

Comment ça marche ?

Les lignes HF

4 - Constantes linéiques

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 dans une ligne HF. Puis nous avons abordé les notions de "constantes linéiques" pour un fil unique. Nous allons maintenant voir ce qu'elles deviennent avec une ligne.

Lignes HF, définitions

On entend par "ligne HF" un système composé de (voir figure 1) :

- soit deux conducteurs linéaires disposés parallèlement (ligne bifilaire),
- soit un conducteur linéaire disposé parallèlement à une surface conductrice infinie (micro strip) ⁽¹⁾,
- soit deux conducteurs linéaires disposés l'un dans l'autre (ligne coaxiale).

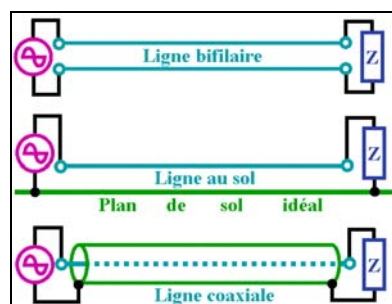


Figure 1 : Les lignes HF

Dans tous les cas, l'espacement est nettement inférieur à la longueur d'onde (d'autant moins pour deux fils parallèles). Ces systèmes sont destinés en principe au transport d'énergie entre une source et une charge (feeder) mais ils ont aussi d'autres applications (circuits résonants, adaptations). Dans tous les cas, on admettra qu'ils n'ont pas de pertes par rayonnement. On étudiera une ligne HF bifilaire dont chaque point est le siège de courants égaux et de signes opposés. Les relations que nous développerons seront applicables aux autres lignes, sauf mentions particulières.

Etude de la propagation dans les lignes

Considérant une f.é.m. sinusoïdale et une ligne ayant une longueur non négligeable devant la longueur d'onde ($\lambda = v/F$), à un instant donné, la tension et le courant seront différents d'un point à un autre. En HF on peut, en utilisant les notions de constantes linéiques que nous avons vues dans le précédent "Comment ça marche", étudier la propagation (c'est-à-dire les variations de I et de U en fonction de l'abscisse x et du temps t) sur les lignes.

Inductance mutuelle et coefficients linéiques.

Nous avons vu précédemment le phénomène de self induction qui apparaît autour d'un fil, siège d'un courant HF. Quand nous disposons deux fils proches en parallèle, ils exercent l'un sur l'autre une induction mutuelle, d'autant plus grande que l'écartement d est faible. Ce phénomène est caractérisé par une inductance mutuelle linéique $M_1 = -0,92 \times \text{Log}(L/d)$ (signe moins car courants contraires)

L'inductance linéique de la ligne L'_1 est alors égale à : $2 L_1 + M_1$ ($L_1 =$ impédance linéique d'un fil $= 0,46 \times \text{Log}(L/r)$), soit :

$L'_1 = 0,92 \times [\text{Log}(L/r) - \text{Log}(L/d)] = 0,92 \times \text{Log}(d/r)$ (augmente avec l'écartement).

Pour la capacité linéique de la ligne C'_1 , tous les facteurs étant inversés, on aboutit à l'expression :

$C'_1 = 12 / \text{Log}(d/r)$ (diminue avec l'écartement).

Equations de propagation.

Soit la ligne de la figure 2.

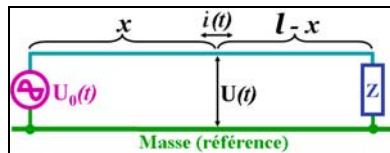


Figure 2 : Ligne électrique

Désignons par L_1 , C_1 , R_1 , G_1 , respectivement la self inductance, la capacité, la résistance et la perdite de l'unité de longueur de cette ligne.

La variation de tension quand on se déplace de l'unité de longueur est égale à la somme des variations de tension dues à L_1 et R_1 . Nous obtenons :

$$\frac{\delta U}{\delta x} = -L_1 \frac{\delta i}{\delta t} - R_1 i$$

La variation d'intensité du courant quand on se déplace de l'unité de longueur est égale au courant s'écoulant par capacité et par défaut d'isolement. Nous obtenons :

$$\frac{\delta i}{\delta x} = -C_1 \frac{\delta U}{\delta t} - G_1 U$$

En partant de ces expressions et en considérant un régime sinusoïdal, on obtient les équations différentielles suivantes :

$$\frac{\delta^2 U}{\delta x^2} - \gamma^2 U = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\delta^2 i}{\delta x^2} - \gamma^2 i = 0$$

" γ " est appelé "facteur linéique de transfert". Il est égal à :

$$\gamma = \beta + j\alpha = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)}$$

" β " est appelé "facteur linéique d'affaiblissement. Il est égal à (faibles pertes) :

$$\beta = \frac{R_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} + \frac{G_1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

" α " est appelé "facteur linéique de déphasage". Il est égal à $2\pi / \lambda_1$ ($\lambda_1 =$ longueur d'onde dans la ligne).

Impédance caractéristique.

Elle est égale à U_{\max} / I_{\max} et U_{\min} / I_{\min} si U et I ne sont pas constants le long de la ligne. On obtient :

$$Z_C = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ (sans pertes)}$$

Supposons que la ligne soit de longueur infinie et de pertes négligeables. Alors l'impédance caractéristique est l'impédance de charge que la ligne présente à la source (résistance pure) ⁽²⁾. U et I sont constants tout le long de la ligne et celle-ci est parcourue par une onde dite "progressive". Si la ligne a de faibles pertes, U et I diminuent lentement, sans changer l'impédance qu'elle présente à la source ⁽³⁾.

