

Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

Le cours de F6KGL

présenté par F6GPX

Technique

Chapitre 10

Lignes de transmission et adaptations

Ce document a servi pour le cours enregistré le 02/06/2017.

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



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)

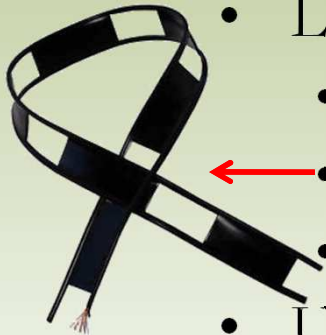
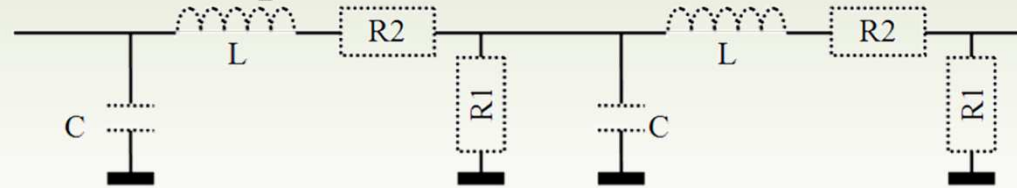
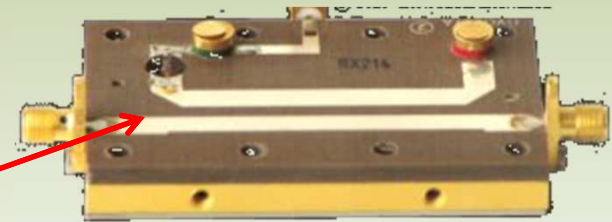
- strip line (gravée sur un circuit imprimé)

- 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)

- **Exemple :**

Soit un câble de 30 mètres de long avec, en entrée 200 W et en sortie 100 W.

Quel est l'affaiblissement linéique ?

Réponse :

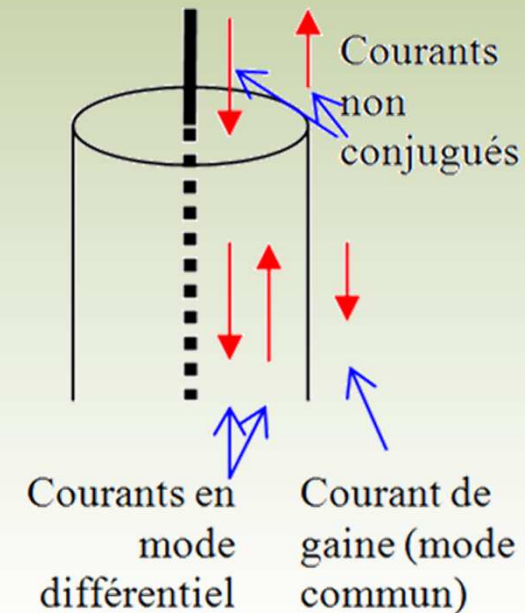
$$\text{atténuation} = 100/200 = 1/2 \Leftrightarrow -3 \text{ dB}$$

$$\text{affaiblissement linéique} = 3 \text{ dB} / 30 \text{ m} = \mathbf{0,1 \text{ dB/m}}$$



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 :

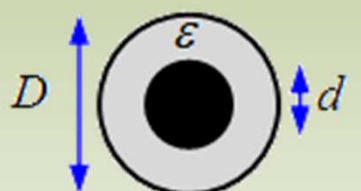
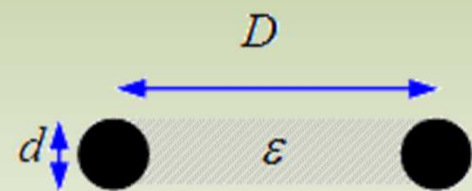
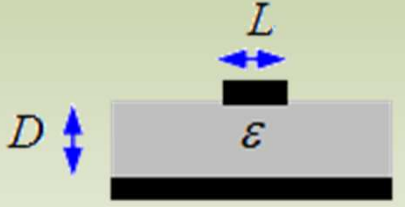
- $L = 0,5 \mu\text{H/mètre}$
- $C = 200 \text{ pF/mètre}$

