



Le Vector Network Analyzer ... en pratique

UBA LIEGE : ON5VL site Internet <https://on5vl.org>

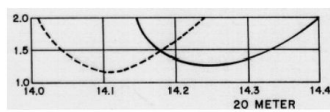
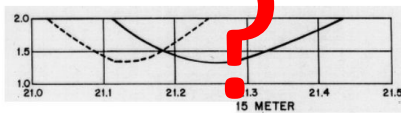
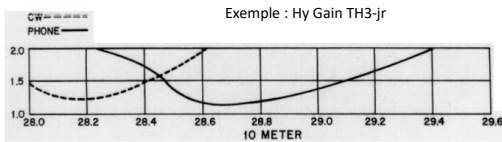


Questions qui empêchent le radioamateur de dormir ...

Est-ce que mon antenne est bien adaptée ?

Quel est le ROS ?

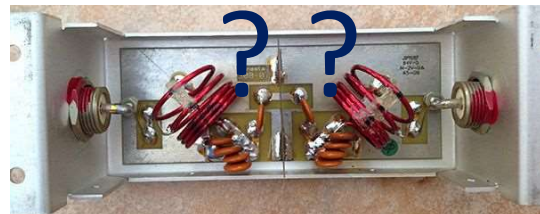
En début, au milieu et en fin de bande ?



Quelles sont les pertes de ce câble ?



Est-ce que mon filtre pour 14 MHz est bien réglé ?



Questions qui empêchent le radioamateur de dormir ...

La réponse sera une courbe du ROS en fct de la fréquence.

ROS ou SWR

$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{Z_{ant}}{50} \text{ ou } \frac{50}{Z_{ant}}$$

Return Loss , RL ou S11

$$RL = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \text{ en dB}$$

$$RL = 20 \log \left(\frac{ROS - 1}{ROS + 1} \right) \text{ en dB}$$

RL ≈ S11 ? OUI et NON ?!
c'est le même nombre !

Perte d'insertion , IL

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_i} \right) \text{ en dB}$$

Courbe de réponse ?

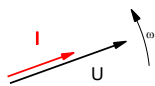
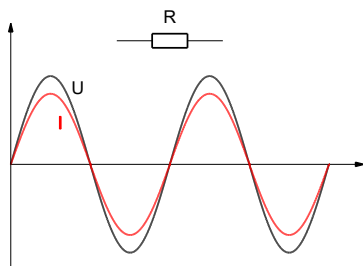
Le nano VNA peut nous donner une réponse ...



3

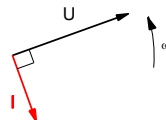
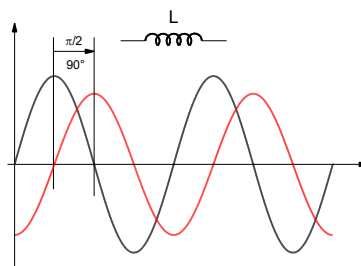
PC1

Petite révision ... R L C en courant alternatif



$$I = U / R$$

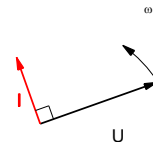
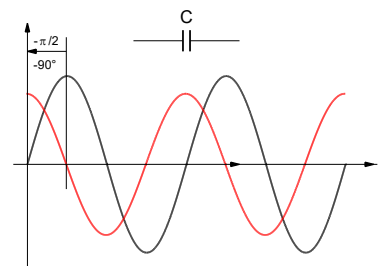
le courant est en phase avec la tension



$$I = U / Z$$

$$I = U / \omega L$$

le courant est en RETARD sur la tension



$$I = U / Z$$

$$I = U \omega C$$

le courant est en AVANCE sur la tension

4

Diapositive 4

PC1 Les 3 composants de base R , L , C La représentation cartésienne, avec l'axe amplitude de tension ou de courant et l'axe du temps. C'est aussi ce qu'on pourrait voir sur un oscilloscope.

La représentation vectorielle : la grandeur du vecteur, sa vitesse angulaire ω et sa phase ϕ

La loi d'Ohm généralisée (en alternatif)

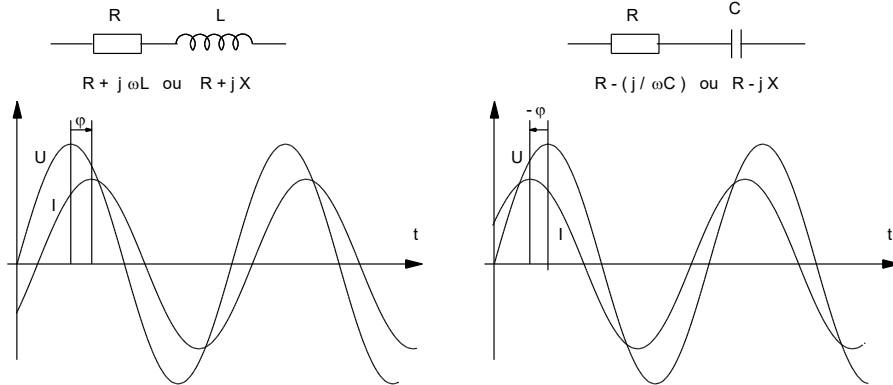
La phase du courant par rapport à la tension : se souvenir que pour une self le courant est en RETARD sur la tension

Mais ce qui nous intéresse le plus c'est la combinaison (série) de R et de L ou de R et de C

Pierre CORNELIS, 11-11-23

Petite révision ... R L C en courant alternatif

Mais, le plus généralement on a des combinaisons de R, de L et de C



Eurêka ... la notion d'opérateur imaginaire j

5

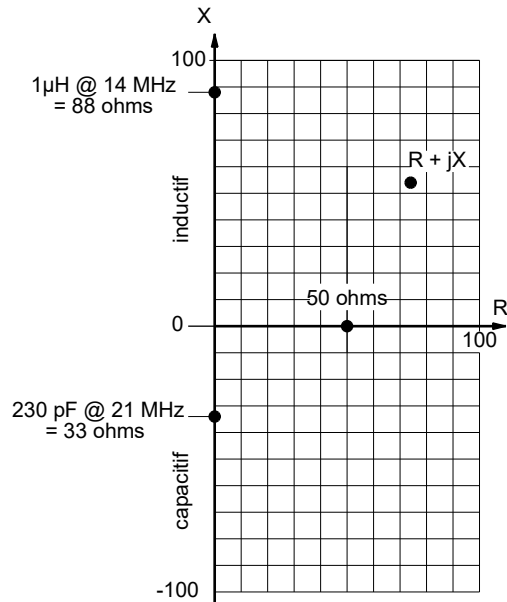
l'opérateur imaginaire ... un truc de « ouf »

En retard ou en avance ? Comment dire déphasé de 90° ?

