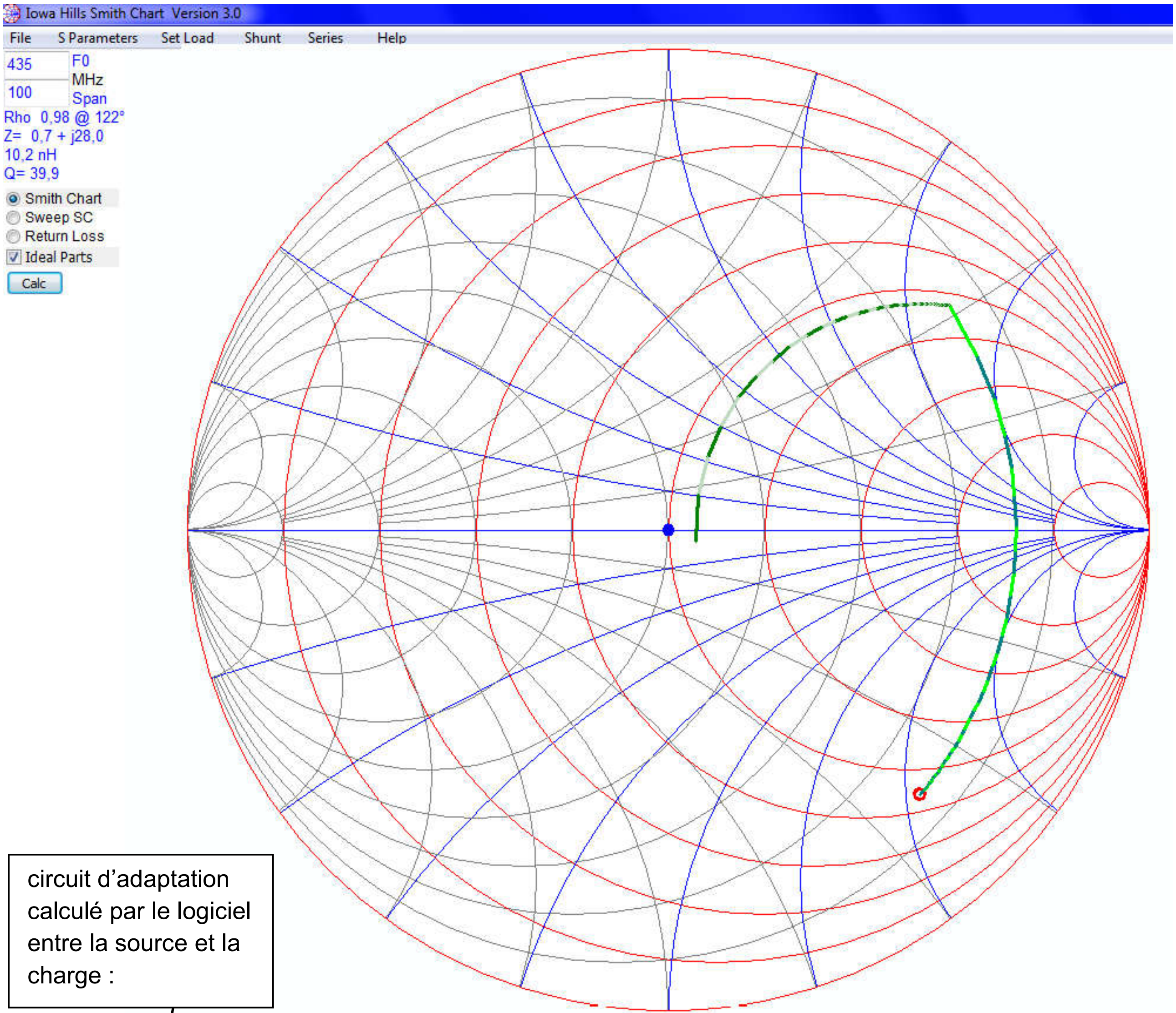
Cette antenne est accordée sur la fréquence 565 MHz (marqueur 1), on désire la réaccorder sur 435 MHz (marqueur 2)



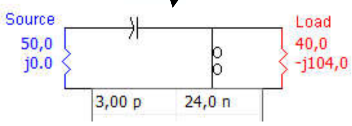
Le point de fréquence 435 MHz a été placé avec le marqueur 2. La mesure donne une résistance de Rs= 39,9 Ω et une réactance de Xs= − 104,9 Ω, soit une impédance complexe de **Zc=39,9 – j104,9** soit Z=0,8 – j2,1 en normalisé. Ce point constitue la charge qu'il va falloir adapter, et donc le point de départ du trajet vers le point d'impédance Zs=50+j0 (la source).