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

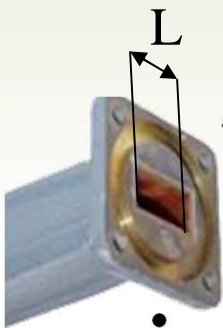


10-2) impédance et coefficient de vélocité

- 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 $Z_{\text{ligne}} = \sqrt{L / C}$

Coaxial rond	Ligne bifilaire	Strip line (circuit imprimé)
		
$Z(\Omega) = (138 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(D/d)$	$Z(\Omega) = (276 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(2D/d)$	$Z(\Omega) = (138 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(4D/L)$

- 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 $\Leftrightarrow \lambda < 10$ cm $\Leftrightarrow F > 3$ GHz
- La **fibre 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

- 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:

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

- **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 :

$$L.C.c^2 = 1$$

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

- 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 et les vitesses de propagation dans ces deux milieux sont égales.



10-2) impédance et coefficient de vélocité

- 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). Puisque $c = 1 / \sqrt{L \times C}$, on a :

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

- *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

- 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 ».

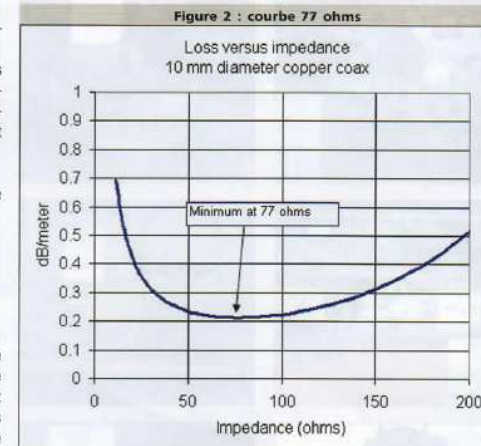
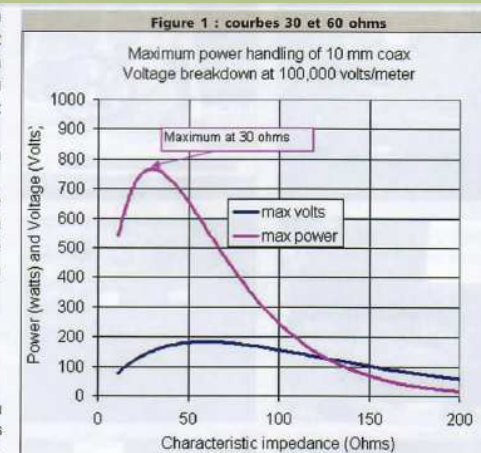
Ce n'est pas le résultat de mesures ou de calculs, mais l'analyse de la littérature américaine accessible via le net. Les différents articles avancent des hypothèses mais sans aucune certitude. Un auteur indique d'ailleurs que les explications « historic » peuvent avoir été déformées selon le parcours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



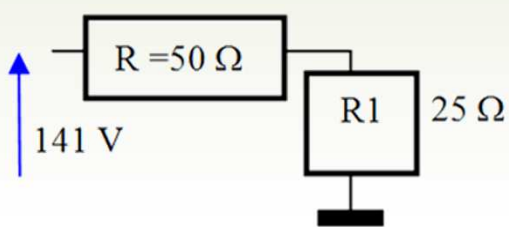
voir Radio-REF (10/2010) :

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

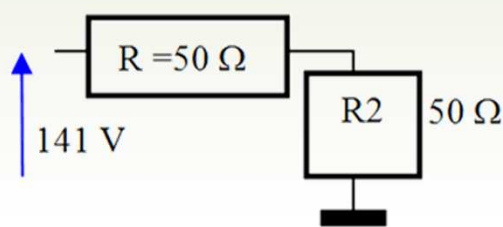


10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires

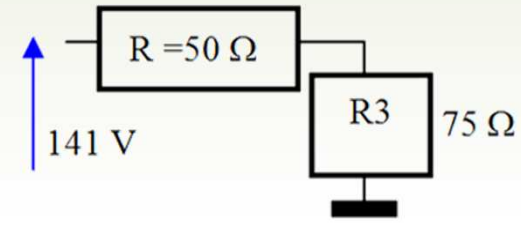
- Le **transfert de puissance** entre un générateur de courant alternatif et une charge est maximal lorsque l'impédance du générateur est
 - égale à celle de la charge
 - de signe contraire, si il y a une réactance.
 - les **impédances** sont alors **conjuguées**.
- Dans les exemples ci-dessous, on cherche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



