

# COMPRENDRE LE CÂBLE COAXIAL sans math est presque sans formules

## Pour partir sur une bonne base

Afin que tout soit bien clair et afin de faciliter la compréhension de l'exposé qui suit, je me permets de faire deux petites mises au point. Cela va paraître ridicule pour certaines grosses têtes mais je persiste à croire que même des techniciens de haut niveau, grands matheux ont parfois du mal à démystifier le fonctionnement de certains éléments de base de l'électronique sans rentrer dans des considérations physiques et mathématiques rébarbatives pour le commun des OM(s).

## RÉVISION

### - Le condensateur

Se compose de deux plaques conductrices séparées par un isolant ou diélectrique.

### - Son fonctionnement

Si l'on applique une tension continue aux bornes de celui-ci, la plaque du côté négatif se trouve en surplus d'électrons alors que la plaque positive se trouve en manque d'électrons, ceci est essentiellement le résultat de la proximité des deux plaques sachant que deux entités de signes contraires s'attirent. Le fait de couper la source d'alimentation tout en laissant le circuit ouvert, le condensateur reste dans l'état de charge étant donné que les électrons du côté plaque négative sont retenus par la plaque positive en manque et du fait du diélectrique les électrons ne peuvent rien faire d'autre (*abstraction faite des pertes inévitables*) que d'attendre une baisse de résistance à ces bornes afin de rétablir l'équilibre naturel en restituent l'énergie emmagasinée.

### - Le bobinage

Se compose couramment d'un certain nombre de spires enroulées voire un bout de fil.

### - Son fonctionnement

Si l'on applique une tension continue aux bornes de celui-ci l'énergie est transformée d'une part en champ magnétique et d'autre part en chaleur du fait de la résistance ohmique. Le fait de couper la source d'alimentation et vue la présence d'un champ magnétique dans l'environnement immédiat du bobinage, ce champ, en réintégrant ce bobinage, induit un courant qui s'oppose à la diminution du courant inducteur, donc comme pour le condensateur, restitution d'énergie. La résistance apparente en continu n'étant que la résistance ohmique du fil qui le compose.

Si l'on applique une tension alternative aux bornes de celui-ci l'énergie est transformée essentiellement en champ magnétique, mais du fait de la variation continue de la source avec alternativement passage par un maxi positif, un zéro puis un maxi négatif, le champ magnétique suit cette variation tout en s'additionnant au courant inducteur lors de la diminution de ce dernier. De ce fait la résistance apparente augmente et change de nom pour s'appeler impédance (**Z**), celle-ci étant essentiellement fonction de la fréquence de la source d'alimentation.

## AU FAIT

### Ligne de transmission haute fréquence

Une ligne de transmission haute fréquence se compose toujours de deux conducteurs respectivement de diamètre et d'espacement égaux. Ces deux paramètres déterminent en priorité l'impédance propre de la ligne. Cette impédance (**Z**) s'exprime en Ohms comme pour une résistance pure. En réalité elle ne l'est pas et de ce fait, **Z** ne peut en aucun cas être mesurée comme une résistance pure avec les moyens habituels.

### Comment cela fonctionne

Imaginons deux lignes rigoureusement parallèles et de longueur infinie (**fig.1**). En réalité, chaque élément de ligne est assimilable à une self, en effet, une self bobinée n'est rien d'autre qu'une longueur de fil quelconque

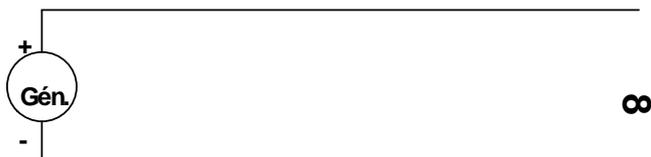
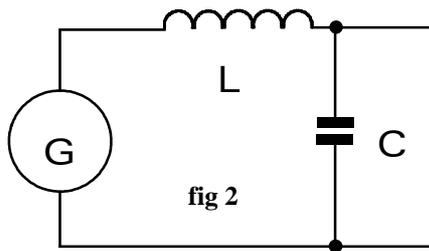


Fig 1

enroulée afin de concentrer le champ magnétique sur un minimum d'espace. Du fait de la proximité de ces deux lignes il existe également entre celles-ci une capacité non négligeable. On en arrive à une représentation de la ligne avec l'aide de symboles habituels aux schémas équivalents. Mais si **L** représente la self totale de la ligne et **C** la capacité totale de cette ligne, le schéma ne sera pas

conforme à la réalité et pourrait conduire à une erreur de raisonnement et pour cause, si nous considérons le circuit équivalent de la **figure 2**, une ligne de 10 m de long, dont la capacité serait de 80pF par mètre, ce qui pour les 10 mètres représente une capacité totale de 800pF, la réactance de cette capacité à la fréquence de 100MHz serait de **2 Ohms**. Par contre, et du fait que la capacité et les inductances sont réparties sur toute la longueur de la ligne, si je découpe mentalement cette ligne en tronçons de même longueur, je retrouve la configuration de la

**fig. 3** qui met en évidence que nous avons à faire à un ensemble de circuits **L** et **C** avec évidemment une résistance Ohmique série des conducteurs, négligeable puisque très faible par rapport à **Z** de la ligne (sauf dans un circuit de puissance) et une résistance de fuite entre conducteurs de plusieurs mégohms elle-même négligeable par rapport à **Z** de la ligne.