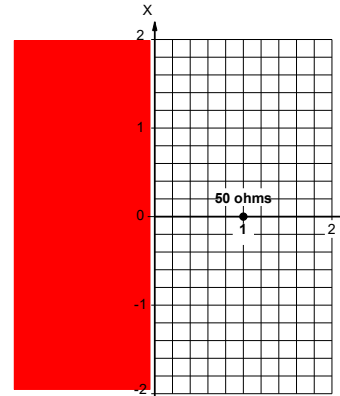
- déphasé de **180°** , c'est simple , c'est $-$, c'est **-1**
- et au fait déphasé de 180° , c'est 2 x déphasé de 90°
- on va donc inventer un **opérateur** pour dire que déphasé de 90° , c'est la « moitié » du chemin pour arriver à 180°
- cet opérateur, c'est l'opérateur **imaginaire**
- **i** pour les mathématiciens, **j** pour les électriciens !
- donc $j \times j = -1$
- donc $j = \sqrt{-1}$ et $j^2 = -1$ et $j^3 = -j$ et $j^4 = +1$
- un truc de « ouf » ... qui va faciliter l'écriture et le calcul !

6

plan des impédances



On « **normalise** » le diagramme en divisant toutes les coordonnées par 50 ... si on est dans un système à 50 ohms ↓



Attention : rien n'existe çà gauche, c'est zone interdite !

7

la question des lignes de transmissions ...

Et Phillip Hagar Smith propose (en 1936-39) une solution graphique pour calculer l'impédance d'entrée d'une ligne chargée par une impédance Z_0

C'est l'abaque de Smith !
Merci Mr Smith

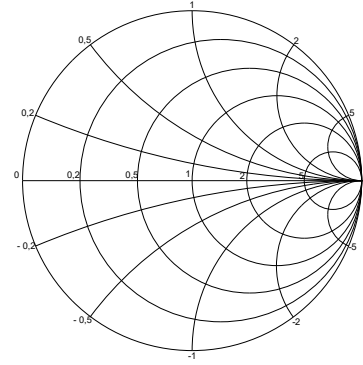
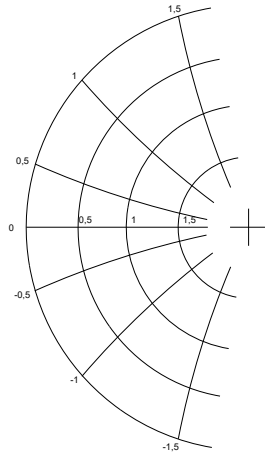
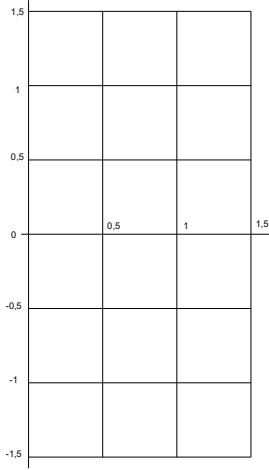
There are four factors that generally enter the solution of problems involving the changing input impedance along a line. These are the characteristic impedance of the line, the load impedance, the length of the line, and the input impedance. If any three of these are known, the fourth may be found from the relationship:

$$Z_i = Z_0 \left[\frac{Z_r + jZ_0 \tan 2\pi L}{Z_0 + jZ_r \tan 2\pi L} \right]$$

Electronics Magazine - January 1939 p 29-31

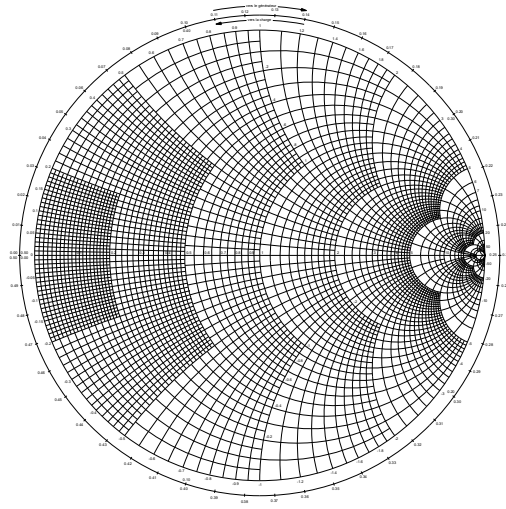
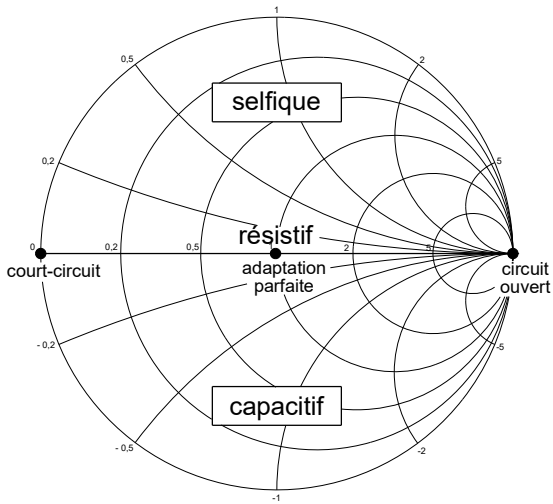
8

« L'abaque de Smith » mais c'est très simple ...



9

« L'abaque de Smith » mais c'est très simple ...



10

L'abaque de Smith est un outil merveilleux,
avec un compas, une latte et un crayon, on peut

- représenter une impédance
- calculer des circuits
- étudier des lignes de transmissions
- ... *and much more* ...
- **mais aujourd'hui on va se focaliser sur la représentation d'une impédance sur l'abaque de Smith**

à lire et relire sans modération : l'article de Jean-François ON4IJ
<https://on5vl.org/abaque-de-smith-outil-mysterieux-outil-demystifie-2/>

11

Les VNA dans l'histoire

1950 : Rohde & Schwarz fabrique le « *Z-g diagraph* » de 30 à 300 MHz

1966 : Hewlett Packard 8405A ... puis 8410A ... puis 8720 ... puis 8753A

et puis aussi Agilent et puis Rohde & Schwarz ...

19?? : Tom BAIER DG8SAQ développe le VNWA,
commercialisé par SDR-kits.

Il faut un ordinateur et Windows.

2012 : Tomohiro TAKAHASHI de Hokaiko
(radioamateur ?) publie un kit sous le nom
de "edy555" , « open-source » et basé sur
le travail de DG8SAQ.

Il en découle une série de « nanoVNA » ...