89 W



100 W



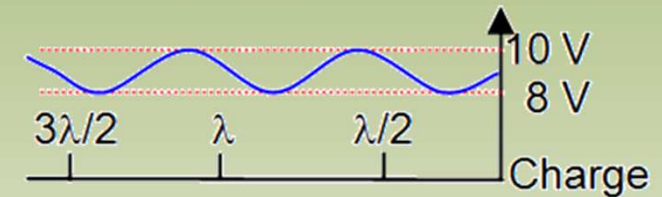
96 W

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

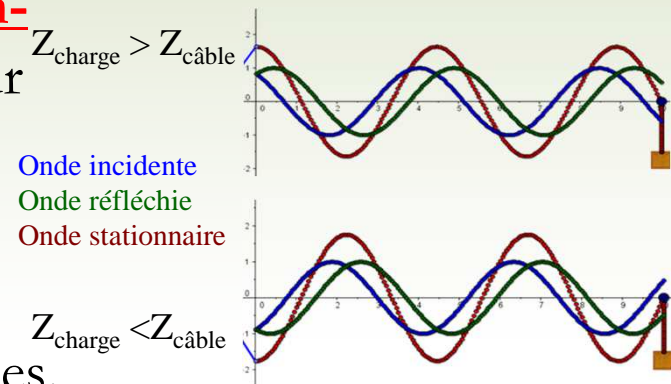


10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires

- La **désadaptation des impédances** entraîne qu'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**) et à d'autres, elles se soustraient (**nœuds**).
- les endroits où se situent ces maxima et ces minima sont fixes (d'où le nom d'**ondes stationnaires**) et dépendent de la longueur de la ligne et 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.



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).

$$\rho = U_R / U_E = I_R / I_E$$

- 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

$$\rho = \sqrt{(P_R / P_E)} \quad \text{ou} \quad P_{\text{réfléchie}} = P_{\text{émise}} \times \rho^2$$

- par le rapport des impédances (toujours supérieur à 1) appelé **ROS** (rapport d'ondes stationnaires).

$$\text{ROS (rapport / 1)} = Z \text{ plus forte } (\Omega) / Z \text{ plus faible } (\Omega)$$



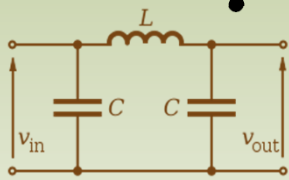
10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires

- **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 : $50/36 = 1,3888 = 1,4/1$

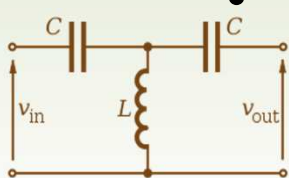


10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires

- 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.*





10-3) 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%



10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

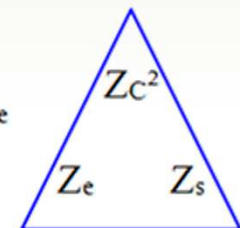
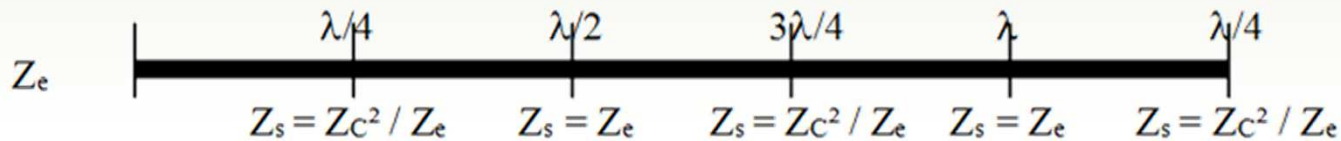
- Si les impédances de la charge et de la ligne ne sont pas égales, il y a des ondes stationnaires dans la ligne de transmission et l'impédance ramenée à l'entrée peut avoir des composantes réactives (inductives ou capacitives).
- Toutefois, pour certaines longueurs de ligne, **les composantes réactives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

