

Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

Bienvenue sur le cours de F6KGL

La séance de ce soir porte sur

Technique Chapitre 10

Lignes de transmission et adaptations

Ce document a servi pour le cours enregistré le **26/05/2023**.

Ce document (*PDF*), le fichier audio (*MP3*) et les liens des vidéos (*YouTube*)
sont disponibles sur la page <https://f6kgl-f5kff.fr/lespodcasts/>

Les documents de notre site Internet sont mis à disposition selon les termes de la
Licence <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



10-1) lignes de transmissions (feeders)

- La ligne de transmission est utilisée pour transférer l'énergie

- de l'émetteur vers l'antenne
- ou de l'antenne vers le récepteur.

- La ligne de transmission peut être

- asymétrique (câble coaxial)

- symétrique (ligne bifilaire)

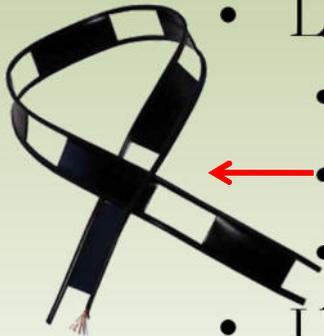
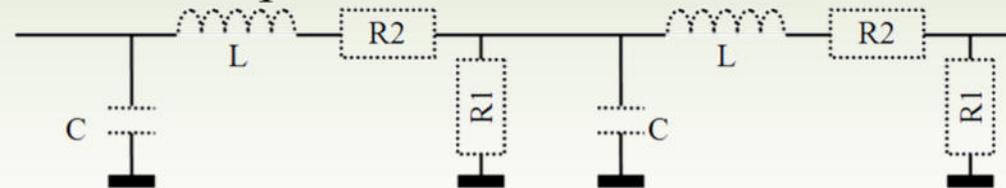
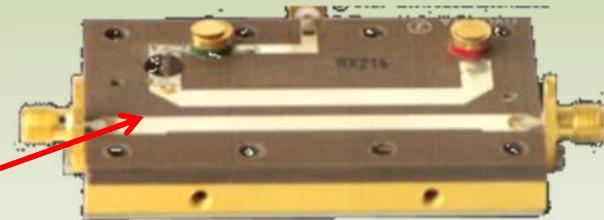
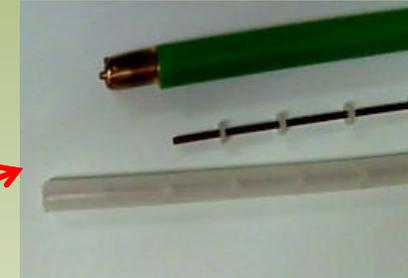
- microstrip (gravée sur un circuit imprimé)

- Une ligne de transmission est équivalente à un circuit constitué

- d'une bobine,
- d'un condensateur

- le rapport $\sqrt{L/C}$ fournit l'impédance caractéristique (en Ω), voir plus loin, § 10-2

- et de deux résistances (une en série, l'autre en parallèle)

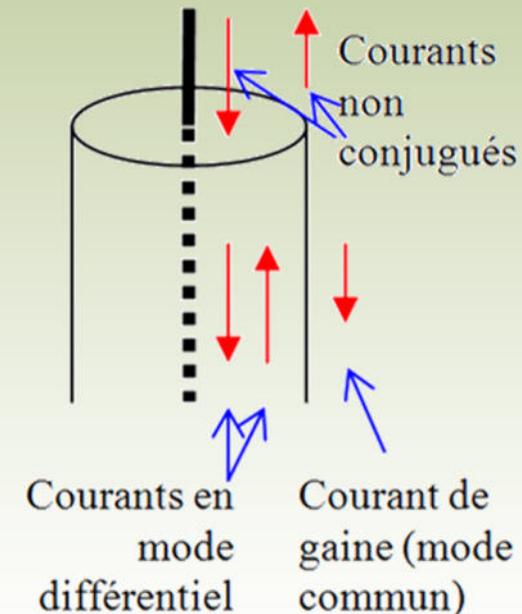


10-1) lignes de transmissions (feeders)

- La valeur des résistances détermine la **qualité** de la ligne
 - en série (*la plus faible possible*) : liée à l'effet de peau qui augmente avec la fréquence
 - en parallèle (*la plus forte possible*) : fuites d'isolement et conductance linéique due aux défauts du diélectrique utilisé lorsque la fréquence transférée est supérieure à 1 GHz
- La qualité de la ligne se définit par sa **perte (en dB/m)**.
 - la perte est donnée par le constructeur (*souvent en dB / 100 m*)
 - la perte augmente avec la fréquence du signal transféré et est moindre dans une ligne bifilaire que dans un câble coaxial.
 - la perte en fonction de la longueur de la ligne, appelée aussi **affaiblissement linéique**, se calcule avec les décibels
 - cette perte n'a aucun rapport avec l'impédance de la ligne.
 - voir exemple d'application au § 4-1 (*chapitre 4 – 1ère partie*)

10-1) lignes de transmissions (feeders)

- Si les courants dans les deux fils (ou âme et tresse) sont **conjugués** (égaux et de valeurs contraires),
 - la ligne de transmission fonctionne en **mode différentiel**
 - et **la ligne ne rayonne pas**.
- Lorsque les courants ne sont plus conjugués, signe d'une désadaptation,
 - la ligne fonctionne en **mode commun**
 - la ligne rayonne comme une antenne long fil à cause du **courant de gaine**.
 - *insérer un « choke balun » pour limiter (étouffer) le courant de gaine, voir §10-4*



10-2) impédance et coefficient de vélocité

- Si un signal est appliqué à l'entrée de la ligne, un signal de même impédance se retrouvera à la sortie (*en négligeant les pertes*) si et seulement si la ligne est bouclée sur une résistance (*ou une charge non réactive*) égale à l'**impédance caractéristique de la ligne** calculée selon la formule :

$$Z_{\text{ligne}}(\Omega) = \sqrt{Z_L \cdot Z_C} = \sqrt{(\omega L / \omega C)} = \sqrt{[L(\text{H/m}) / C(\text{F/m})]}$$

(*formule issue des lois de Maxwell*)



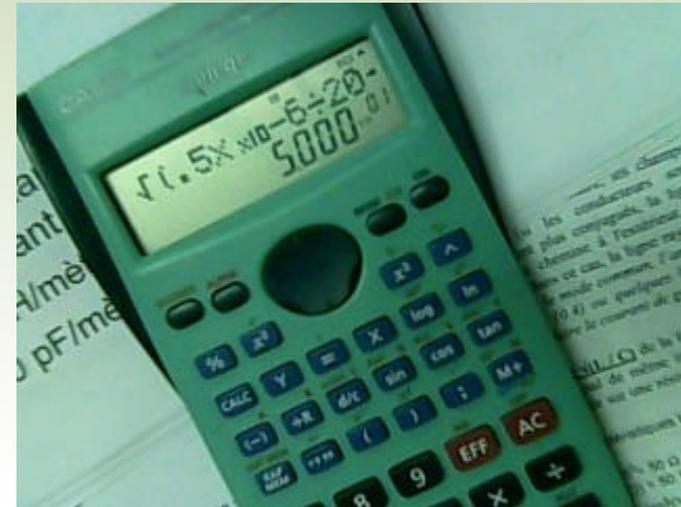
James Maxwell
1831 - 1879
Travaux sur
l'électromagnétisme
(1861)

Exemple :

Quelle est l'impédance du câble suivant :

