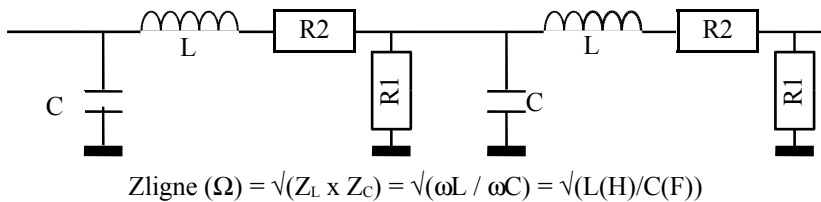


LIGNES DE TRANSMISSIONS et ADAPTATIONS

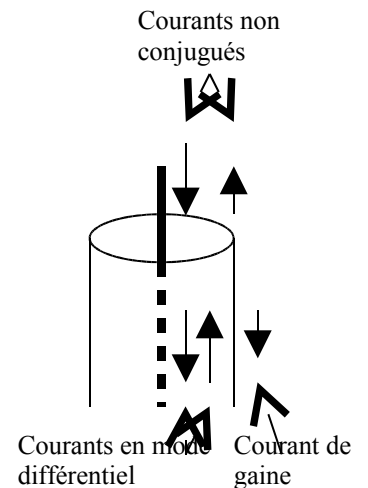
- ***Ligne de transmission***
- ***Impédance caractéristique***
- ***Adaptation, désadaptation***

1/Ligne de transmission

La ligne de transmission (feeder en anglais) peut être asymétrique (câble coaxial), symétrique (ligne bifilaire, appelée aussi twin lead ou échelle à grenouille) ou tubulaire (guide d'onde). Ce dispositif est utilisé pour **transférer l'énergie** de l'émetteur vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur. Une ligne de transmission peut être représentée par un circuit équivalent constitué d'une bobine, de deux résistances et d'un condensateur. Le rapport $\sqrt{L/C}$ (unité : Henry et Farad par mètre) fournit **l'impédance caractéristique** de la ligne (en ohm). La qualité de la ligne se mesure par sa **perte (en dB/m)** qui est déterminée par les résistances (R_2 doit être très faible et R_1 très forte). La perte, donnée par le constructeur du câble pour une fréquence, augmente avec la fréquence du signal transféré et est moindre dans une ligne bifilaire. La perte en fonction de la longueur de la ligne, appelée aussi **affaiblissement linéique**, ne peut être calculée qu'avec les décibels (voir §5-1) car l'affaiblissement suit lui-même une courbe logarithmique. Cette perte n'a aucun rapport avec l'impédance caractéristique de la ligne.



Dans une ligne de transmission, les courants dans les deux fils (ou âme et tresse) sont égaux et de valeurs contraires : la ligne fonctionne en **mode différentiel**. Dans un câble, les courants circulent à l'intérieur de celui-ci : il n'y a pas de rayonnement. Dans une ligne bifilaire, l'intensité étant la cause du rayonnement, la ligne ne rayonne pas puisque, les intensités étant de sens contraire, les champs électromagnétiques créés s'annulent mutuellement (à condition que les conducteurs soient suffisamment rapprochés). Lorsque les courants ne sont plus conjugués, la ligne fonctionne en **mode commun** : l'énergie excédentaire chemine à l'extérieur, en surface de la gaine (ou sur la face extérieure du fil). Dans ce cas, la ligne rayonne et fonctionne comme une antenne long fil. *Pour réduire le mode commun, l'antenne sera alimentée grâce à un symétriseur (balun, voir §10-4) ou quelques boucles seront faites avec le câble coaxial (choc-balun) pour réduire le courant de gaine.*



2/ L'Impédance caractéristique

Elle dépend du **rapport** $\sqrt{L/C}$ (unité : Henry et Farad par mètre) de la ligne, comme indiqué au paragraphe précédent. Si un signal est appliqué à l'entrée de la ligne, le même signal se retrouvera à la sortie (en négligeant les pertes) seulement si la ligne est bouclée sur une résistance (ou une charge non réactive) égale à son impédance caractéristique.


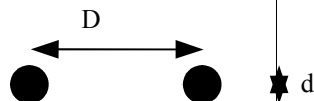
Exemple : Quelle est l'impédance d'un câble ayant comme caractéristiques $L=0,25 \mu\text{H/mètre}$ et $C=100 \text{ pF/mètre}$?