12

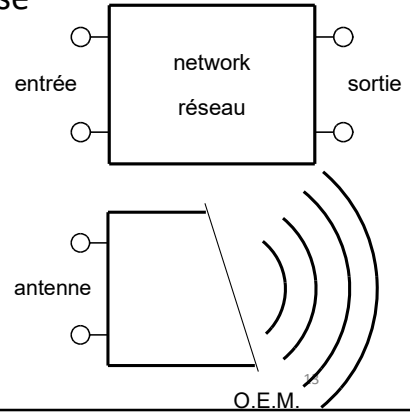
Une définition du VNA

V Vector

- scalaire : on définit uniquement sa grandeur
exple : la masse , le temps , la température , ...
- vecteur : on définit une direction, une grandeur et un sens
pour le VNA : une tension et une phase

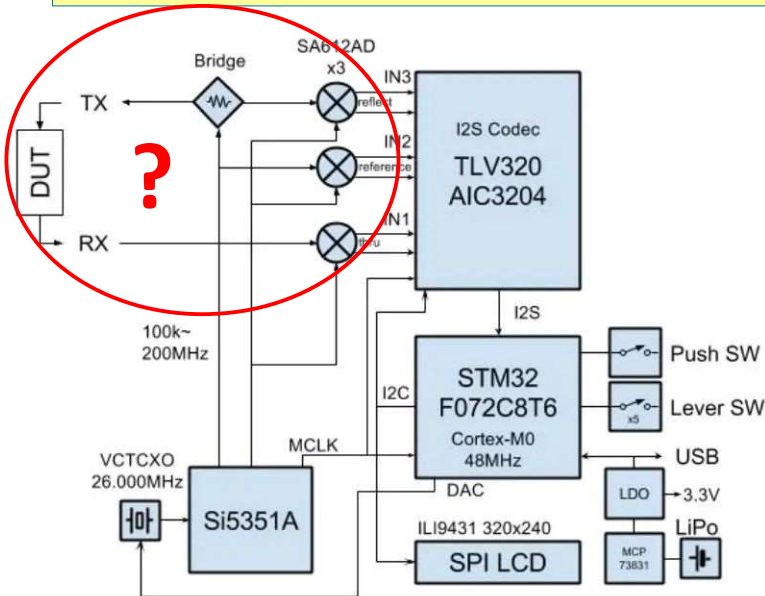
N Network : un réseau, mais plus particulièrement un quadripôle.

Une antenne est un quadripôle un peu spécial.



A Analyzer ... un appareil de mesure

nanoVNA ... qu'est ce qu'il y a à l'intérieur ?



SA612AD : mélangeur double équilibré avec oscillateur intégré

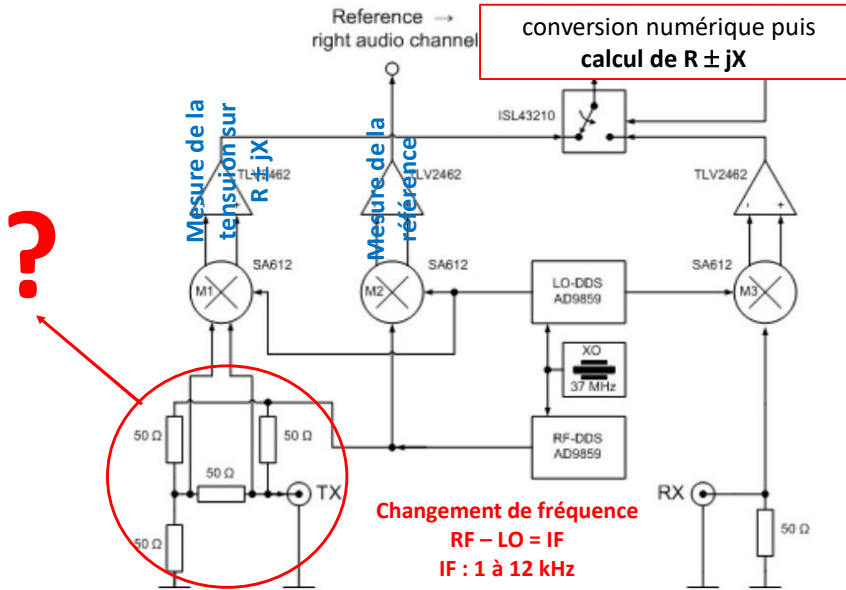
TLV320 : convertisseur A/D triple, à l'origine pour le domaine audio

STM32 : un microcontrôleur

Si5351A : générateur de signaux d'horloge

Source : <https://github.com/trfrtech/NanoVNA>

VNA ... qu'est ce qu'il y a à l'intérieur ?



Source : DG8SAQ http://sdr-kits.net/documents/VNWA_HELP.pdf page 6

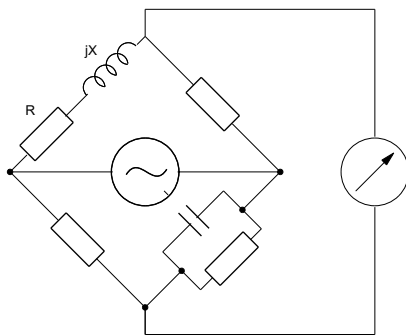
15

nanoVNA ... qu'est ce qu'il y a à l'intérieur ?

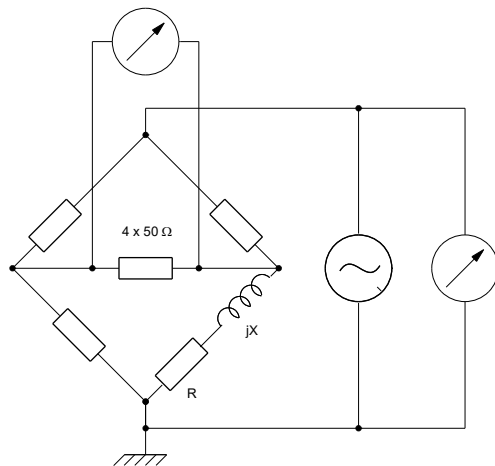
Impedance Bridge 1650
de General Radio anno 1960 ?
(« le fleuron de labo qui se respecte »)



Pont de Wheatstone (1833)
+ ... tous les autres ponts



A l'équilibre, les produits en croix des résistances (impédances) sont égaux.



Mesure des tensions
Mesures des phases

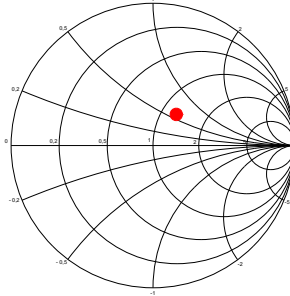
→ échantillonnage et convertisseur A/N

16

Le VNA ... mais c'est très simple !

Et si on connaît $R \pm jX$, alors on connaît l'impédance .. $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$

on peut représenter un point sur l'abaque de Smith



et on connaît aussi le ROS

$$ROS = \frac{Z_{ant}}{50} \text{ ou } \frac{50}{Z_{ant}}$$

et on connaît aussi **S11** ou le **Return Loss** ...