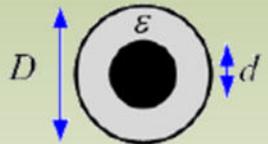
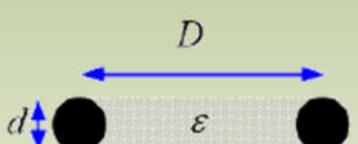
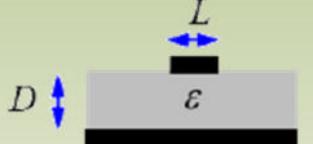
- $L = 0,5 \mu\text{H/mètre}$
- $C = 200 \text{ pF/mètre}$

Réponse : $Z = \sqrt{(0,5 \cdot 10^{-6} / 200 \cdot 10^{-12})} = \sqrt{(2500)} = 50 \Omega$



10-2) impédance et coefficient de vélocité

- Autre manière de calculer l'impédance d'une ligne :
 - à partir des **dimensions des conducteurs** (D et d ou L)
 - et du **diélectrique employé** (ϵ) puisque $Z_{\text{ligne}} = \sqrt{L / C}$

ϵ = coeff. diélectrique utilisé = 1,1 à 1,2: air avec écarteurs = 2,3 pour le PE = 2,1 pour le téflon = 4,5 pour la fibre de verre Impédance (valeur approchée) Vélocité ($v = 1 / \sqrt{\epsilon}$)	Coaxial rond	Ligne bifilaire	Strip line (circuit imprimé)
			
	$Z(\Omega) = (138 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(D/d)$ 66% (PE) à 80% (semi-aéré)	$Z(\Omega) = (276 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(2D/d)$ 95% (écarteurs espacés)	$Z(\Omega) = (138 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(4D/L)$ 50% (bakélite, fibre de verre)

- Dans un fil ou dans un câble, la **vitesse de propagation** des ondes est plus faible que dans l'air ou dans le vide.
- La **vélocité** est la vitesse du courant dans le câble (en % de la vitesse dans l'air ou le vide) et dépend uniquement du diélectrique utilisé (ϵ). Nous allons voir ensuite que $c = 1 / \sqrt{L \times C}$. Aussi, on a :

$$v(\%) = 1 / \sqrt{\epsilon}$$



10-2) impédance et coefficient de vélocité

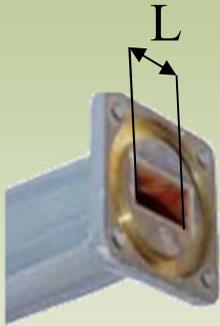
- *les principaux diélectriques utilisés et leur vélocité :*

- *1,0 pour l'air sec ou le vide* *100%*
- *1,1 à 1,2 pour l'air avec écarteurs* *95% à 91%*
- *1,5 pour le PE expansé semi-aéré* *80%*
- *2,1 pour le téflon* *69%*
- *2,3 pour le PE* *66%*
- *3,7 pour la bakélite* *52%*
- *4,5 pour la fibre de verre* *47%*



10-2) impédance et coefficient de vélocité

- Un **guide d'onde** n'est pas une ligne de transmission : les ondes sont transférées par réflexion sur les parois conductrices d'un tube entre deux transitions (sortes d'antennes qui font l'adaptation câble-guide).



- le guide d'onde a des pertes moindres qu'un câble coaxial mais ne peut transférer que des fréquences dont la demi-longueur d'onde est inférieure à sa plus grande dimension.
- **exemple** : largeur maxi tube (L) = 5 cm $\Rightarrow \lambda < 10 \text{ cm} \Rightarrow F > 3 \text{ GHz}$

- La **fibres optique** est un cas particulier de guide d'onde permettant de transférer de la **lumière** à l'intérieur d'un fil de verre ou de plastique translucide.





10-2) impédance et coefficient de vélocité

- Pourquoi une impédance de 50 ohms pour le câble coaxial d'émission ?

Lors d'une discussion technique au cours d'un QSO hebdomadaire du CERIA (radio club de Saint Nazaire), le sujet de la détermination de la valeur de 50 ohms a été abordé. J'ai voulu approfondir cette question. Voici le résultat d'une recherche effectuée sur Internet. Comme on le verra, il n'y a pas d'explication bien probante. Je livre le résumé de cette recherche à la sagacité des lecteurs de Radio REF. Peut être que l'un d'entre nous a l'explication « irréfutable » de ce choix. Merci dans ce cas de m'en faire part afin de mettre à jour cette analyse.

1) INTRODUCTION

Cette note a pour but d'essayer de connaître l'origine du choix d'une impédance de 50 ohms pour les coaxiaux utilisés couramment dans les transmissions des « radiofréquences ».

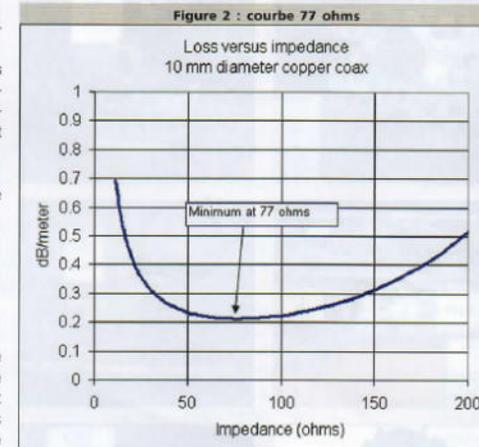
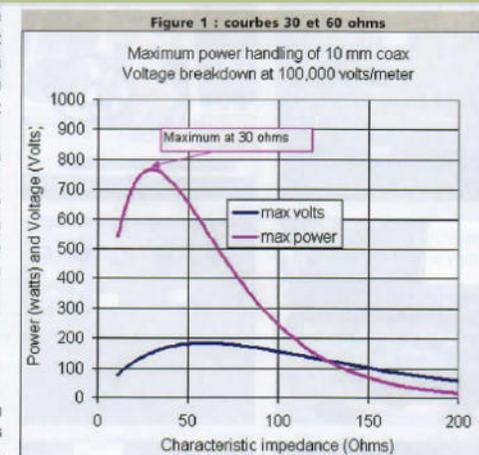
Ce n'est pas le résultat de mesures ou de calculs, mais l'analyse de la littérature américaine accessible via le net. Les différents articles avancent des hypothèses mais sans aucune certitude. Un auteur indique d'ailleurs que les explications « historic » peuvent avoir été déformées selon le parcours et les expériences de ceux qui les donnent, et qui vont ainsi refaire l'histoire.

J'ai donc essayé de mon point de vue de trier le bon grain de l'ivraie.

2) HYPOTHESES REALISTES

2-1) VERSION BELL LABORATORIES.

En 1929, des essais ont eu lieu chez Bell Laboratories afin de déterminer le meilleur câble coaxial pour la transmission de signaux radiofréquences de puissance élevée. Ces essais ont porté sur des coaxiaux de 10 mm « environ » (en fait sans doute l'unité anglaise la plus proche), avec de l'air comme diélectrique.