Réponse : $Z = \sqrt{0,25 \cdot 10^{-6} / 100 \cdot 10^{-12}} = \sqrt{2500} = 50 \Omega$

Sur une calculatrice : $0,25 \cdot 10^{-6} (L) / 100 \cdot 10^{-12} (C) = 2,5 \cdot 10^3 [\sqrt{\quad}] = 5 \cdot 10^1 = 50 \Omega$

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). *La vélocité est fonction du diélectrique utilisé. Soit ϵ le coefficient du diélectrique, la vélocité est égale à $1/\sqrt{\epsilon}$. Les diélectriques utilisés couramment sont le polyéthylène (PE, $\epsilon = 2,3$) et le téflon ($\epsilon = 2,1$). Pour l'air sec ou le vide, $\epsilon = 1$; pour les constantes diélectriques d'autres matériaux, voir §2-3. Le coefficient de vélocité est, en général, de 66% ($=1/\sqrt{2,3}$) pour un diélectrique en PE mais peut atteindre 80% (câble semi-aéré en PE expansé, $\epsilon = 1,5$), voire 95% dans le cas de la ligne bifilaire (diélectrique = écarteur et air, $\epsilon = 1,1$).*

L'impédance caractéristique du câble coaxial et de la ligne bifilaire peut aussi se calculer à partir du diélectrique employé et du rapport entre les dimensions des conducteurs (rapport entre le diamètre intérieur de la tresse et le diamètre de l'âme ou rapport entre l'écartement entre des fils et leurs diamètres). Les formules de calcul de l'impédance des lignes sont directement issues du rapport entre l'inductance linéique (en Henry/m) d'un fil et la capacité linéique (en Farad/m) de la même longueur. Intervient aussi dans le calcul la résistance linéique (souvent très faible) et la conductance linéique (très importante quand la fréquence augmente). Ces deux derniers termes sont négligeables par rapport à l'inductance et à la capacité dans les applications du domaine radioamateur.

ϵ = Coefficient du diélectrique utilisé = 2,3 pour le PE ; 2 pour le téflon = 1,1 avec des écartereurs = 1 pour l'air ou le vide Impédance Vitesse ($=1/\sqrt{\epsilon}$)	Coaxial rond  $(138/\sqrt{\epsilon}) \times \log(D/d)$ 66% à 90%	Ligne bifilaire  $(276/\sqrt{\epsilon}) \times \log(D/d)$ 95%

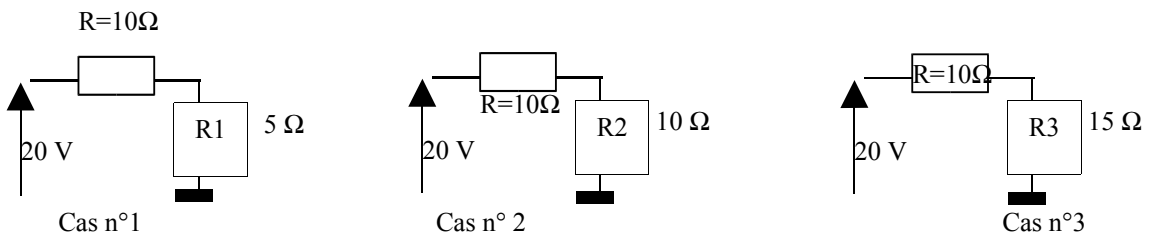
La propagation dans un guide d'onde (tube de section rectangulaire ou circulaire) se fait par réflexion sur les parois conductrices d'un tube, dans l'air. Il existe différents modes de fonctionnement possibles dont l'étude demanderait un développement particulier, dépassant le cadre de ce cours.

3/ Adaptation, désadaptation et ROS

3.1/Taux et rapport d'onde stationnaire

Le transfert de puissance entre un générateur alternatif et une charge est maximal lorsque l'impédance du générateur est égale et de signe contraire à celle de la charge. Les impédances sont alors conjuguées. Dans l'exemple ci-dessous, pour simplifier les calculs, il n'y a pas de réactance. En ajoutant des capacités ou des inductances, la démonstration est plus complexe mais aboutit au même résultat. Si les termes réactifs sont nuls et que les résistances sont égales, le transfert de puissance est maximum.