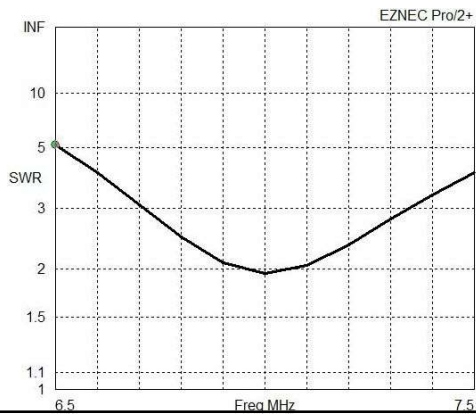
$$RL = 20 \log \left(\frac{ROS - 1}{ROS + 1} \right) \text{ en dB}$$

17

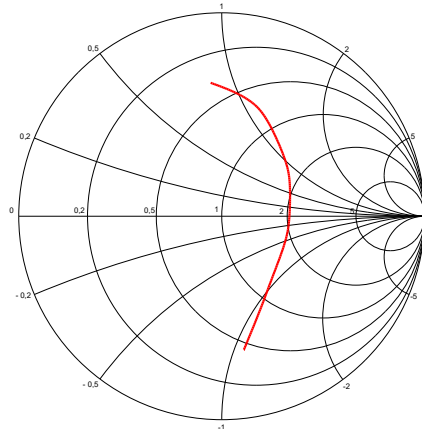
Le VNA ... mais c'est très simple !

et si on fait un balayage en fréquence ... oh merveille

la courbe du ROS en fonction de la fréquence



et la même chose sur l'abaque de Smith



18

Deux questions qui empêchent le radioamateur de dormir ...
 Est-ce que mon antenne est bien adaptée à 50 Ω ? et Est-ce que mon filtre pour 14 MHz est bien réglé ?

Le VNA peut donner *une* réponse ...



AURSINC
 nanoVNA-H
 écran 2,8 pouces
 320 x 240 pixels



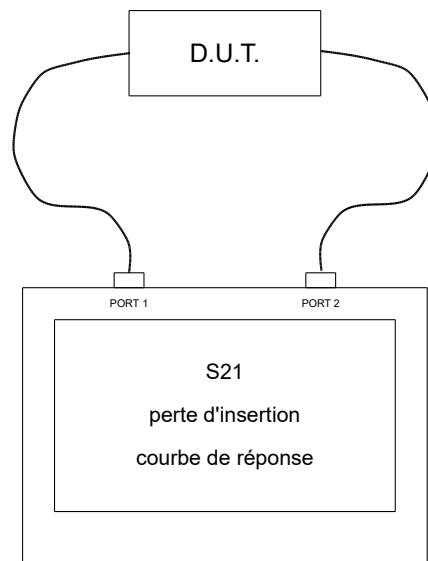
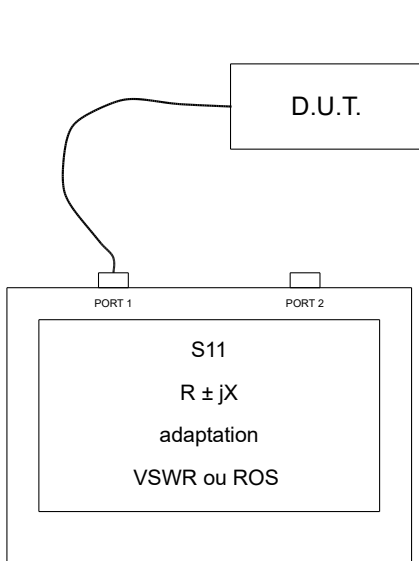
SAA-2N
 écran 4 pouces
 480 x 320 pixels



SV4401A
 écran 7 pouces
 1024 x 600 pixels

+ logiciel

Qu'est-ce qu'on peut mesurer avec un VNA ?



VNA : appareil de mesure, vu de plus près

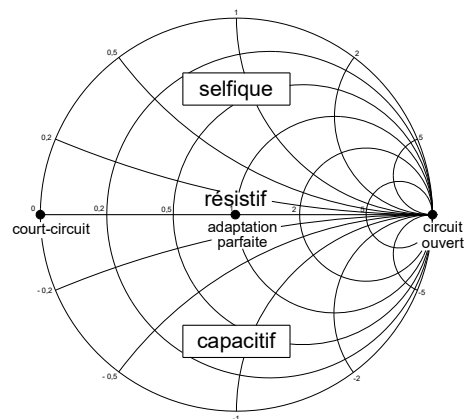
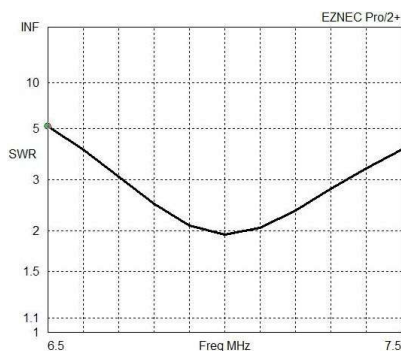
- Deux ports :
 - CH0 : pour la mesure du « réfléchi »
 - CH1 : pour la mesure de la puissance transmise
- Plusieurs traces
- Suivant le modèle
 - Display de 2,8 à 7 pouces (74 mm à 180 mm)
 - Nombre de points du balayage
 - AURSINC nanoVNA-H4 : 101 pts
 - SYSJOINT SV4401A : 1001 pts
 - Plage dynamique :
 - AURSINC nanoVNA-H4 : S11 : dB S21 : dB
 - SYSJOINT SV4401A : S11 : 50 dB S21 : 75 dB

21

Allons-y ... pour mesurer une **antenne** (1/7)

Commençons simplement par la mesure d'une antenne avec deux traces

- une mesure du réfléchi
- et l'abaque de Smith



22

... pour mesurer une antenne (2/7)

- D'abord choisir une plage de fréquences :
STIMULUS > START + STOP ou **CENTER + SPAN**
- Puis calibrer : **CALIBRATE > CALIBRATE**
 - d'abord avec **OPEN** c-à-d avec $\infty \Omega$
 - puis **SHORT** ... avec 0Ω
 - puis **LOAD** ... avec 50Ω
 - puis **ISOLN** ... avec câble ouvert et sur l'entrée CH0
 - puis **THRU** ... avec câble entre CH0 et CH1

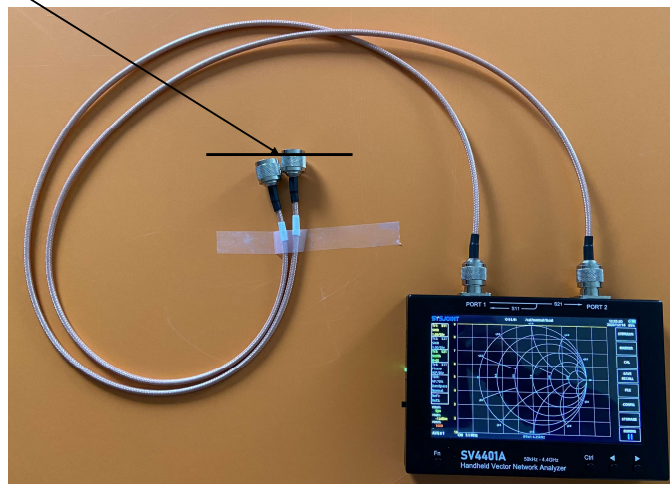


... pour mesurer une antenne (3/7)

- IMPORTANT : Le plan de référence



On calibrera TOUJOURS au niveau du plan de référence ...