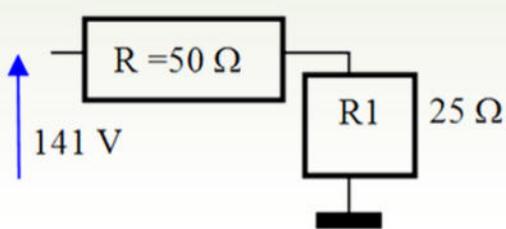
voir Radio-REF (10/2010) :

<http://f6kgl.f5kff.free.fr/Articles/RR%202010-10%20Cable.pdf>

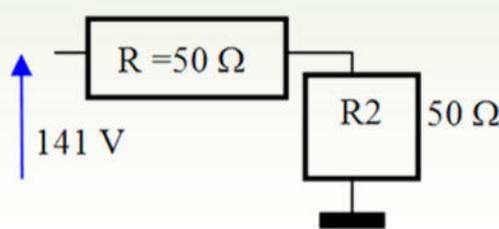
10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



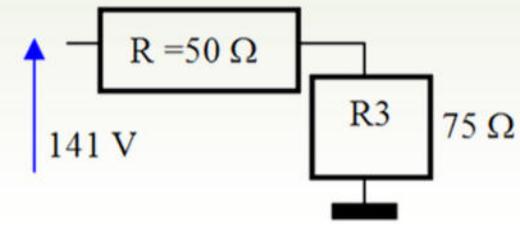
- Le **transfert de puissance** entre un générateur de courant alternatif et une charge est maximal lorsque l'impédance du générateur est
 - égale à celle de la charge
 - de signe contraire, si il y a une réactance.
 - les **impédances** sont alors **conjuguées**.
- Dans les exemples ci-dessous, on cherche laquelle des 3 résistances (R1, R2 ou R3) dissipe le plus de puissance ?



89 W



100 W



96 W

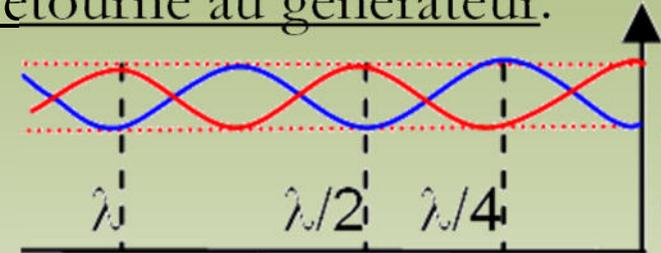
Calcul du 1^{er} exemple : $P_{R1} = R1 \cdot I_{R1}^2 = R1 \cdot [U / (R + R1)]^2 = 25 \times [141 / (50 + 25)]^2 = 25 \times (1,88)^2 = 89$



10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Lors de la **désadaptation des impédances**, une partie de la puissance émise (la puissance réfléchie) retourne au générateur.
 - deux courants en sens inverse se superposent dans la ligne et, à certains endroits, les tensions et les intensités s'additionnent (**ventres**) ou se soustraient (**nœuds**).
 - *si $Z_{charge} < Z_{câble}$, il y aura un nœud de tension au niveau de la charge*
 - *la tension (en bleu) et l'intensité (en rouge) sont déphasées de 180°*
 - les endroits où se situent ces maxima et ces minima sont fixes (d'où le nom d'**ondes stationnaires**) par rapport à la charge et dépendent de la fréquence.
 - ils sont distants les uns des autres d'un quart d'onde. Le phénomène se répète donc toutes les demi-ondes.
 - *attention à la vitesse du câble dans le calcul des distances et des longueurs*
 - le rapport des tensions/intensités réfléchies est toujours égal à l'impédance caractéristique de la ligne.



10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



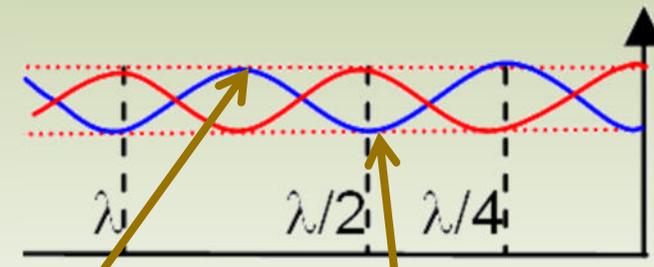
- Figures animées pour la physique

- http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/

- Ondes / Ondes stationnaires / superposition (1)



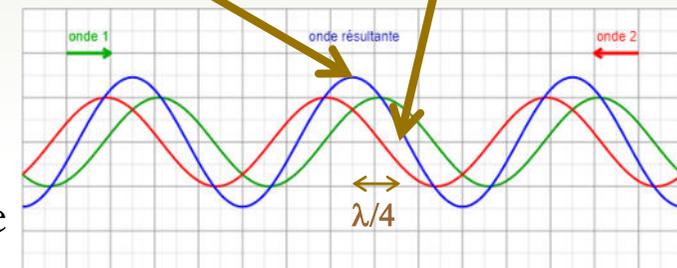
- ce qui est représenté dans le schéma, ce sont les valeurs efficaces (tension ou intensité) de la superposition des courants incidents et réfléchis



Maximum (ventre)

Minimum (nœud)

- représentation de l'onde résultante lorsque l'onde 1 (émise) a la même valeur que l'onde 2 (réfléchie), ce qui ne peut exister puisque que la majeure partie de l'onde émise est rayonnée



10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Le **TOS** et le **ROS** sont deux mesures de la désadaptation et sont liées par la loi d'Ohm :
 - par le coefficient de réflexion, nommé ρ (*rhô*) et égal au rapport du courant réfléchi divisé par le courant émis (en V ou en A).

$$\rho = U_R / U_E = (U_{maxi} - U_{mini}) / (U_{maxi} + U_{mini})$$

$$\rho = I_R / I_E = (I_{maxi} - I_{mini}) / (I_{maxi} + I_{mini})$$
 - le **TOS** (Taux d'Ondes Stationnaires) est égal à 100 fois ρ .

$$\text{TOS (\%)} = \rho \times 100$$
 - si les valeurs mesurées sont en **Watts**, la puissance réfléchie est égale à la puissance émise multipliée par le carré du coefficient de réflexion

$$\rho = \sqrt{(P_R / P_E)} \quad \text{ou} \quad P_{réfléchie} = P_{émise} \times \rho^2$$
- par le rapport des valeurs maxi/mini (en Ohms, Volts ou Ampères) appelé **ROS** (rapport d'ondes stationnaires).

$$\text{ROS (rapport / 1)} = Z_{maxi}(\Omega) / Z_{mini}(\Omega)$$
 ou
$$\text{ROS (rapport / 1)} = U_{maxi} / U_{mini} = I_{maxi} / I_{mini}$$



10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Exemples :
- Quel est le TOS ?
 - $U_E = 100 \text{ V}$ et $U_R = 4 \text{ V}$
 - Réponse : $4/100 = 0,04 = 4\%$
- Quel est le ROS ?
 - $Z_{\text{coax}} = 50 \Omega$ et
 $Z_{\text{doublet } \lambda/2} (= 75 \Omega)$
 - Réponse : $75/50 = 1,5/1$
 - $Z_{\text{coax}} = 50 \Omega$ et
 $Z_{\text{antenne verticale } \lambda/4} (= 36 \Omega)$
 - Réponse : $50/36 = 1,3888 = 1,4/1$