$$Z_e = Z_s$$

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

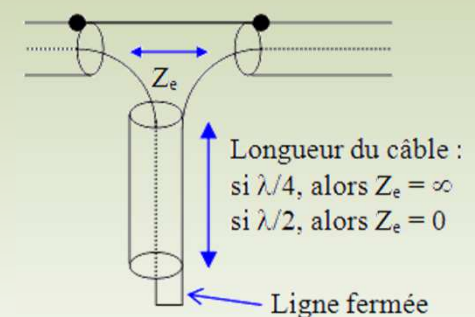
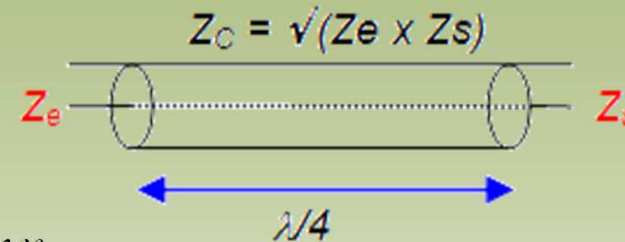
$$Z_C^2 = Z_e \times Z_s$$

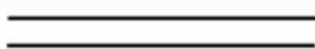
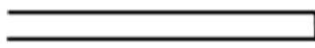
$$\text{ou } Z_C = \sqrt{Z_e \cdot Z_s}$$



10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

- 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) lignes d'adaptation et symétriseurs

Exemples :

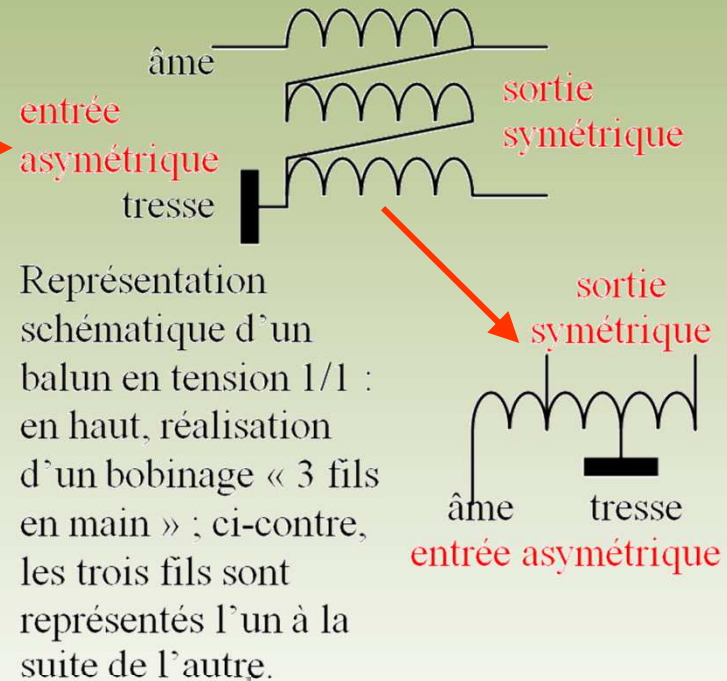
- Quelle est l'impédance du quart d'onde de câble coaxial pour adapter une impédance de 25 ohms avec une impédance de 100 ohms ?
 - Réponse : $Z_c = \sqrt{(25 \cdot 100)} = \sqrt{(2500)} = \mathbf{50 \Omega}$
- Quelle est la longueur du câble coaxial utilisé en ligne quart d'onde d'adaptation avec les caractéristiques suivantes :
 - fréquence du signal à adapter = 14 MHz
 - impédance caractéristique du câble = 75 ohms
 - coefficient de vélocité = 0,66
 - Réponse : longueur d'onde de la fréquence 14 MHz = $300/14 = 21,42 \text{ m}$; longueur d'un quart d'onde = $21,42/4 = 5,38 \text{ m}$; longueur du câble = $5,38 \times 0,66 = \mathbf{3,53}$ (arrondi à 3,50)
La valeur de l'impédance du câble ne sert à rien...