... pour mesurer une **antenne** (4/7)

- Terminer par **DONE** et sauver **SAVEx**
- On peut récupérer une calibration antérieure
- Nécessité de **calibrer à chaque fois !**
- La calibration permet de tenir compte des câbles de connexions.
- La plage de fréq. + la calibration influencent la précision de la mesure.

25

... pour mesurer une **antenne** (5/7)

- Puis DISPLAY pour définir les unités
- **DISPLAY > TRACE** pour activer la trace ou non
- **DISPLAY > FORMAT** choisir entre LOGMAG (=dB) ou PHASE ou DELAY ou SMITH ou SWR ou RESISTANCE ou REACTANCE ou |Z|
 - $S_{11} \approx$ Return Loss ou RL : $P_{\text{incidente}} / P_{\text{réfléchiée}}$ exprimé en dB
 - ROS = SWR = VSWR = « TOS » : $U_{\text{max}} / U_{\text{min}}$ le long de la ligne
 - $Z = R \pm jX$

26

... pour mesurer une **antenne** (6/7)

Manipulation ...

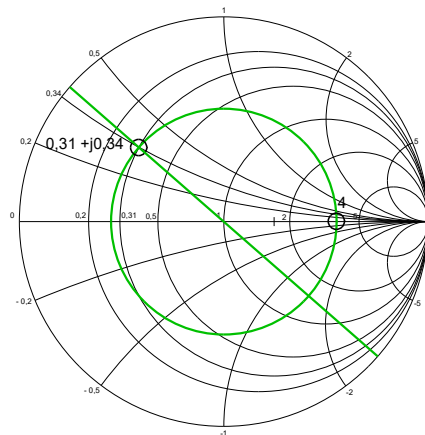
27

... pour mesurer une **antenne** (7/7)

Rappel : La résonance de l'antenne ...

- ce n'est pas lorsque le SWR est le plus bas ...
- mais c'est lorsque la partie réactive X est nulle : $Z = R \pm jX$
donc lorsque $Z = R + j0$

Le ROS (SWR) peut être lu sur l'abaque de Smith. Il suffit de tracer le cercle de SWR (en vert), la valeur du SWR se lit sur la partie droite de l'axe des R.



28

Mesures sur un circuit R L ou R C (1/3)

Soit une impédance $R + jX$ soit 30Ω et $1 \mu\text{H}$

à $7,1 \text{ MHz}$ on a $Z = 31,2 + j 42,5 \approx 52 \Omega$

Soit notre impédance $R + jX$ soit 30Ω et $1 \mu\text{H}$, et ...

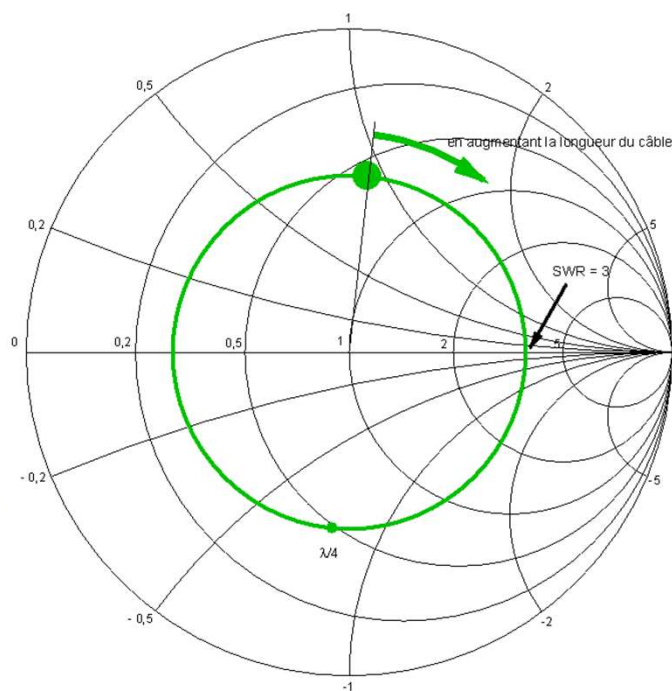
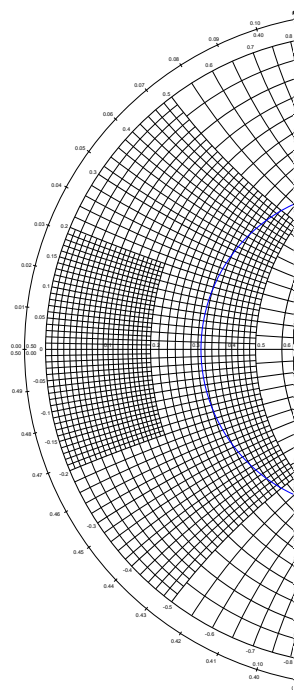
- avec une connexion aussi courte que possible ... $Z = 31,2 + j 42,5$ et $\text{SWR} = 3,082$
- avec une connexion de $0,28 \text{ m}$ soit $\approx \lambda/100$... $Z = 32,5 + j 47,3$ et $\text{SWR} = 3,062$
- avec un câble de $0,67 \text{ m}$... $Z = 42,4 + j 53,8$ et $\text{SWR} = 3,066$
- avec un câble de $3,20 \text{ m}$... $Z = 151 - j 16,8$ et $\text{SWR} = 3,077$
- avec un câble de $6,97 \text{ m}$ soit $\approx \lambda/4$... $Z = 25,8 - j 35,1$ et $\text{SWR} = 3,088$
- avec un câble de $13,94 \text{ m}$ soit $\approx \lambda/2$... $Z = 34,6 + j 43,5$ et $\text{SWR} = 2,886$

$$\lambda = 300/7,1 = 42,25 \text{ m}$$

soit un coeff. de vélocité de $0,66 \rightarrow 42,25 \cdot 0,66 = 27,88 \text{ m}$

29

Mesures sur un circuit R L ou R C (2/3)



30

Mesures sur un circuit R L ou R C (3/3)

Soit une impédance $R + jX$ soit 30Ω et $1 \mu\text{H}$

à $7,1 \text{ MHz}$ on a $Z = 31,2 + j 42,5$

et on pourrait refaire la même chose avec $R - jX$ soit 30Ω et 470 pF

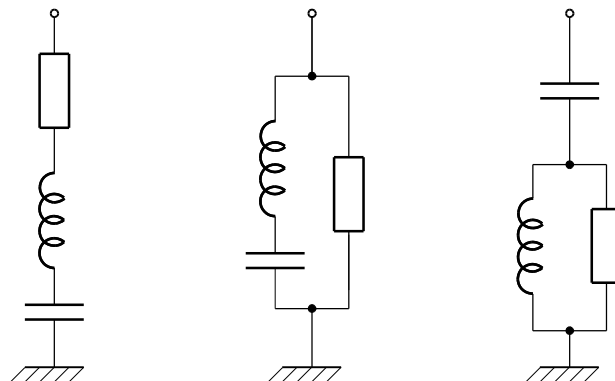
à $7,1 \text{ MHz}$ on a $Z = 28,8 - j 45$

Moralité : on ne nous a pas menti au cours théorique !