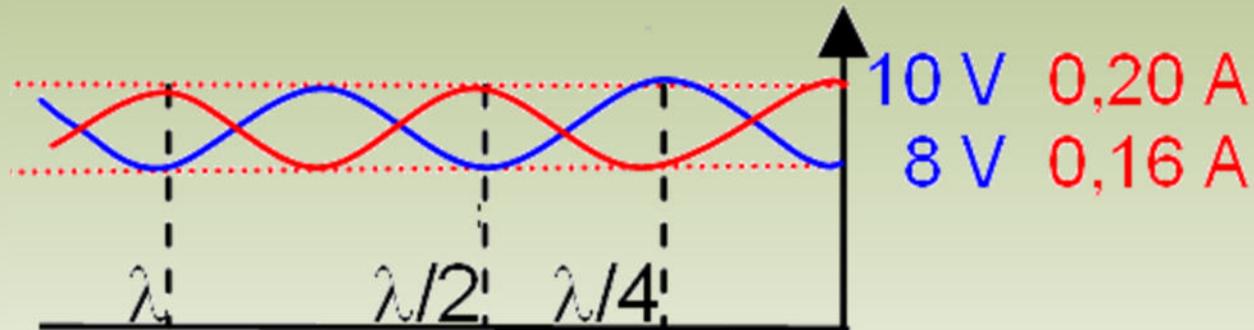


10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Exemples :

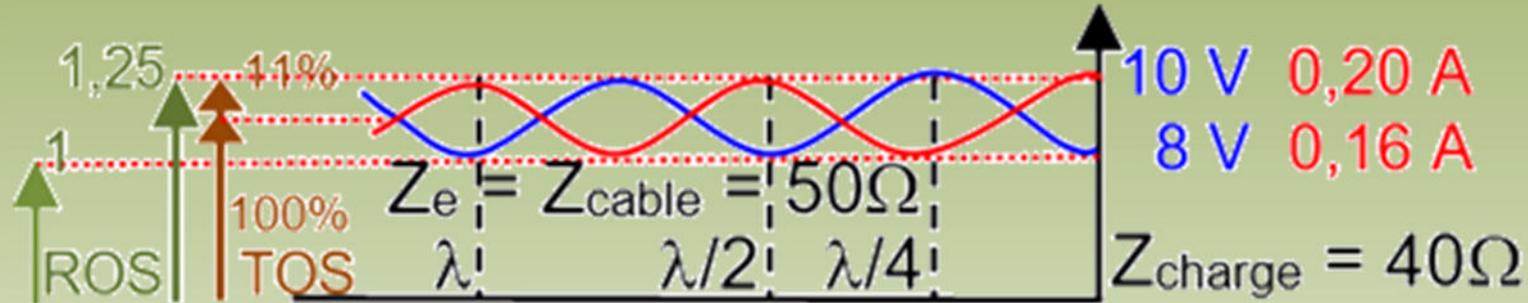
- Dans le schéma ci-dessous, quels sont le ROS et le TOS ?



- $ROS = V_{maxi} / V_{mini} = 10 / 8$
(ou $I_{maxi} / I_{mini} = 0,2 / 0,16$) = **1,25/1**
- $\rho = [(10 - 8) / (10 + 8)]$
(ou $[(0,2 - 0,16) / (0,2 + 0,16)]$) = 0,111
soit **TOS = 11%**



10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- complétons le schéma de l'exemple précédent :
 - le générateur délivre une tension de 9 V et la tension réfléchi est de 1 V . (**$TOS = 11\%$**)
 - la désadaptation résulte ici d'un rapport d'impédance de $50 / 40$ (**$ROS = 1,25/1$**).
 - le taux de puissance réfléchi est $\rho^2 = 1,23 \%$ ($=1/9^2$).
 - valeurs maxi et mini de U (en bleu) et I (en rouge) :
 - $Z_{\text{câble}} = U_{\text{maxi}}/I_{\text{maxi}} = U_{\text{mini}}/I_{\text{mini}} = 10 / 0,2 = 8 / 0,16 = 50 \Omega$;
 - $Z_{\text{charge}} = 8 / 0,2 = 40 \Omega$
 - $P_{\text{émise}} = U^2/R = 9^2/50 = 1,62 \text{ W} = P_{\text{charge}}$ en régime établi
 - $P_{\text{charge}} \text{ début régime transitoire} = U.I = 8 \times 0,2 = 1,6 \text{ W} = P_{\text{émise}} \times (1-\rho^2)$



10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- *Il y a des complications lorsque l'impédance est réactive*
 - *l'intensité et la tension ne sont plus déphasées de 180°*
- **Régime transitoire :**
 - *lorsque l'onde réfléchie atteint le générateur, elle est renvoyée vers la charge (en se superposant à l'onde émise par le générateur)*
 - *où elle sera une nouvelle fois partiellement absorbée*
 - *jusqu'à ce que le système se stabilise*
 - *tenir compte des pertes dues à l'affaiblissement linéique*
- **Régime établi :**
 - *lorsque le système est stabilisé,*
 - *toute la puissance du générateur est absorbée par la charge*
 - *dans la ligne, il y a plus d'énergie (celle émise + celle réfléchie + les allers-retours jusqu'à la stabilisation du système) mais les rapports ROS/TOS restent identiques.*

10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Pour la transformation du ROS en ρ (ou en TOS) et inversement, les formules suivantes sont utilisées :

$$ROS = (1+\rho)/(1-\rho)$$

$$\rho = (ROS-1)/(ROS+1)$$

Peu de questions sur l'utilisation de ces deux formules à l'examen

Tableau de correspondances des principales valeurs

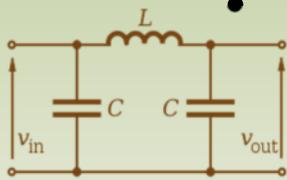
ROS (rapport des impédances)	1 / 1	1,1 / 1	1,25 / 1	1,5 / 1	2 / 1	3 / 1
TOS	0%	4,76%	11,1%	20%	33,3%	50%
ρ	0	0,048	0,111	0,2	0,333	0,5
Taux de puissance réfléchie	0%	0,23%	1,21%	4%	11,1%	25%



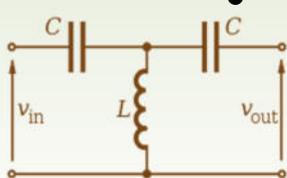
10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Le fait d'insérer une **boîte de couplage** entre la ligne et l'émetteur protège l'amplificateur final mais ne solutionne pas les problèmes liés à la désadaptation (*pertes supplémentaires liées au ROS, mode commun, ...*).



- Une boîte de couplage peut être constituée d'un filtre passe-bas en pi (*voir § 4.5*) permettant d'accorder l'impédance de la ligne et de sa charge avec celle de l'amplificateur.



- Le filtre en T est aussi utilisé pour adapter les impédances mais celui-ci ne fait pas office de filtre passe-bas.*



10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

- Si les impédances de la charge et de la ligne ne sont pas égales, il y a des ondes stationnaires dans la ligne de transmission et l'impédance ramenée à l'entrée peut avoir des composantes réactives (inductives ou capacitives).
- Toutefois, pour certaines longueurs de ligne, **les composantes réactives s'annulent** :