Mais une ligne a toujours une longueur finie car elle est prévue pour transporter de l'énergie vers une charge. Pour que le régime de fonctionnement de la ligne ne change pas, il suffit qu'elle soit refermée sur une charge égale à son impédance caractéristique. Elle se comporte alors vis-à-vis de la source comme si elle était de longueur infinie.

Expressions du courant et de la tension

Si U_0 et i_0 sont les valeurs de U et i à l'origine de la ligne, on a (cf. Fig.2) :

$$\begin{cases} U = U_0 \operatorname{ch}(\gamma x) - Z_C i_0 \operatorname{sh}(\gamma x) \\ i = i_0 \operatorname{ch}(\gamma x) - \frac{U_0}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma x) \end{cases}$$

(*ch* et *sh* = *cosinus* et *sinus hyperboliques*)

Dans le cas où les pertes dans une ligne sont négligeables, ces relations se simplifient et deviennent :

$$\begin{cases} U = U_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda} - j Z_C i_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \\ i = i_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda} - j \frac{U_0}{Z_C} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \end{cases}$$

Ce sont les équations des télégraphistes, très utilisées pour l'étude des antennes et des lignes courtes.

Valeurs de L_1 , C_1 et Z_C pour quelques lignes

On les obtient avec les formules de la figure 3.

Nature de la ligne	L_1 $\mu\text{H/m}$	C_1 pF/m	Z_C ohms
Fil isolé dans l'espace (rayon r , longueur L)	$0,46 \operatorname{Log} \frac{L}{r}$	$\frac{24}{\operatorname{Log}(L/r)}$	$138 \operatorname{Log} \frac{L}{r}$
Fil Hor. (rayon r) à haut. H du plan de sol	$0,46 \operatorname{Log} \frac{2H}{r}$	$\frac{24}{\operatorname{Log}(2H/r)}$	$138 \operatorname{Log} \frac{2H}{r}$
Ligne 2 fils parallèles courants = et opposés (rayon r , écartement d)	$0,92 \operatorname{Log} \frac{d}{r}$	$\frac{12}{\operatorname{Log}(d/r)}$	$276 \operatorname{Log} \frac{d}{r}$
Ligne coaxiale (rayons a et b)	$0,46 \operatorname{Log} \frac{a}{b}$	$\frac{24}{\operatorname{Log}(a/b)}$	$138 \operatorname{Log} \frac{b}{a}$

Figure 3 : Selfs, capacités et impédances linéiques pour quelques lignes

A partir de ces formules, on construit l'abaque de la figure 4.

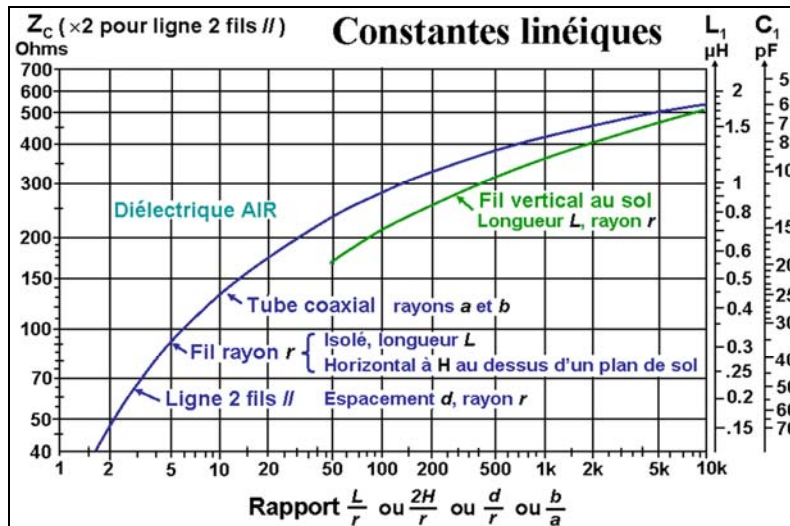


Figure 4 : Constantes linéiques des principales lignes

Des courbes de l'abaque, on en déduit principalement que :

- L'impédance d'une ligne bifilaire est imaginaire entre 300 Ω et 600 Ω .
- L'impédance d'une ligne coaxiale est imaginaire entre 30 Ω et 150 Ω .
- L'impédance d'un fil horizontal à plus de 10m au dessus du sol tend vers 600 Ω .

Dans le prochain "Comment ça marche" nous regarderons les différentes ondes évoquées avec les lignes.

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] Précédents Radio-REF ou "www.blog.f6krk.org", catégorie "Bulletins et Gazettes", "Comment ça marche ?".

Notes :

- 1) Nous avons déjà vu dans les "Comment ça marche" consacrés à la théorie des images ^[1] que le système était équivalent à une ligne bifilaire d'écartement $2H$. On ne parlera pas des lignes formées d'un fil situé entre deux plans conducteurs infinis (strip-line).
- 2) I est en phase avec U car le déphasage amené par la réactance inductive est compensé par celui amené par la réactance capacitive.
- 3) C'est ainsi que l'on peut mesurer l'impédance d'un rouleau de câble coaxial inconnu en le connectant à un VNA. Nous y reviendrons.