31

Mesures sur des cellules RLC plus complexes

Comportement de quelques cellules plus complexes



Manipulations ...

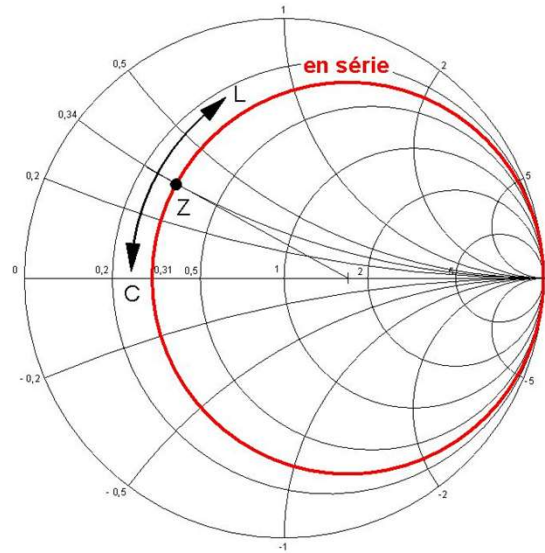
32

Un coupleur d'antenne L C (1/5)

Que se passe-t-il si on met une self L ou une capa C en série ?

Souvenons-nous comment ça se passait dans le plan des impédances ?

Puisque la résistance ne change pas, on se déplace sur un cercle de résistance constante !



à lire et à relire sans modération : l'article de Jean-François ON4IJ
<https://on5vl.org/abaque-de-smith-outil-mysterieux-outil-demystifie-2/>

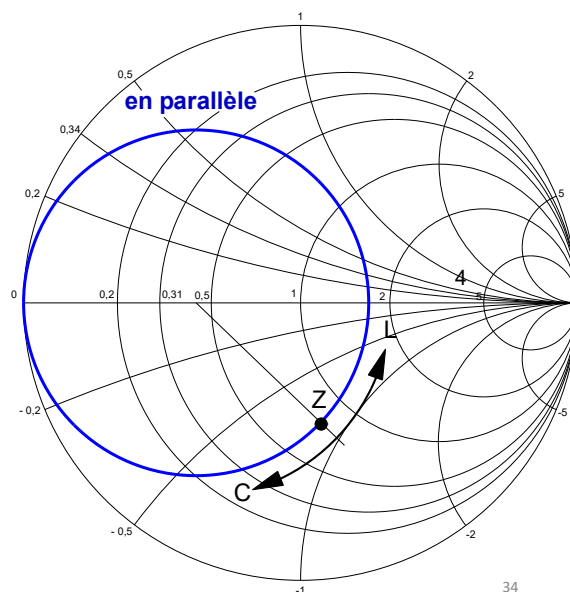
33

Un coupleur d'antenne L C (2/5)

Que se passe-t-il si on met une self L ou une capa C en parallèle ?

En parallèle → raisonner en terme de conductance et d'admittance

Puisque la conductance ne change pas, on se déplace sur un cercle de conductance constante !



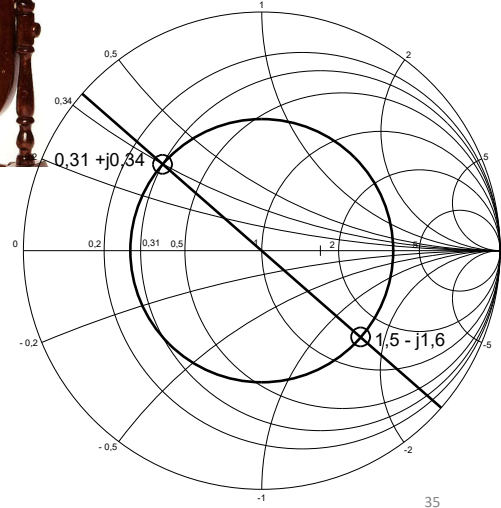
34

Un coupleur d'antenne L C (3/5)

Impédance ? admittance ?

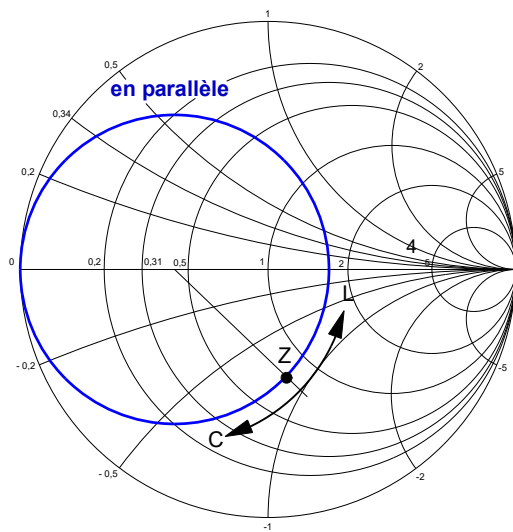
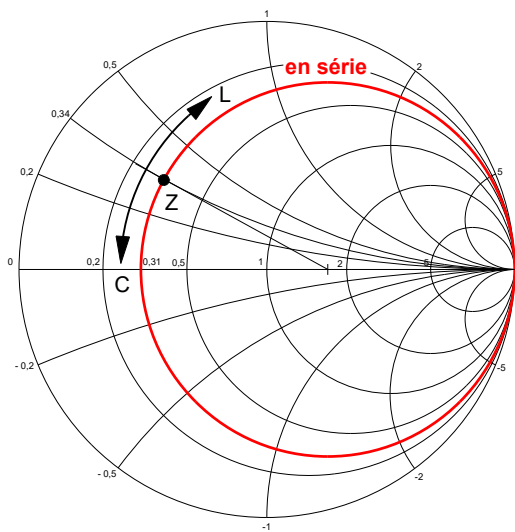
Une autre vision des choses !

Grandeur	Unité	Sym.	
R Résistance	Ohms	Ω	k Ω et M Ω
C Capacité	Farad	F	μ F et pF
L Self inductance	Henry	H	mH et μ H
Z Impédance	Ohms	Ω	
R Résistance	Ohms	Ω	$Z = R \pm jX$
X Réactance	Ohms	Ω	
Y Admittance	Siemens	S	
G Conductance	Siemens	S	$Y = G \pm jB$
B Susceptance	Siemens	S	



35

Un coupleur d'antenne L C (4/5)



Moyen mnémotechnique : 1. série = serrer à droite (comme en voiture)
 2. avec une aile (L) tu t'envoles, tu vas vers le haut !