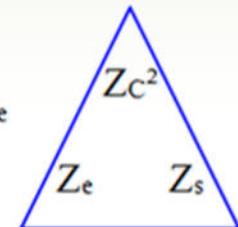
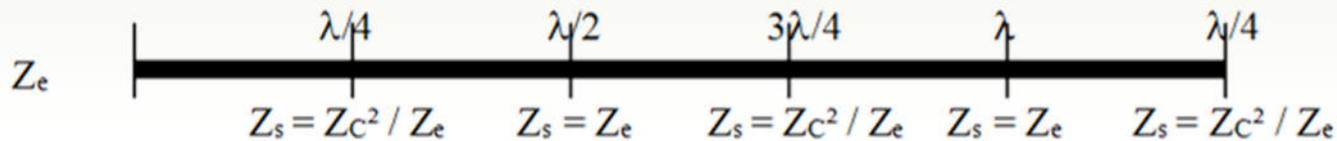
- à chaque demi-onde, on a

$$Z_e = Z_s$$

- à chaque nombre impair de quart d'onde, on a

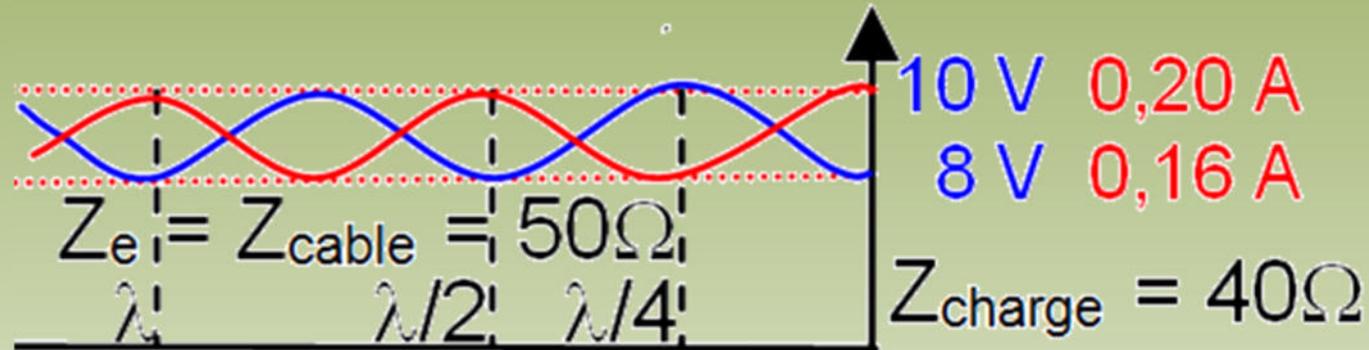
$$Z_C^2 = Z_e \times Z_s$$

$$\text{ou } Z_C = \sqrt{(Z_e \cdot Z_s)}$$





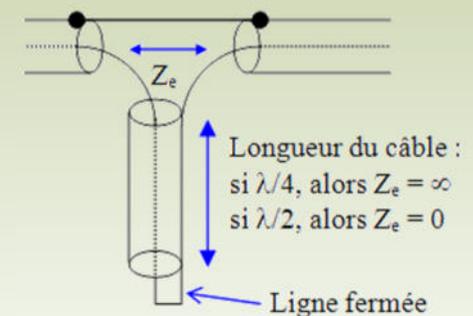
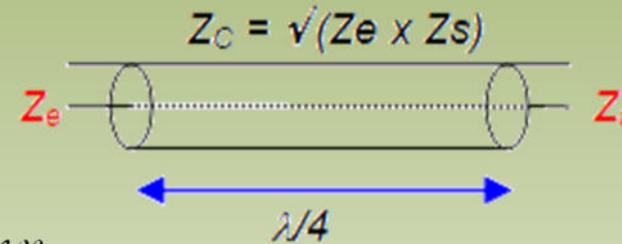
10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

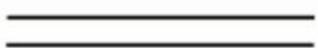


- *repreons le schéma ROS/TOS de l'exemple précédent, à $\lambda/4$ de la charge, on a :*
 - $Z_{\lambda/4} = U / I = 10V / 0,16A = 62,5 \Omega$
 - *on peut vérifier que $Z_{\text{câble}}^2 = Z_{\lambda/4} \times Z_{\text{charge}}$:*
 - $62,5 \times 40 = 2500 = 50^2$
 - *le phénomène se répète à $3\lambda/4$ de la charge et tous les multiples impairs de quart d'onde*
- *à $\lambda/2$ de la charge, on a $Z_{\lambda/2} = Z_{\text{charge}}$*
 - *pas d'incidence de l'affaiblissement linéique du câble sur l'impédance (I et U diminuent dans les mêmes proportions)*
 - *le phénomène se répète à λ et à toutes les demi-ondes*

10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

- Une **ligne quart d'onde** pourra être utilisée pour **adapter des impédances**
 - *attention à la vitesse du câble pour calculer sa longueur*
 - *ne fonctionne que pour une bande de fréquence*
- Les propriétés des **lignes quart d'onde et demi-onde** permettent de **réaliser des filtres** en insérant des morceaux de câble coaxial (ou de ligne bifilaire) de longueur $\lambda/4$ ou $\lambda/2$ dans une ligne de transmission.



Type de ligne	schéma	quart d'onde ($\lambda/4$) et nombre impair de $\lambda/4$	demi-onde ($\lambda/2$) et nombre entier de $\lambda/2$
impédance de sortie		Inversion de l'impédance	Recopie de l'impédance
Ligne ouverte $Z_s = \infty$ (infini)		Impédance d'entrée nulle $Z_e = Z_c^2 / Z_s = Z_c^2 / \infty = 0$	Impédance d'entrée infinie $Z_e = Z_s = \infty$
Ligne fermée $Z_s = 0$		Impédance d'entrée infinie $Z_e = Z_c^2 / Z_s = Z_c^2 / 0 = \infty$	Impédance d'entrée nulle $Z_e = Z_s = 0$

10-4) impédance et coefficient de vélocité

- Pour une ligne ouverte, on n'aura jamais une impédance infinie. En effet, on rappelle (voir § 4-2) que le vide a
 - une perméabilité μ_0 de $1 / 36 \pi \cdot 10^9$ H/m (soit $1,26 \mu\text{H}/\text{m}$) et
 - une permittivité ϵ_0 de $4 \pi \cdot 10^{-7}$ F/m (soit $8,84 \text{ pF}/\text{m}$)
- la formule de Maxwell définit l'impédance du milieu de propagation:

$$Z_{\text{milieu}} = \sqrt{Z_L \times Z_C} = \sqrt{2 \pi F L \times 1 / (2 \pi F C)} = \sqrt{L / C}$$

- **le vide a une impédance de $\sqrt{L / C} = \sqrt{1 / 36 \pi \cdot 10^9 \times 4 \pi \cdot 10^{-7}}$**
 $= 120 \pi = 377 \Omega$ (et non pas ∞)
 - ne pas confondre impédance du milieu de propagation et résistance d'isolement
- de plus, la loi de Maxwell définit la vitesse de propagation des ondes :

$$L \cdot C \cdot c^2 = 1$$

$$\text{d'où } c = 1 / \sqrt{L \times C} = 1 / \sqrt{1 / 36 \pi \cdot 10^9 \times 4 \pi \cdot 10^{-7}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

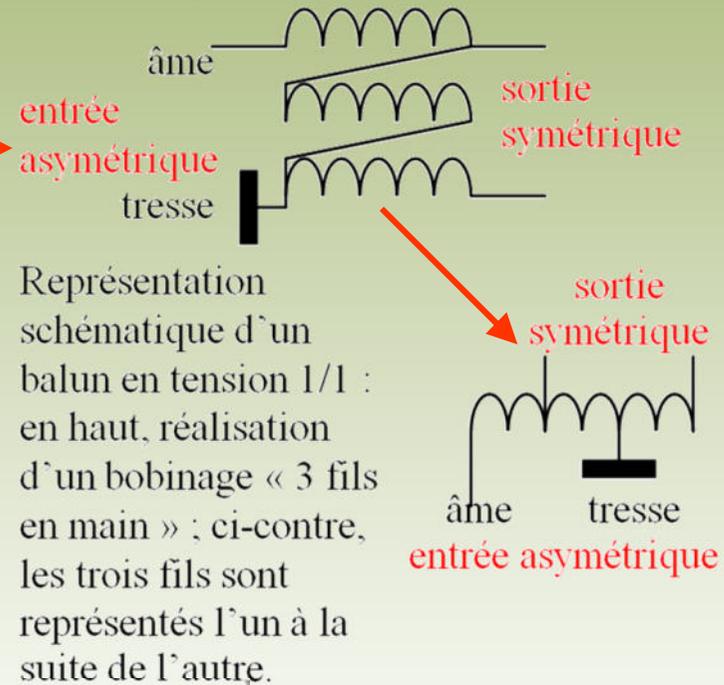
- la vitesse de propagation des ondes est toujours arrondie à 300.000 km/s
- les permittivité et perméabilité relatives de l'air sec sont très proches de celles du vide ($\mu_r = 1,00068$ et $\epsilon_r = 1,0014$) si bien que les impédances de l'air sec et du vide sont égales, ainsi que les vitesses de propagation dans ces deux milieux.

