

Comment ça marche ?

Les lignes HF

8 - Réflexions

Par le radio-club F6KRK

Nous avons vu dans les précédents "comment ça marche" les potentiels, les courants et leurs relations avec le champ électromagnétique pour aboutir aux notions de constantes linéiques. Puis nous avons abordé les ondes complexes et le ROS. Toutes ces notions sont liées au fonctionnement de la ligne en mode permanent. Nous allons maintenant voir ce qui se passe en mode transitoire.

Introduction du mode transitoire.

L'étude fondamentale des lignes est faite à partir des équations de Maxwell qui supposent un signal sinusoïdal invariable, c'est-à-dire qui ne change pas de caractéristiques dans le temps, donc sans commencement ni fin. Or un tel signal, non seulement n'existe pas, mais n'a aucun intérêt car il ne transmet aucune information. Celle-ci doit être "médiatisée" par une modulation du signal HF ⁽¹⁾. Si le temps d'observation (de mesure) du signal est inférieur et **inclus** dans un état stable du signal modulé au **point de mesure**, on considère un mode permanent ou stationnaire pur ⁽²⁾. Si le temps d'observation est plus grand que l'état stable, on considère un mode transitoire. Exemple sur la figure 1 avec un signal télégraphique ("point" du code Morse).

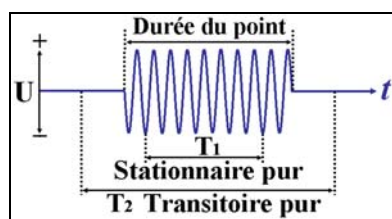


Figure 1: Le signal est stationnaire ou transitoire selon la durée d'observation

Si une charge résistive pure est connectée directement à la source, la courbe enveloppe de la puissance dissipée dans la charge sera exactement celle de la puissance fournie par la source. Si nous intercalons une ligne entre les deux, cela ne sera plus vrai, sauf si la charge est égale à l'impédance caractéristique de la ligne.

Si T_1 est inférieur à la durée du point moins deux fois le temps de propagation dans la ligne, nous sommes en régime stationnaire pur, et nous avons déjà analysé le comportement du système.

Propagation en mode transitoire pur.

Voyons maintenant un cas de régime transitoire avec une durée de point nettement inférieure au temps de transmission dans une ligne sans pertes. Examinons la figure 2.

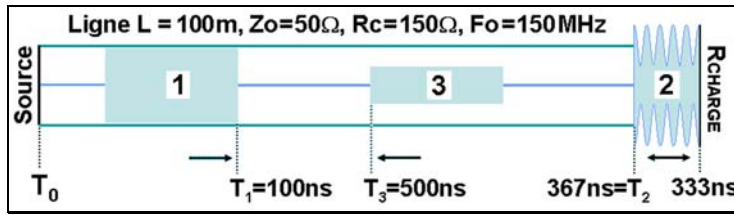


Figure 2 : Réflexion d'un signal impulsionnel quand la charge est désadaptée

Données complémentaires à la figure 2 :

- Durée du signal = 66,66ns (télégraphie très rapide)
- T_n = début du signal à différents instants
- [1], [2] et [3] = aires à l'intérieur desquelles se trouve le signal (tension) selon sa phase initiale au temps T_0 et selon l'instant où il a été "photographié".
- Désadaptation de la charge correspondant à un ROS 3 (résistance pure).

Pour comprendre le système, nous nous servirons de l'approche comportementale de la formation des ondes stationnaires décrite dans un précédent "Comment ça marche" (5 - Les ondes dans une ligne).

En [1], nous avons une onde progressive "active" vers la charge. En [2], nous avons une onde complexe qui est la superposition d'une onde "active" vers la charge et d'une onde "réactive" vers la source et seule une partie (75%) de l'énergie transportée par l'onde aller est dissipée dans la charge. En [3], nous avons de nouveau une onde "active" progressive vers la source transportant 25% de l'énergie initiale. Elle est redevenue active, car elle ne rencontre plus aucune opposition.