36

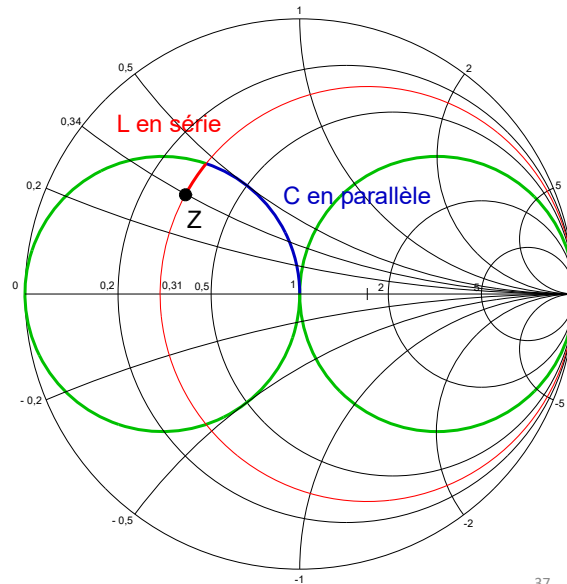
Un coupleur d'antenne L C (5/5)

Comment réaliser un circuit d'adaptation en L ?

1° Ajouter L ou C, en série ou en parallèle, pour aboutir sur un cercle de résistance ou de conductance unitaire (en vert).

2° Ajouter L ou C, en série ou en parallèle, pour aboutir au centre du diagramme.

→ plusieurs solutions ...



37

Pour mesurer l'atténuation d'un câble

Pour mesurer les **pertes** du câble :

- Généralement sur UNE seule fréquence : **STIMULUS > CW FREQ**
- On mesure le RL du câble ouvert **RL_{short}** puis du câble court-circuité **RL_{open}**
- Puis la formule : perte du câble = $(RL_{short} + RL_{open}) / 4$

Manipulation ...

38

Pour mesurer l'atténuation d'un câble (variante)

Pour mesurer la **longueur** d'un câble :

- On ne garde qu'une seule **TRACE**
- Puis **FORMAT > LINEAR** ou **REAL**
- Puis **TRASFOM > LOWER PASS IMPULSE**
- Donner le coeff. de vélocité →
- **STIMULUS > START** sur 50 kHz **STOP** sur 200 MHz
- En circuit ouvert : le VNA donne la longueur maximum mesurable
- En connectant le câble, le VNA donne la longueur du câble
- Et si le câble est défectueux : donne l'endroit du défaut !

PE : 0,66
PE aéré, mousse : 0,8 à 0,83
air : 0,98

39

Pour mesurer un quart d'onde (1/5)

Pour mesurer un quart d'onde :

Rappels sur la ligne quart d'onde :

- en court-circuit, c'est une impédance infinie, ouvert c'est un court-circuit ...
- 1 tour sur l'abaque de Smith = $\lambda / 2$

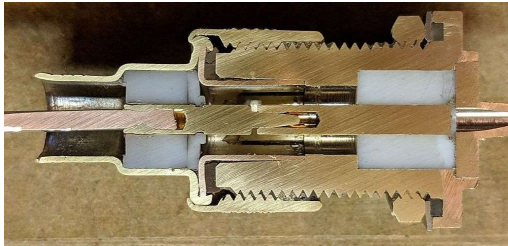
- Ici ce sera l'abaque de Smith qui va donner la solution
- Couper le câble à ce qu'on croit être un quart d'onde
- **STIMULUS > START** sur 50 kHz **STOP** sur 3000 MHz
- Mettre le marqueur sur la fréquence la plus basse, il est aussi à droite sur circuit ouvert
- Connecter le câble et aller de l'autre côté à gauche, notez la fréquence : c'est la fréquence exacte où cette ligne est un quart d'onde

40

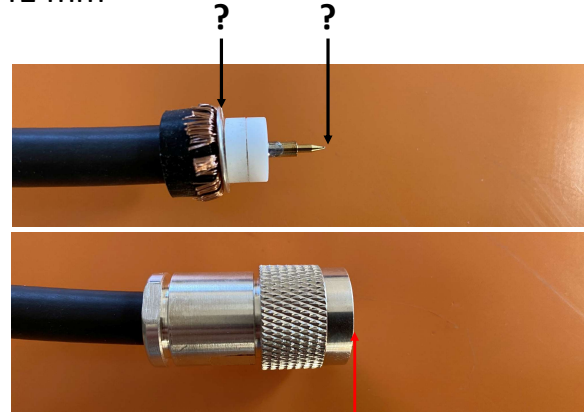
Pour mesurer un quart d'onde (2/5)

Exemple pratique: RG213 (ou 214) , coefficient de vélocité = 0,66
 Construire un quart d'onde pour 145 MHz ?
 Théoriquement : $\lambda/4$ mécanique = 341 mm

Mais où prend-on « la » référence ?



Source : Wikipédia



ma référence , à moi !

41

Pour mesurer un quart d'onde (3/5)

Résultats : avec un connecteur N d'un côté , libre (ouvert) de l'autre côté

350 mm : 157,190 MHz

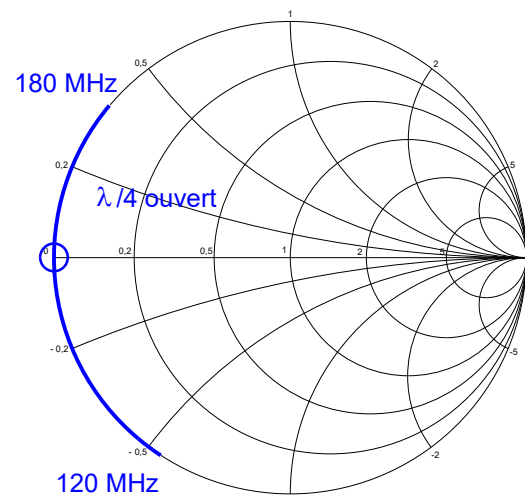
370 mm : 146,420 MHz

390 mm : 139,059 MHz

En première approximation

20 mm \equiv 7,3 MHz \rightarrow 1 MHz \equiv 2,7 mm

Manipulation ...



42

Pour mesurer un quart d'onde (4/5)

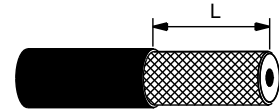
Mais on devra aussi monter un connecteur N de l'autre côté ...