Exemple : des trois résistances R1, R2 et R3, laquelle dissipe-t-elle le plus de puissance ?



Réponse : Appliquons la loi d'Ohm :

Cas n°1 : $P_{R1} = R \cdot I^2$, sachant que $I = U / (R + R1)$; $P_{R1} = R \cdot (U/(R+R1))^2 = 5 \cdot (20/15)^2 = 8,88 \text{ W}$

Cas n°2 : $P_{R2} = R \cdot I^2$, sachant que $I = U / (R + R2)$; $P_{R2} = R \cdot (U/(R+R2))^2 = 10 \cdot (20/20)^2 = 10 \text{ W}$

Cas n°3 : $P_{R3} = R \cdot I^2$, sachant que $I = U / (R + R3)$; $P_{R3} = R \cdot (U/(R+R3))^2 = 15 \cdot (20/25)^2 = 9,6 \text{ W}$

Dans les trois cas ci-dessus, les résistances R1, R2 et R3 peuvent être considérées comme des résistances de charge alimentées par un générateur de résistance interne (R) de 10Ω. La résistance R2 dissipe le maximum de puissance car sa valeur est égale à la résistance interne du générateur. *Attention : dans les trois cas ci-dessus, il n'y a pas de ligne de transmission entre le générateur et la charge ; de plus, le courant est continu. Donc, le ROS et le TOS n'ont pas de signification physique car il n'y a pas d'ondes stationnaires. Toutefois, on remarquera que, dans le cas n°1, le rapport des résistances est 2/1 et la puissance dissipée est inférieure de 11% par rapport au cas n°2 ; dans le cas n°3, le rapport des résistances est 1,5/1 et la puissance est inférieure de 4% . La relation entre le rapport des résistances et la baisse de la puissance dissipée rappelle la relation ROS/TOS évoquée ci-dessous. Cette relation ROS / TOS est directement issue de la loi d'Ohm et a été simplifiée à l'extrême dans les trois cas ci-dessus.*

Lorsque l'impédance du câble n'est pas la même que celle de la charge (antenne par exemple), il apparaît des **ondes stationnaires** sur la ligne, cette désadaptation se mesure soit :

- par la valeur de la **puissance réfléchie (PR)** en fonction de la puissance transmise (PE) exprimable dans un taux (en %) appelé TOS (taux d'ondes stationnaires) ;
- par le **rapport des impédances** calculé de manière à être toujours supérieur à 1 (rapport d'ondes stationnaires ou **ROS**). Ce calcul n'est valable que dans le cas où les impédances du câble et de la charge sont des résistances pures (sans composantes réactives) :

$$\text{ROS} = Z \text{ plus forte} / Z \text{ plus faible}$$

Exemple $Z_{\text{coax}} = 50 \Omega$; $Z_{\text{doublet } \lambda/2} = 75 \Omega$; donc $\text{ROS} = 75/50 = 1,5 / 1$

Réponse : $Z_{\text{coax}} = 50 \Omega$; $Z_{\text{antenne verticale } \lambda/4} = 36 \Omega$; donc $\text{ROS} = 50/36 = 1,39 / 1$

$$\text{TOS} (\%) = \text{Puissance Réfléchie} / \text{Puissance Emise} = P_R / P_E$$

Exemple : $P_E = 100 \text{ W}$; $P_R = 4 \text{ W}$; donc $\text{TOS} = 4/100 = 4\%$

Le ROS et le TOS sont deux mesures du même phénomène : la désadaptation des impédances d'un générateur et de sa charge. Cette désadaptation entraîne qu'une partie de la puissance émise, la puissance réfléchie, retourne au générateur. Le fait d'insérer une « boîte de couplage » entre la ligne et l'émetteur protège l'amplificateur final mais ne résout pas les problèmes liés à la désadaptation (pertes supplémentaires liées au ROS, mode commun, ...). Une boîte de couplage peut être constituée d'un filtre en pi (voir § 4.4) permettant d'accorder l'impédance de la ligne. *Le tableau ci-dessous donne les principales correspondances de valeurs entre TOS et ROS. Au delà d'un ROS de 3/1, on considère que l'antenne n'est plus « adaptable » avec une boîte de couplage conventionnelle (de type boîte automatique intégrée aux transceivers).*

ROS (Z+/Z-)	1/1	1,5/1	2/1	3/1	4/1	$\infty / 1$
TOS (PR/PE)	0%	4%	11%	25%	36%	100%