Voyons maintenant ce que devient l'onde quand elle arrive à la source. Si cette dernière a une impédance interne (résistance pure) égale à l'impédance caractéristique de la ligne, l'énergie va se dissiper dans la source. Mais si c'est un émetteur, c'est rarement le cas pour des raisons de rendement ^[1]. Admettons que la source soit un interrupteur électronique parfait. Alors l'impédance qu'elle présente à la ligne en dehors de la génération de l'impulsion est infinie (ROS ∞). Elle oppose donc une réaction totale à l'onde de retour et il va se former un régime stationnaire, comme en [2]. Puis l'onde va "s'échapper" du côté où "la voie est libre" et c'est reparti pour un aller et retour. A chaque fois, l'énergie "progressive" est diminuée de l'énergie dissipée dans la charge et le système va s'amortir en un temps d'autant plus long que le ROS côté charge est élevé. En pratique, l'amortissement est plus rapide à cause des pertes dans la ligne qui sévissent à chaque trajet ⁽⁴⁾.

Mode transitoire mixte

La "CW" est une modulation d'amplitude qui occupe beaucoup de bande passante ramenée au débit d'information. On augmente le débit en codant l'amplitude d'une manière continue sur plusieurs niveaux appelés "symboles". Exemple sur la figure 3 d'une modulation "4ASK" qui contient deux bits d'information par symbole.

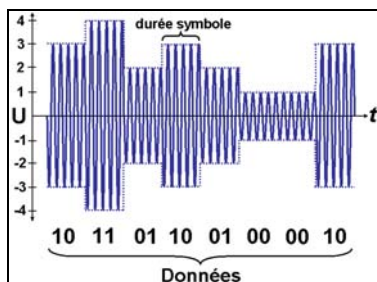


Figure 3. Modulation 4ASK

Maintenant, imaginons un signal composé de plusieurs fois la forme d'onde de la figure 3. Faisons lui traverser une ligne d'une longueur correspondant à un temps de transit de 7,2 symboles avec un ROS de 3 au niveau de la charge. Photographions la ligne au bout d'un temps de 14,4 symboles. A cet instant, l'onde réactive arrive tout juste à la source. Le signal à l'intérieur de la ligne résulte de la combinaison du signal actuel avec une inversion temporelle du signal précédent affecté d'un coefficient de 0,5 pour un ROS de 3. Avec une forme d'onde composée d'une suite de symboles différents, le ROS apparent dans la ligne et au niveau de la source va être différent de ROS 3 ⁽⁵⁾. Si l'impédance interne de la source n'est pas adaptée à celle de la ligne, il va y avoir une autre réflexion et une partie du signal de retour va repartir vers la charge en s'ajoutant au signal actuel. Cette opération ne va pas forcément bien se passer au niveau de l'ampli de sortie de l'émetteur, car cela peut provoquer de la distorsion (écrêtage) et de l'intermodulation. Le signal à l'intérieur de la ligne devient indescriptible. Il n'y a plus d'ondes stationnaires et la mesure du ROS n'a plus aucune signification. Le calcul du signal en un point de la ligne (U,I et φ) qui résulte de la combinaison de signaux multiples dont les amplitudes et les phases relatives dépendent du passé, ne pourrait se faire qu'avec un super ordinateur. Le signal rayonné va contenir des résidus des symboles vieux de 2, 4, 8... fois la durée de propagation dans la ligne (niveaux proportionnels au ROS et allant en décroissant). On appelle ce phénomène "recouvrement inter symboles". On en vient alors à édicter les règles suivantes :

- Si la charge est adaptée ($Z_c=Z_0$), pas de contrainte sur l'impédance interne de l'émetteur et sur la longueur de la ligne.
- Si la charge est désadaptée, de même que la source, alors la longueur de la ligne est limitée de façon que son retard soit inférieur au 20^{ème} de symbole (en admettant un recouvrement maximum de 10% des symboles consécutifs) ⁽⁶⁾. Ainsi pour une modulation à 1 MBauds, on commence à dégrader le signal à partir d'une longueur électrique de 15 m, soit 10 m de câble RG213.
- Si la charge est désadaptée et qu'une longue ligne apporte un retard plus grand que le 20^{ème} de symbole, il y a obligation d'avoir une source adaptée, d'autant plus que le ROS dans la ligne est élevé.