Nouveaux résultats avec les 2 connecteurs N :

350 mm « brut » ... MHz

370 mm « brut » ... MHz

390 mm « brut » ... MHz



Nécessité de travailler avec **GRANDE précision mécanique**,

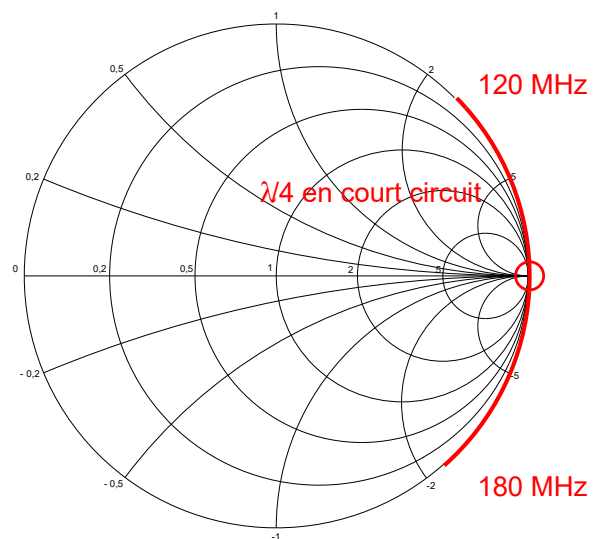
- utiliser le même câble qui provient du même rouleau ,
- utiliser les connecteurs du même fabricant.

43

Pour mesurer un quart d'onde (5/5)

Cas du quart d'onde en court-circuit.

363 mm : 148,820 MHz



44

NanoVNASaver

nanoVNASaver permet d'utiliser le nanoVNA à partir du PC

<https://github.com/mihtjel/nanovna-saver>

Commencer par **Rescan** pour connaître le Port puis **Connect to Device**

45

Utiles

Si la courbe est « cassée » (en zig-zag), vérifier le calibrage.

Pour garder une trace : **Fn** puis **CTRL**

Les flèches > et < permettent de déplacer le curseur du marqueur.

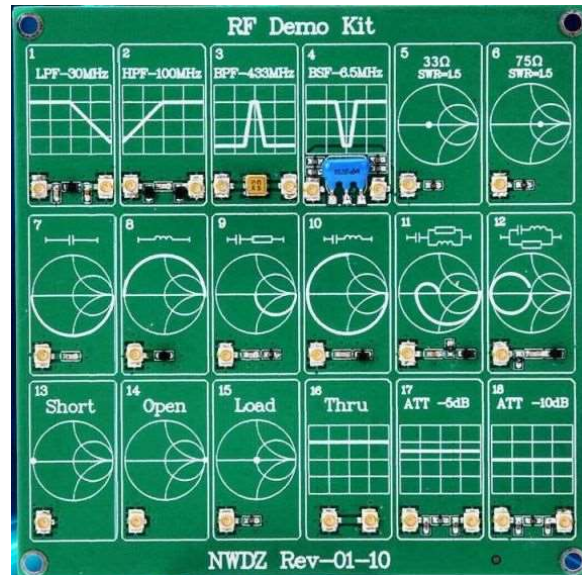
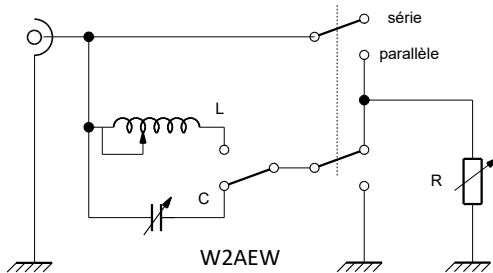
On peut modifier les paramètres du VNA en le connectant à un ordinateur et grâce à PuTTY. Paramètres de PuTTY : mode série , donner le COMx et la vitesse 115200 bd. Utiliser la commande **help**. Puis ...

Comment récupérer une vraie copie de l'écran sur un PC ?

46

Vector Network Analyzer : Démonstrations

Un petit circuit pour tourner en rond sur le diagramme de Smith ...



Références

Plusieurs EXCELLENTEs vidéos de Alan Wolke W2AEW :

- #274: Smith Chart Basics: Impedance and Admittance curves and conversion
<https://www.youtube.com/watch?v=gw1TYWwfvGk>
- #275: Smith Chart: Z, VSWR, Reflection Coef and Transmission Line Effects
<https://www.youtube.com/watch?v=ImNRca5ecF0>
- #276: Smith Chart: Design an L-Network - Impedance Matching Circuit
<https://www.youtube.com/watch?v=lgeRHDI-ukc>
- #297: Basics of the Smith Chart - Intro, impedance, VSWR, transmission lines, matching
https://www.youtube.com/watch?v=TsXd6GktlYQ&list=PLtzM_WvyZ2Djx5XQvGpvmBbkmE7rYymcg&index=1
- #312: Back to Basics: What is a VNA / Vector Network Analyzer
<https://www.youtube.com/watch?v=Sb3q8f0NBZc>
- #314: How to use the NanoVNA to sweep / measure an antenna system's SWR and optimize its tuning
<https://www.youtube.com/watch?v=xa6dq9udcg>
- #315: How to use the NanoVNA to measure a low-pass filter
- #316: Use NanoVNA to measure coax length - Transmission Lines and Smith Charts, SWR and more
<https://www.youtube.com/watch?v=9thbTC8-JtA>
- #318: NanoVNA comparison measuring a duplexer - NanoVNA-H4 and SAA-2N
- #325: Use NanoVNA and Smith Chart to show effect of adding transmission line length
<https://www.youtube.com/watch?v=gw1TYWwfvGk>
- #337: Use a NanoVNA to measure input impedance and gain of a small-signal RF amplifier

à voir et à revoir sans modération !!!

48

Références

Toutes les vidéos de W2AEW sont très intéressantes, notamment :
Smith Chart Basics: Impedance and Admittance curves and conversion (circuits RLC série et parallèle) :
<https://www.youtube.com/watch?v=gw1TYWwfvGk>

SWR and line length <https://www.youtube.com/watch?v=r6UHITd3AWU>

What is a VNA ? <https://www.youtube.com/watch?v=Sb3q8f0NBZc>

How to use the NanoVNA to sweep / measure an antenna system's SWR and optimize its tuning :
<https://www.youtube.com/watch?v=xa6dqx9udcg>

Rhode et Schwarz : Understanding the Smith chart
<https://www.youtube.com/watch?v=rUDMo7hwihs>

49

Références

Mise en garde concernant certaines vidéo sur Internet

- La démonstration style « T***** »
- Plage de mesure excessive
- Réalité

50

Références

F4HTZ : Le NanoVNA : c'est quoi et comment ça marche ? <https://www.youtube.com/watch?v=7eTsPLKuy0w>

VE6WGM : nanoVNA - Measuring Antenna & Coax Characteristics
https://www.youtube.com/watch?v=MBGyGRb_7Tg

Un ancêtre : le pont de mesure d'impédance :
https://www.ietlabs.com/pdf/GR_Appnote/STX-107%20Universal%20Bridge.pdf

Github edy555 : <https://github.com/ttrftech/NanoVNA>

Article de DG8SAQ : http://sdr-kits.net/documents/VNWA_HELP.pdf

Article de Jean-François ON4IJ : <https://on5vl.org/abaque-de-smith-outil-mysterieux-outil-demystifie-2/>
et <https://on5vl.org/abaque-de-smith-2/>

Article de Yvan ON4CY : <https://on5vl.org/comprendre-le-vna/>

51

Merci pour votre attention !



ON7PC – 16 décembre 2023

52