10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

Balun = BALanced-UNbalanced (symétriseur)

BALUN 1/1

pour rendre symétrique
 une antenne qui ne
 l'est pas ou ne l'est
 plus (symétriseur de
 tension)



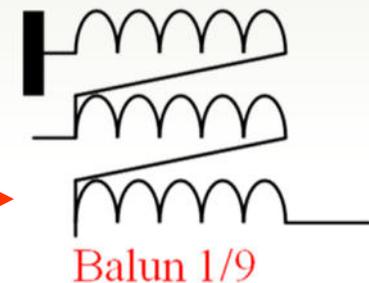
CHOKER BALUN

symétriseur de courant
to choke = étouffer



BALUN 1/9

dit « adaptateur miracle »





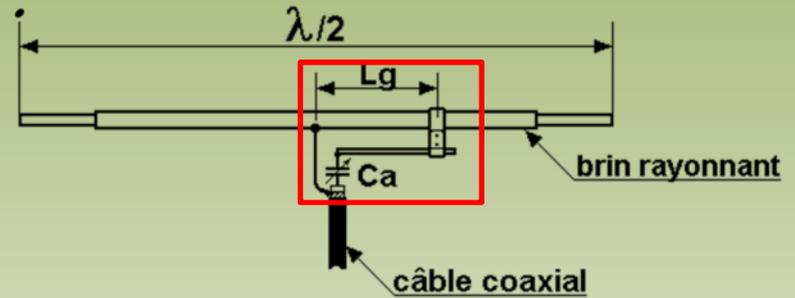
10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

Autre système d'adaptation :

gamma match

$$\text{gamma} = \Gamma$$

ajustement avec la longueur
du gamma et la valeur de C



Pas de question recensée à l'épreuve de Technique

Autres systèmes de filtrage/ couplage :

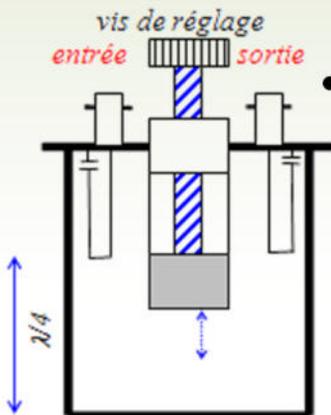
stub : système apparenté aux lignes d'adaptation quart d'onde/ demi-onde

- morceau de ligne de transmission en dérivation sur la ligne principale (à droite : stub en strip-line)



cavité : couplage de paires d'émetteurs et/ ou de récepteurs sur une seule antenne

- montage en série (passe bande)
- ou en dérivation vers la masse (réjecteur)



Le montage de la soirée

Les outils pour réaliser une antenne

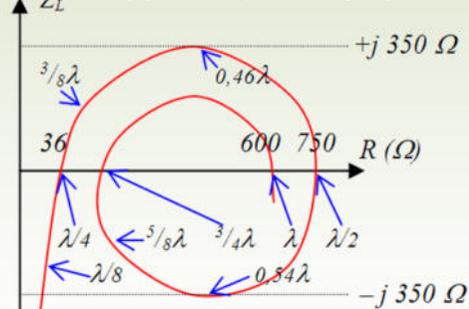


- **modélisation** avec MMANA (ou EZNEC), deux logiciels gratuits téléchargeables
- **un analyseur d'antenne (VNA)**
 par exemple : Mini1300 (ref Banggood : Upgrade Mini1300 4.3inch TFT LCD)
- **le diagramme de Smith** (représentation polaire)



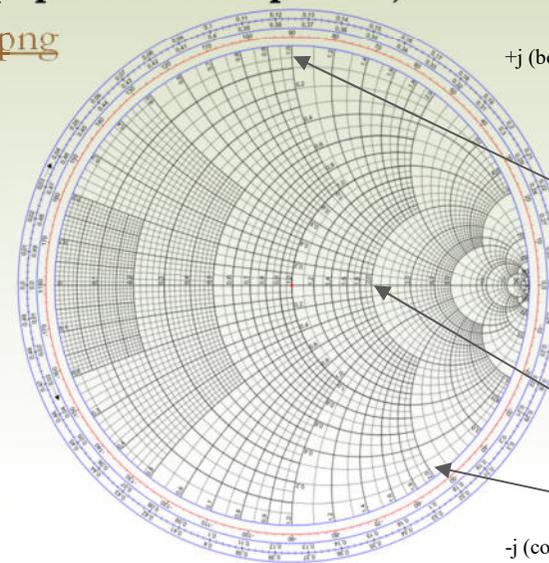
lien : <http://f6kgl.f5kff.free.fr/Smith.png>

Rappel du §9.10^e (impédance d'un long fil)



Escargot de Smith (échelle linéaire)

Sens horaire quand la fréquence augmente pour une même longueur de fil (car le nombre de λ augmente)



+j (bobine)

Remarque : les valeurs sont « normalisées » avec $1 = 50 \Omega$

Courbe de j constant (+j 1 = +j50 Ω après « dénormalisation »)

Alignement des cercles R constant et des courbes de réactances

Cercle de R constant (2 = 100 Ω après « dénormalisation »)

Courbe de j constant (-j 2 = -j100 Ω après « dénormalisation »)

-j (condensateur)

ou mieux, en ligne : https://www.will-kelsey.com/smith_chart/#

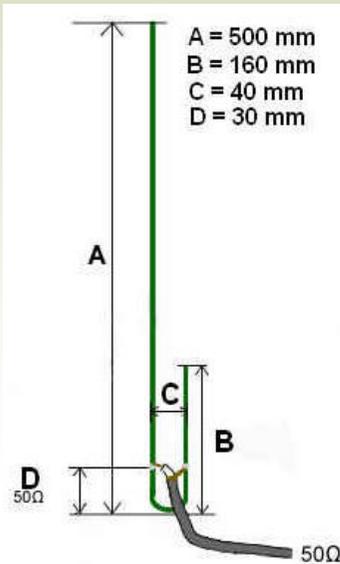
Le montage de la soirée

1) Modéliser avec MMANA



• Modélisation d'une antenne J (home made par F6GPU)

- Rappel de la manip réalisée lors du dernier cours
- lien du fichier MMANA <http://f6kgl.free.fr/Jpole.maa>
 - Définir les cotes de l'antenne
 - Définir le point d'alimentation
 - Lancer la calcul
 - Visualiser les résultats (R et X, rayonnement)