Sur le logiciel Iowa Smith, on commence par positionner le point Zc, puis on positionne une self en parallèle et un condensateur en série. Le logiciel donne une valeur de condensateur de 3 pF et une valeur de self de 24 nH. L'antenne est alors réaccordée sur 435 MHz.

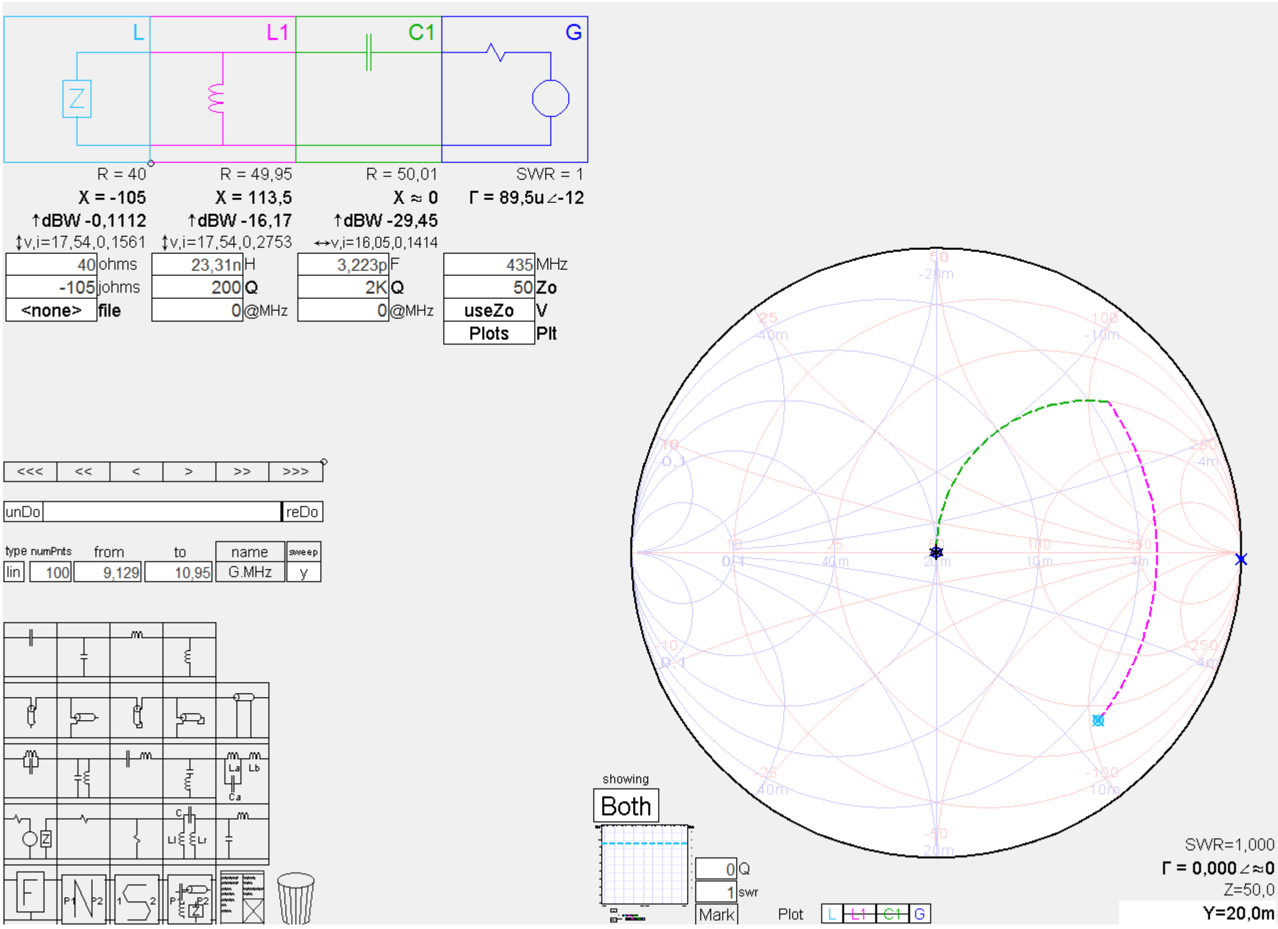
Avec le logiciel IOWA



circuit d'adaptation calculé par le logiciel entre la source et la charge :



Avec le logiciel SimSmith



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