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)



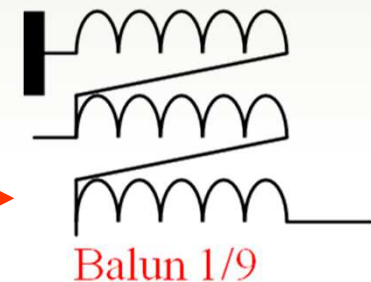
CHOKER BALUN

symétriseur de courant
to choke = étouffer



BALUN 1/9

dit « adaptateur miracle »





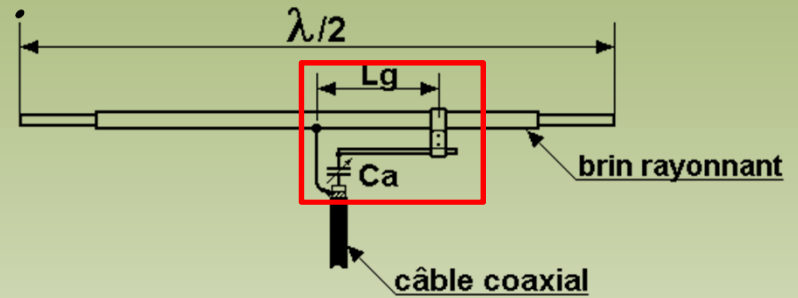
10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

Autre système d'adaptation :

gamma match

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

ajustement avec la longueur du gamma et la valeur de C

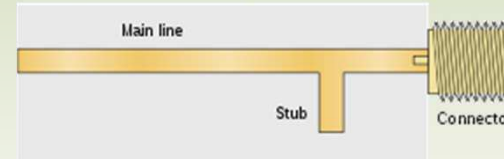


Pas de question recensée à l'épreuve de Technique

Autres systèmes de filtrage/ couplage :

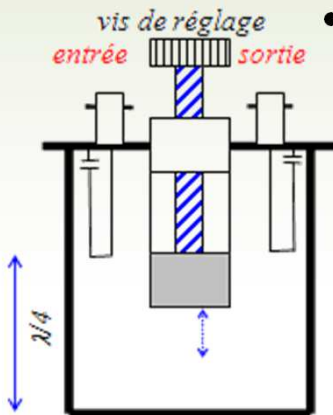
stub : système apparenté aux lignes d'adaptation quart d'onde/ demi-onde

- morceau de ligne de transmission en dérivation sur la ligne principale



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)





Chapitre 10

Le montage de la soirée

- Figures animées pour la physique (filtres, simulation de filtres)



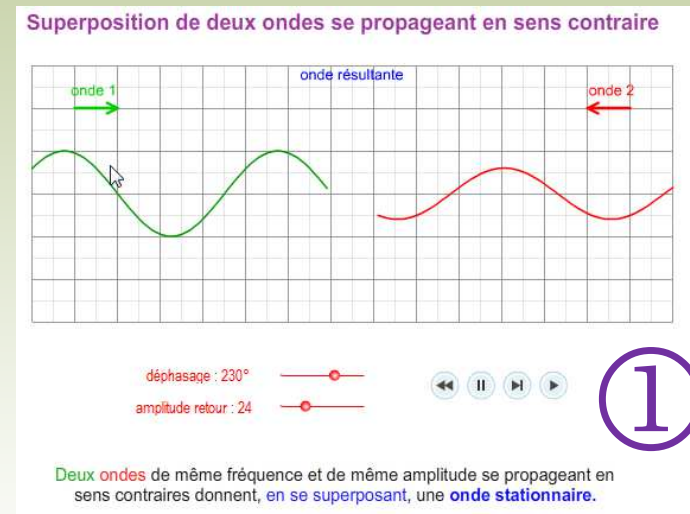
- http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/ondes_stationnaires/stationnaires.php (à partir du menu général : Ondes / Ondes Stationnaires / Ondes Stationnaires)

ONDES STATIONNAIRES

- 1) Superposition de deux ondes se propageant en sens contraire
- 2) Réflexion sur une extrémité
- 3) Résonance