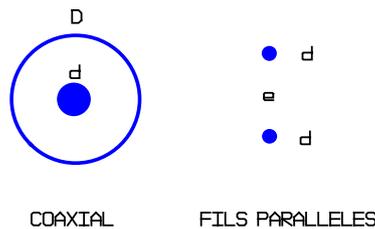
Considérons cette ligne bifilaire. A gauche se trouve un générateur délivrant un courant alternatif haute fréquence **Gén**, à la fermeture de l'interrupteur, lors de la première alternance et du fait de la présence de **C1** non chargé, le courant dans la self **L1** augmente, cette dernière emmagasine de l'énergie sous forme d'un champ magnétique et **C1** se charge. Lors du passage par zéro de l'alternance, **L1** restitue également son énergie via **C1** qui va à son tour restituer toute son énergie à la

cellule suivante et ainsi de suite. Donc chaque cellule transmettra le signal à la prochaine et cela dans notre cas à l'infinie, cela s'appelle une **ONDE PROGRESSIVE**. Étant donné que le fait de transférer de l'énergie via les éléments **L** et **C** de cellule en cellule implique une consommation apparente d'énergie, les conditions de l'apparition d'une résistance apparente ou impédance **Z** sont remplies puisque nous avons **U** et **I**. Cette impédance est fonction du diamètre de chaque conducteur et de leur espacement.

**Z reste constante** quelle que soit la fréquence du signal appliqué à cette ligne. Cela s'explique de la façon suivante : en considérant un tronçon de longueur **X**, nous avons une valeur de **L** et de **C** déterminée. Si la fréquence du signal augmente, l'équivalent de la self pris en compte par rapport à cette fréquence se trouve raccourci et de ce fait la capacité répartie dans ce tronçon plus court se trouve être plus petite, par conséquent, l'énergie emmagasinée et restituée par chaque cellule se trouve être toujours la même quelle que soit la fréquence.

### Exemple de calcul du diamètre et de l'espacement des conducteurs dans l'air

Pour une ligne bifilaire :  $Z_c = 276 \cdot \log \frac{2 \cdot d}{e}$       **d** = diamètre des lignes.      **e** = espacement.



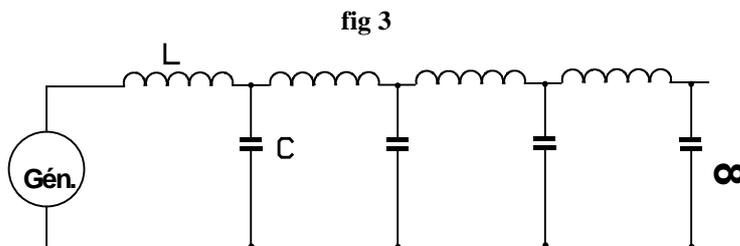
Pour un câble coaxial :  $Z_c = 138 \cdot \log \frac{D}{d}$       **d** = diamètre de l'âme.      **D** = diamètre de la tresse.

### Ligne parallèle et Coaxiale

Une antenne peut être alimentée par une liaison symétrique comprenant 2 fils parallèles ou par une liaison asymétrique du type coaxiale. Le câble coaxial semble le plus facile à utiliser pour les raisons suivantes :

- Peut être posé et fixé partout, même dans le sol ou dans une gaine même métallique.
- Insensibilité au rayonnement (si câble de bonne qualité, blindage + feuillard).
- Insensibilité aux intempéries.

A ce jour, le câble coaxial est de loin le plus utilisé et de ce fait l'industrie radioélectrique et antennes propose la majorité de leurs produits en version coaxiale **50** ou **75 Ohms** avec qq anciennes versions de matériel allemand en **60 Ohms**.



### **Z** pas équivalente à une Résistance pure, (rappel)

DONC, le schéma équivalent d'un câble coaxial (**fig.3**), se trouve n'être qu'une succession de circuit **Inductifs** en série + une partie résistive pure négligeable (en petite puissance), représentant les deux

conducteurs et d'une succession de circuit **Capacitifs** en parallèle + une partie résistive dont la valeur de plusieurs millions d'Ohms est forcément négligeable par rapport à l'impédance propre d'un câble, représentant la capacité répartie des deux conducteurs. Ces valeurs **L** et **C** déterminent l'impédance **Z** d'une ligne coaxiale HF. Une augmentation de la distance entre les 2 conducteurs provoque une augmentation de l'impédance **Z**, de même qu'une augmentation du diamètre du conducteur intérieur provoque une diminution de cette impédance.