Le schéma

Les cotes reprises sur MMANA

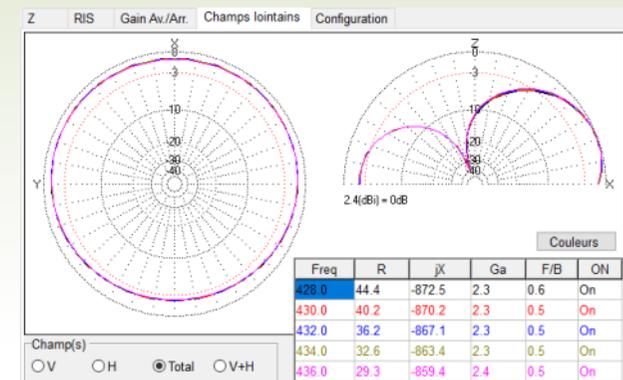
A = 495
 B = 160
 C = 40
 D = 33

tige filetée 6 mm
 + écrous/rondelles
 + équerre acier

câble 6mm+BNC

```

Wire No.1
X1: 0.000 m
Y1: 0.000 m
Z1: 0.033 m
X2: 0.040 m
Y2: 0.040 m
Z2: 0.033 m
R: 2.000 mm
SEG: -1
Len: 0.0400 m
Deg:0.0
X: 0.259 m
Z: -0.115 m
Projection
3D XY XZ YZ
Zoom
Afficher Tous
Grille
[ ] Activé [ ] Auto
Pas 0.01 m
    
```



Ce que ne sait pas faire un VNA :
 tracer un diagramme de rayonnement.



Le montage de la soirée

2) Analyser avec un VNA

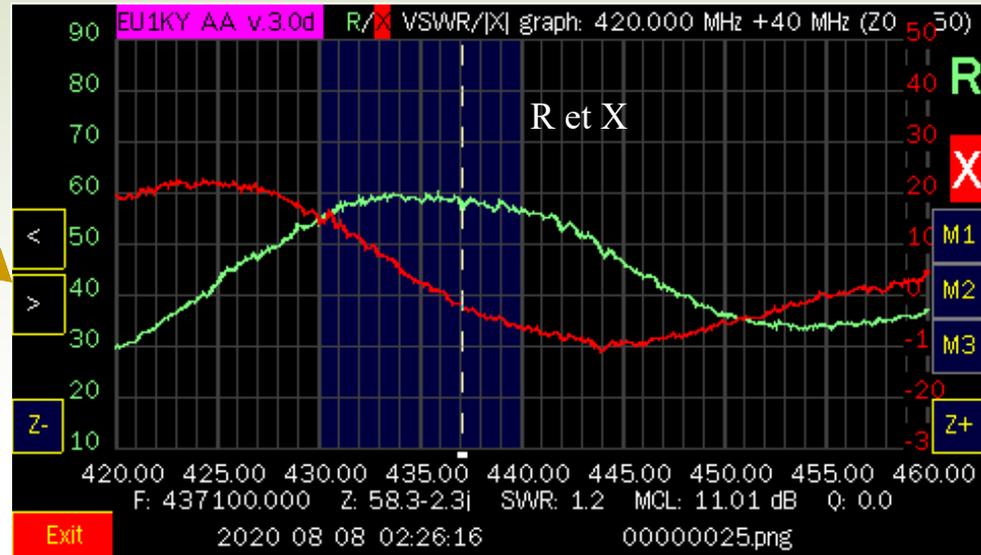
Le montage de la soirée



- Analyseur vectoriel d'antenne (VNA) :

- *Module « Frequency Sweep » (balayage de fréquence) :*

- *Menu 1 pour définir plage de fréquences mesurées (Frequency : 420 MHz + 40 MHz pour 420 à 460 MHz),*
- *Menu 2 pour lancer l'analyse (option Scan)*
- *Tapoter l'écran pour changer l'affichage du résultat*
- *Save Snapshot pour copie d'écran*
- *> ou < pour modifier la fréquence*

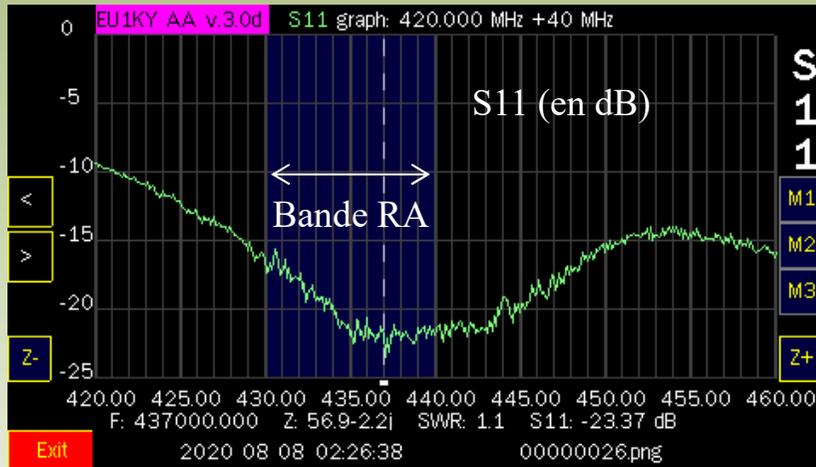


Le montage de la soirée

2) Analyser avec un VNA



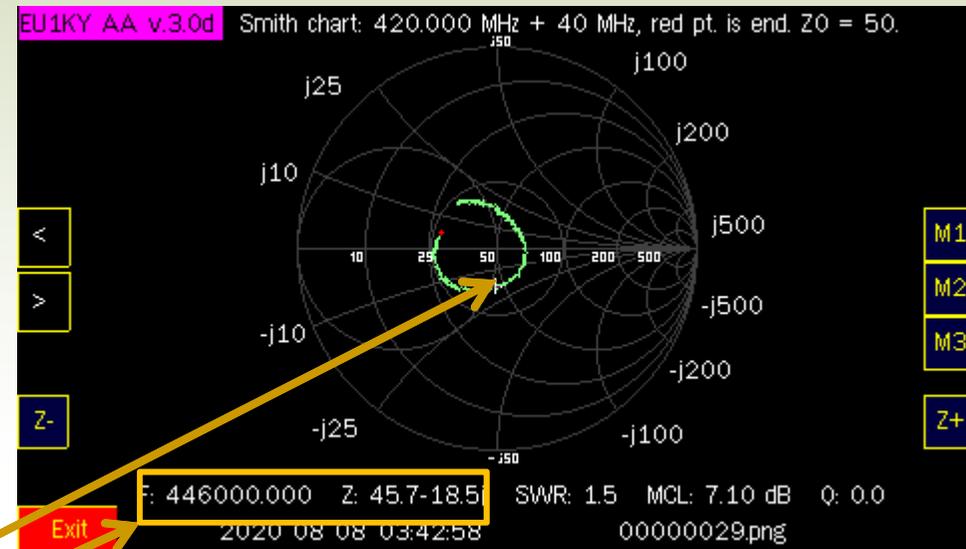
• Analyseur vectoriel d'antenne (VNA) :



Exemple : comment adapter l'antenne sur 446 MHz ?

- Si l'antenne n'est pas adaptée, comment l'améliorer ?