G.T.
09/13

sommaire
précédent
suivant



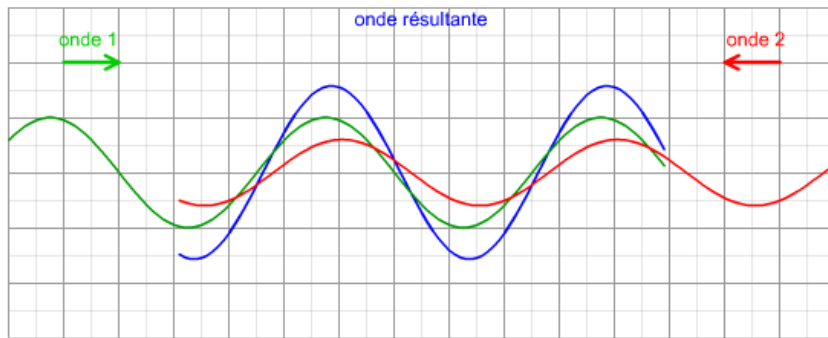
- Régime transitoire : il y a d'abord l'onde 1 puis, après la mauvaise absorption par la charge, l'onde 2 (plus faible) retourne au générateur. Après mauvaise absorption par le générateur, une onde 3 (encore plus faible) repart vers la charge, etc. La perte dans la ligne (à l'aller et au retour) est omise ci-dessus.
- Régime établi : à la fin, l'intégralité de la puissance du générateur aura été consommée par la charge.



Chapitre 10

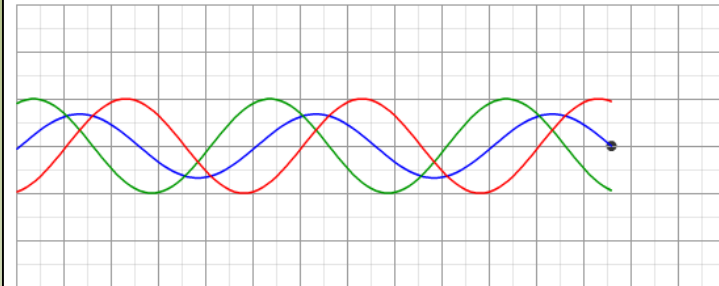
Le montage de la soirée

Superposition de deux ondes se propageant en sens contraire



1 déphasage : 230°  
amplitude retour : 24 

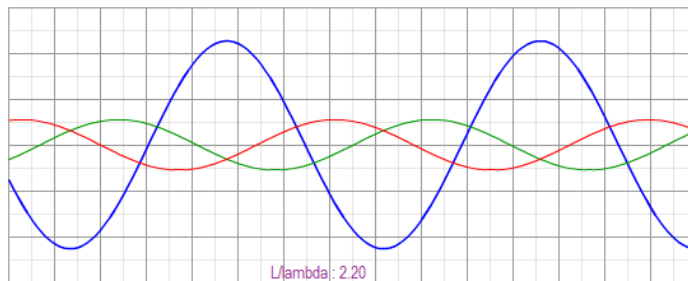
Réflexion sur une extrémité



Longueur : 1.26 m  Extrémité fixée
 Extrémité libre

2 en haut : câble (charge, extrémité fixée),
en bas : antenne (tension, extrémité libre)

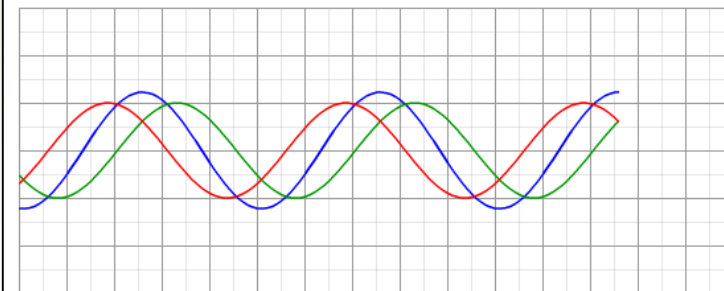
Résonance



3 fréquence : 0.439  Extrémité fixée
Amplitude : 22  Extrémité libre
Nombre : 50 

Après plusieurs réflexions sur les deux extrémités, l'onde stationnaire résultante peut avoir une amplitude beaucoup plus grande que l'onde excitatrice : c'est la résonance. Le milieu de propagation possède ainsi des "modes propres", caractérisés par leur fréquence de résonance.

Réflexion sur une extrémité



Longueur : 1.26 m  Extrémité fixée
 Extrémité libre

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 "*Formation F6GPX*"

f6kgl.f5kff@free.fr

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