(voir formule fig.1). La valeur de **Z** est exprimée en **Ohms**, malgré cela, cette impédance ne peut être comparée à une résistance pure et de ce fait ne peut être mesurée avec un Ohmètre conventionnel. Le mot magique utilisé pour la dénomination du transfert d'énergie dans une ligne haute fréquence est **LIGNE A ONDE PROGRESSIVE**.

## LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'UN CÂBLE COAXIAL (Tableau 4)

Les différents paramètres d'un câble coaxial sont :

- Le diamètre en **mm**
- L'impédance en **Ohms**
- Les pertes en **dB** par 100 mètres à différentes fréquences
- Le facteur **K** ou facteur de vélocité ou facteur de raccourcissement
- Facteur de blindage en **dB**
- La capacité au mètre en **pF**
- La résistance des conducteurs en **Ohms**

**Tableau 4** Différents câbles coaxiaux courants

Model	Zc	K	C/pF	Pertes au 100 m en dB à X MHz							
				3,5	7	14	21	28	50	144	432
<b>KX4</b>	50	0,66	100	1,54	2	3,1	3,7	4,4	5,1	9,14	16
<b>KX14</b>	50	0,66	100	0,4	0,6	0,84	1,17	1,67	3,0	5,4	9,4
<b>AIRCELL 7</b>	50	0,83	75	-	-	-	-	-	-	6,5	14
<b>ECOFLEX 10</b>	50	0,85	78	-	-	-	-	-	-	4,2	9,5
<b>ECOFLEX 15</b>	50	0,86	77	-	-	-	-	-	-	2,9	6,6

## LE PROBLÈME DE L'ADAPTATION

Avec un câble coaxial il est important que l'adaptation d'impédance soit optimale surtout en utilisation sur un circuit de puissance (ensemble TX / RELAIS / CÂBLE COAX / ANTENNE). En clair cela sous-entend que tous les éléments du circuit ont la même impédance. Le **tableau 5** représente les pertes de transmission par rapport à l'adaptation du circuit (TOS / ROS).

- **ROS** = Rapport d'ondes stationnaires = ou > que 1.

Le signal réfléchi est toujours plus faible que le signal direct, ne serait-ce qu'à cause des pertes dans la ligne. Le signal réfléchi est parfois en phase avec le signal direct et parfois en opposition de phase. Donc l'amplitude de l'onde stationnaire issue de la combinaison signal direct / signal réfléchi, vaut au maximum la somme de ces deux signaux et au minimum la différence de ces deux signaux. Si le signal réfléchi = 0, le ROS = 1.

- **TOS** = Taux d'onde stationnaire exprimé en %.

Le taux d'onde stationnaire est le rapport qui existe entre la puissance fournie par l'émetteur à l'ensemble du circuit et la puissance réfléchie par cet ensemble. Comme tous les taux, le TOS s'exprime en nombre sans unité ou en % et est toujours inférieure à 100 %. Notons qu'il existe un autre TOS, en réception, quand l'antenne fournit une puissance (faible) à l'ensemble ligne/récepteur. Ce TOS réception dépend de l'adaptation du premier étage du récepteur et est en général inconnu car plus difficilement mesurable si ce n'est avec des moyens techniques que l'OM même très bon technicien possède rarement. Cette mauvaise adaptation peut conduire à une dégradation importante de la réception.

**Tableau 5**

SWR	TOS	P. RÉFLÉCHI
1,02	0,99 %	0,01 %
1,07	3,38	0,11
1,15	6,98	0,49
1,20	9,09	0,83
1,40	16,67	2,78
1,80	28,57	8,16
2,00	33,33	11,10
2,40	41,18	17,0
2,80	47,37	22,4
3,50	55,56	30,9
4,00	60,00	36,0
6,00	71,43	51,0
8,00	77,78	60,5
10,00	81,82	66,9

## Mesure du TOS / ROS

Afin de mesurer le TOS ou le ROS, nous utilisons un TOS ou ROS – mètre.