Dans la pratique, le phénomène est atténué grâce aux pertes dans le câble coaxial (!). Nous avons vu que les pertes avaient pour effet de diminuer le ROS ramené à la source. En conséquence, il diminue aussi la réflexion. S'il n'y a pas assez de pertes, on peut même en créer en insérant un atténuateur à la sortie de l'émetteur. Il peut être plus intéressant de dissiper de la puissance dans une résistance que dans l'émetteur lui-même si on l'obligeait à avoir une impédance interne adaptée ⁽⁷⁾, d'autant que, plus la bande est large, et plus c'est difficile, surtout en VHF. Mais ce sont des soucis de professionnels. Avec les modulations en bande étroite des radioamateurs, pas de problème de longueur de câble coaxial ⁽⁸⁾.

Enfin, il faut préciser que ce qui vaut pour la modulation numérique ASK vaut aussi pour toutes les autres modulations numériques (FSK, PSK, QAM) et analogiques (AM et FM). L'ASK a été choisie, car plus facile à visualiser sur un graphique.

Dans un prochain "Comment ça marche", nous verrons comment tout cela évolue quand la charge est réactive, après avoir étudié la ligne comme transformateur d'impédance.

La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Bibliographie.

[1] "Rendement et adaptation", Radio-REF, octobre 2014.

Cet article ainsi que les précédents "Comment ça marche ?" sont également consultables et téléchargeables sur le site de F6KRK : "www.blog.f6krk.org", catégories "Articles membres" puis "F5NB" et "Lignes et ROS-mètre", ou catégorie "Bulletins et Gazettes" puis "Comment ça marche ?".

Notes :

- 1) *Définition physique de la modulation : "Variation dans le temps des caractéristiques d'un phénomène (amplitude, fréquence), en fonction des valeurs caractéristiques d'un autre phénomène.*
- 2) *Donc qui correspond aux conditions des équations de Maxwell. C'est un tel signal que nous utilisons (tune) pour faire des mesures avec un simple ROS-mètre.*
- 3) *Il s'agit d'une résistance pure, et pas de l'impédance résistive pure d'un circuit réactif à la résonance. Nous verrons ce cas dans le prochain "Comment ça marche".*
- 4) *Ce mode de fonctionnement est utilisé par les réflectomètres avec une source ayant une impédance nominale égale à celle de la ligne, pour ne pas fausser la mesure à cause des réflexions multiples.*
- 5) *On rappelle que le ROS n'a une signification physique que pour un signal stationnaire (invariable).*
- 6) *Une solution consiste à réduire au maximum le débit de la modulation en augmentant le nombre d'états, par exemple avec du 256 QAM qui code 8 bits par Baud. On peut aussi utiliser des multi porteuses comme avec l'OFDM (TNT). Si nous ne sommes pas contraints par la longueur des lignes, nous pouvons l'être par la propagation vers des mobiles qui engendre des réflexions par multi trajets créant les mêmes problèmes de recouvrement inter symboles. Plus de détails dans des futurs "Comment ça marche" sur les radio modems et les modulations numériques.*
- 7) *On rappelle qu'un ampli avec impédance interne adaptée (sans contre-réaction) a un rendement maxi de 50%. On obtient la même chose avec une résistance externe, sans problème de bande passante.*
- 8) *Mais nous pourrions en avoir avec un procédé de TV-A numérique.*