- Sur le diagramme de Smith, ajuster la fréquence (> ou <) à 446 MHz, relever les valeurs R et X



Impédance sur 446 MHz :
 $45,7 \Omega - j18,5 \Omega$

Remarquez que lorsque la fréquence augmente, la courbe tourne dans le même sens que l'escargot de Smith

Le montage de la soirée

3) Adapter avec un abaque de Smith

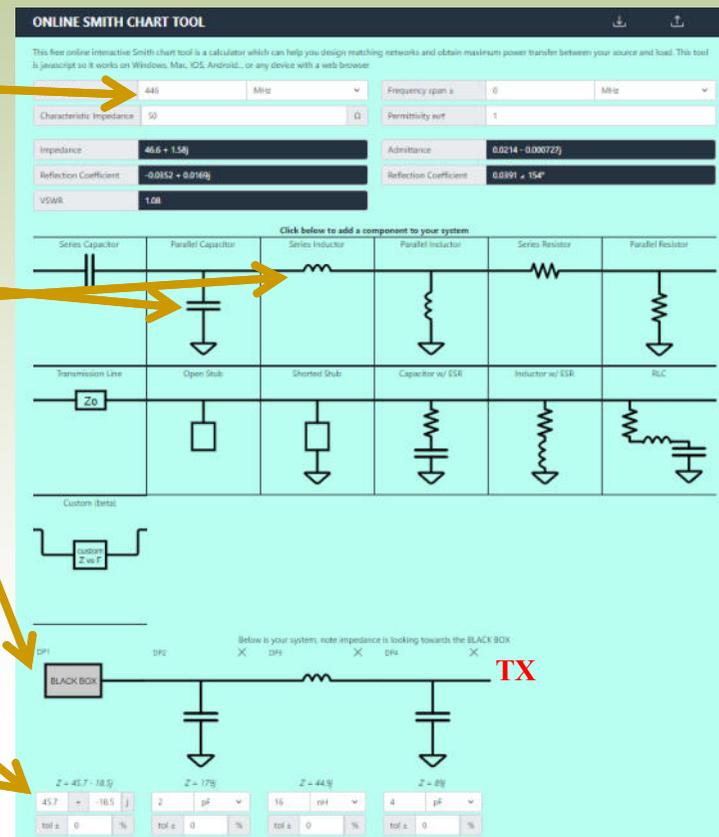


Un abaque de Smith et des adaptations en ligne :

https://www.will-kelsey.com/smith_chart/#

adapter sur 446 MHz (avec une impédance $Z = 45,7 \Omega - j18,5 \Omega$)

- Entrer la fréquence
- Définir l'adaptation (*filtre en pi*) en sélectionnant :
 - C en parallèle
 - L en série
 - C en parallèle
- Saisir l'impédance de la « Black Box » (*l'antenne*) :
 - R
 - +/- j



ONLINE SMITH CHART TOOL

This free online interactive Smith chart tool is a calculator which can help you design matching networks and obtain maximum power transfer between your source and load. This tool is javascript so it works on Windows, Mac, IOS, Android... or any device with a web browser.

Frequency: 446 MHz
 Frequency span: 0 MHz
 Characteristic impedance: 50 Ohms
 Permittivity: 1

Impedance: $46.6 + j1.54$
 Admittance: $0.0214 - j0.000727$
 Reflection Coefficient: $-0.0452 + j0.0169$
 Reflection Coefficient: $0.0391 \angle 154^\circ$
 VSWR: 1.08

Click below to add a component to your system

Series Capacitor, Parallel Capacitor, Series Inductor, Parallel Inductor, Series Resistor, Parallel Resistor, Transmission Line, Open Stub, Shorted Stub, Capacitor w/ ESR, Inductor w/ ESR, RLC, Custom (beta)

Below is your system, note impedance is looking towards the BLACK BOX

BLACK BOX TX

$Z = 45.7 - j18.5$ $Z = 178$ $Z = 44.9$ $Z = 8j$

45.7 -18.5 j 2 pF 18 nH 4 pF

tol: 0 % tol: 0 % tol: 0 % tol: 0 %

Le montage de la soirée

3) Adapter avec un abaque de Smith



• Un abaque de Smith et des adaptations en ligne :

https://www.will-kelsey.com/smith_chart/#

• adapter sur 446 MHz (avec une impédance $Z = 45,7 \Omega - j18,5 \Omega$)

• *Pour plus de lisibilité, désélectionner*

- Admittance
- Adm

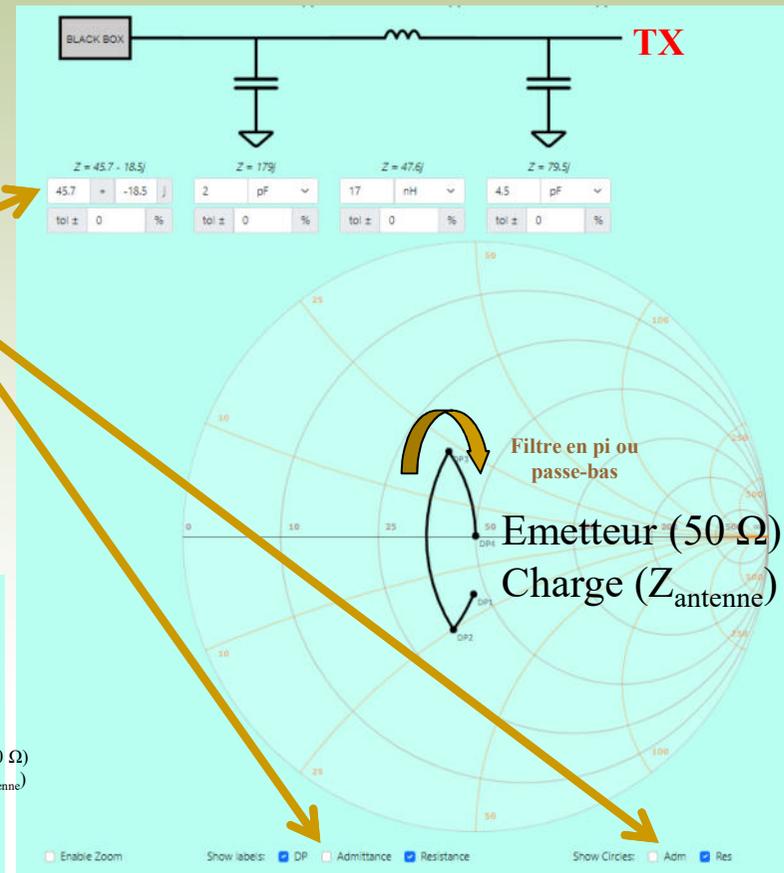
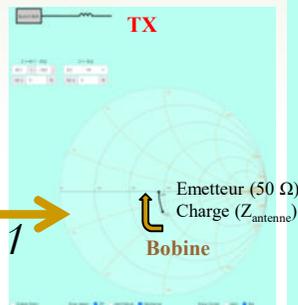
• Par tâtonnements on peut trouver :

- C1 (côté charge) = **2 pF**
- L = **17 nH**
- C2 (côté TX) = **4,5 pF**
- $F_c = 1 / [2\pi \sqrt{(17n \cdot 1,4p)}] \approx 1 \text{ GHz}$
- *une infinité de possibilités est envisageable*

• *Essayons avec un filtre en T...*

• *... ou un simple passe bas (une seule possibilité est offerte) ...*

• *... ou une bobine de **6,5 nH** en série ; le ROS est ramené à 1,09/1*



Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

Le cours de F6KGL

était présenté par F6GPX

Bon week-end à tous et à la semaine prochaine !

**Retrouvez-nous tous les vendredis soir au Radio-Club
de la Haute Île à Neuilly sur Marne (93) F5KFF-F6KGL,
sur 144,575 MHz (FM) ou sur Internet.**

Tous les renseignements sur ce cours et d'autres documents sont disponibles sur notre site Internet, onglet "*Les cours*" puis "*Certificat Radioamateur*"

f6kgl.f5kff@free.fr

<https://www.f6kgl-f5kff.fr>