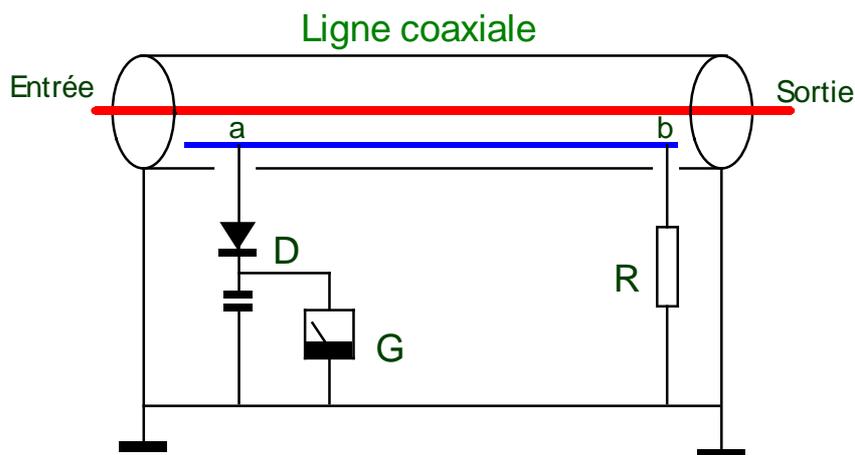


Fig 4

### Dispositif de mesure du TOS / ROS

L'appareil se compose d'une part d'une **ligne coaxiale**. Celle-ci doit impérativement être plus courte que la longueur d'onde la plus courte à mesurer. D'autre part un circuit de mesure **a-b-d-g-r**.

### Fonctionnement en DIRECT (fig 5)

Si nous branchons une source RF à l'entrée du système de mesure de la figure 4, du fait que la longueur de la ligne coaxiale se trouve être courte par rapport à la longueur d'onde, lors du passage par un maximum positif de la sinusoïde, cette alternance positive va engendrer un transfert d'énergie par capacité dans la ligne **a-b**.

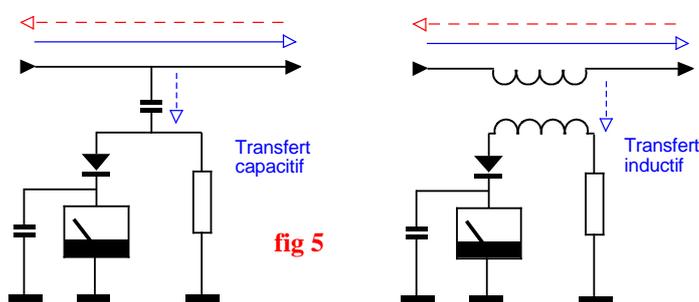


fig 5

L'ensemble de mesure étant positif, un courant circulera d'une part du point **a** via **D** puis **G** vers la masse en faisant dévier le **Galvanomètre** et d'autre part du point **b** via la résistance **R** vers la masse. En même temps, le passage de cette alternance positive dans la ligne coaxiale génère un courant induit de sens inverse non seulement dans la ligne mais également dans **b** vers **a**. du fait du sens opposé de ce courant, celui-ci

circulera également du point **a** via **D** puis **G** vers la masse en s'ajoutant au courant précédent.

Par contre, lors du passage par un maximum négatif de la sinusoïde, cette alternance négative va bien engendrer un transfert d'énergie par capacité via la ligne **a-b** dans la résistance **R** vers la masse mais par contre, du fait de la polarité de la diode **D**, aucun courant ne circulera via **G** vers la masse. En même temps, le courant induit simultanément dans la ligne coaxiale et dans **a-b**, ce courant induit tendra cette fois à prolonger l'effet du courant inducteur. Du fait de son sens de **a** vers **b** et de la polarité de la diode, aucun courant ne circulera via **G** vers la masse.

### Fonctionnement en RÉFLÉCHI

Si nous branchons une source RF à l'entrée du système de mesure et si en sortie nous laissons la ligne ouverte, que se passera-t-il ?

Considérons l'alternance positive du signal réfléchi. Cette alternance positive va engendrer un transfert d'énergie par capacité dans la ligne **a-b**. L'ensemble de mesure étant positif, un courant circulera d'une part du point **a** via **D** puis **G** vers la masse et d'autre part du point **b** via la résistance **R** vers la masse. Mais, par contre, le courant induit simultanément dans la ligne coaxiale et la ligne **a-b** dirigé en sens inverse de **a** vers **b**, se refermera bien vers la masse via **R** mais sera bloqué par la diode **D**. si la construction du système a été correcte, ce courant induit annulera le courant capacitif et de ce fait il n'y aura aucune déviation du galvanomètre.

Il reste un dernier cas à prendre en compte, c'est celui de l'alternance négative du signal réfléchi. Le transfert par capacité de l'énergie négative sera bloqué par la diode **D**. Quant au courant induit dans **a-b**, ce courant allant de **b** vers **a** et de part les caractéristiques du système, les deux courants s'annuleront.

Donc pour mesurer le signal réfléchi, il suffit d'inverser le branchement du système ou de coupler une deuxième ligne **a-b** à la ligne coaxiale en sens inverse avec un deuxième galvanomètre ou plus simplement de n'utiliser qu'un seul galvanomètre avec une commutation de l'un à l'autre des deux systèmes de mesure. *FIAEQ 11/2006*