Pour d'autres valeurs, les formules suivantes peuvent être utilisées :

Passage ROS \Rightarrow TOS :

$$\text{ROS} = \frac{1 + \sqrt{\text{TOS}}}{1 - \sqrt{\text{TOS}}} \quad \text{exemple : TOS} = 4\%, \text{ donc ROS} = \frac{1 + \sqrt{0,04}}{1 - \sqrt{0,04}} = \frac{1 + 0,2}{1 - 0,2} = 1,2/0,8 = 1,5/1$$

Passage TOS \Rightarrow ROS :

$$\text{TOS} = \frac{(\text{ROS} - 1)^2}{(\text{ROS} + 1)^2} \quad \text{exemple : ROS} = 1,5/1, \text{ donc TOS} = \frac{(1,5 - 1)^2}{(1,5 + 1)^2} = \frac{0,5^2}{2,5^2} = 0,25/6,25 = 0,04 = 4\%$$

3.2/Lignes d'adaptation et symétriseurs.

Si l'impédance de la charge n'est pas égale à l'impédance de la ligne, il y a des ondes stationnaires dans la ligne de transmission et l'impédance d'entrée peut avoir des composantes réactives (inductives ou capacitives). Toutefois, pour certaines longueurs de ligne, il n'y a pas de composantes réactives car elles s'annulent. Ces longueurs de ligne sont des longueurs « électriques » : le coefficient de vitesse doit être pris en compte. Les relations suivantes sont calculées avec Z_C = impédance du câble, Z_e = impédance d'entrée et Z_s = impédance de sortie :

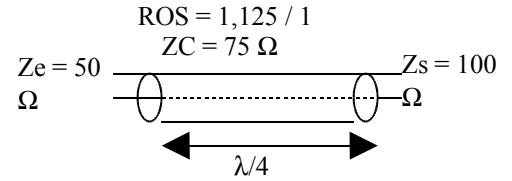
- à chaque nombre pair de quart d'onde (donc à **chaque demi-onde**), on a **$Z_e = Z_s$** , quelle que soit l'impédance de la ligne ; on n'échappe pas toutefois pas au courant en mode commun si la liaison entre la ligne de transmission et l'antenne est mal conçue (cas du doublet demi-onde relié directement à un câble coaxial).
- à **chaque nombre impair de quart d'onde**, on a **$Z_C^2 = Z_e \times Z_s$** . La transformation de l'équation donne : $Z_e = Z_C^2 / Z_s$ ou $Z_s = Z_C^2 / Z_e$ ou encore **$Z_C = \sqrt{Z_e \cdot Z_s}$** , formule utilisée le plus souvent.

Réponse :

$$ZC = \sqrt{50 \cdot 100} = \sqrt{5000} = 70,7 \Omega \text{ pour un câble de longueur de } \lambda/4$$

$$\text{Sur une calculette : } 50 (Ze) \times 100 (Zs) = 5000 [\sqrt{]} = 70,7$$

Un morceau de coaxial 75 Ω (valeur approchée) d'une longueur λ/4 adaptera à 50 Ω une antenne ayant une impédance de 100 Ω. Dans cette situation, on a $Ze = ZC^2/Zs = 75^2/100 = 56,25\Omega$, soit 1,125/1 de ROS (56,25/50) au lieu de 2/1 (100/50).



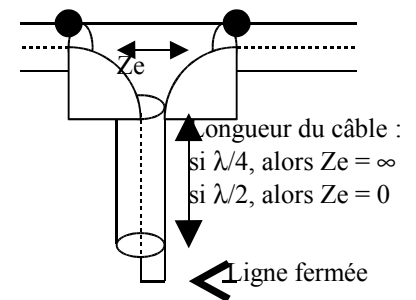
Les propriétés des lignes quart d'onde et demi-onde permettent de réaliser des filtres en insérant des morceaux de câble coaxial (ou de ligne bifilaire) de longueur λ/4 ou λ/2 dans une ligne de transmission. Pour le calcul de la longueur du câble, comme précédemment, le coefficient de vélocité doit être pris en compte. **L'impédance des lignes quart d'onde et demi-onde diffèrent selon qu'elles sont fermées ou ouvertes.** Une ligne est dite fermée lorsqu'à l'extrémité du câble, âme et tresse sont reliées ; dans ce cas, l'impédance de la charge de sortie est nulle ; sinon, la ligne est dite ouverte et l'impédance de la charge de sortie est infinie.

En fait, le vide ou plus généralement "l'espace libre" a une impédance car sans cela il serait impossible d'établir des communications. L'espace libre possède une inductance et une capacité et se comporte comme une ligne de transmission. Ainsi, l'impédance du vide est de 377 Ω (et non pas infinie, c'est pourquoi les lignes fermées dont on est sûr de l'impédance de sortie sont utilisées de préférence).

En reprenant le calcul des impédances des lignes de λ/2 et de λ/4, et quelle que soit l'impédance caractéristique de la ligne de transmission, les résultats suivants sont obtenus :

Ligne et Impédance de sortie	schéma	quart d'onde (λ/4) et nombre impair de λ/4	demi-onde (λ/2) et nombre entier de λ/2
Ouverte		Impédance d'entrée nulle	Impédance d'entrée
infinie		$Ze = ZC^2/Zs = ZC^2/\infty = 0$	$Ze = Zs = \infty$
$Zs = \infty$ (infini)		Impédance d'entrée infinie	Impédance d'entrée
Fermée		$Ze = ZC^2/Zs = ZC^2/0 = \infty$	$Ze = Zs = 0$
nulle			
$Zs = 0$			

Dans une ligne ouverte, l'impédance est capacitive et diminue jusqu'à ce que la ligne atteigne λ/4. A cet endroit l'impédance est celle d'un circuit LC série (nulle). Puis l'impédance devient inductive et augmente pour être celle d'un circuit bouchon (infinie) à λ/2 puis diminue en devenant capacitive pour être de nouveau nulle à 3λ/4 et ainsi de suite... La ligne fermée (schéma ci-contre) a un comportement décalé de λ/4 : son impédance inductive augmente avant λ/4, est infinie à cet endroit puis devient capacitive en diminuant. L'impédance de la ligne fermée est nulle à λ/2 ainsi qu'à toutes les longueurs égales à un nombre de demi-onde.

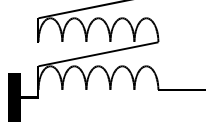


âme
Entrée
asymétrique
tresse

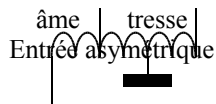
Sortie
symétrique

Sortie symétrique

L'adaptation entre une ligne de transmission asymétrique (coaxial) et une antenne symétrique (doublet) peut s'obtenir grâce à un transformateur monté d'une manière spécifique appelé **symétriseur** ou encore **balun**. (de l'anglais BALanced UNbalanced). Le balun symétrise les tensions mais pas les intensités : c'est le rôle du choc-balun (voir §10-1). Il peut jouer le rôle de transformateur d'impédance. On se souvient que le rapport de transformation de l'impédance est égal au carré du rapport du nombre de spires (voir §3-1). Dans la représentation ci-contre, le



Représentation schéma-tique d'un Balun 1/1 : en haut, réalisation d'un bobinage « 3 fils en main » ; ci-contre, les trois fils sont représentés l'un à la suite de l'autre.



rapport de transformation est 1/1 car le nombre de spires de l'entrée asymétrique est égal au nombre de spires de la sortie symétrique. Il existe d'autres systèmes d'adaptation : Gamma match (en forme de Γ , lettre grecque majuscule gamma), stub (prise sur les deux fils d'une ligne bifilaire ouverte ou fermée).

Les coupleurs à cavités sont souvent adoptés pour coupler des paires d'émetteurs/récepteurs sur une seule antenne dès que l'espacement des fréquences utilisées est au moins de 6 % de la fréquence d'utilisation (espacement de 900 kHz pour une utilisation sur 150 MHz). Les coupleurs à cavité sont bidirectionnels (émission / réception) et peuvent être montés en série (coupleurs passe bande) ou en dérivation (coupleurs réjecteurs). On peut bien entendu combiner les montages.

	Passe bande 	Réjecteur
Montage		
Avantages	On peut ajouter facilement un autre élément (plusieurs fréquences)	Peu de pertes d'insertion
fréquences	Filter par rapport à l'environnement	Possibilité de coupler des plus proches (3% au lieu de 6%)
Inconvénients a plus	Pertes d'insertion	Nombre de filtres important s'il y a de 2 fréquences à séparer