



Câble coaxial

L'objectif de ce TP est d'étudier la propagation du signal dans un câble coaxial. En étudiant la vitesse de propagation du signal, ainsi que l'éventuelle réflexion du signal en bout de ligne, on cherchera à remonter aux caractéristiques du modèle utilisé (inductance linéique, capacité linéique) ainsi qu'à ses limites.

I Étude théorique

Les câbles coaxiaux sont utilisés comme moyen de transmission d'informations. Ils sont conçus pour transmettre des signaux sans trop d'atténuation et pour assurer une protection contre les perturbations extérieures. On les utilise notamment pour les câbles d'antenne de télévision, pour transmettre des signaux audio-numériques, ainsi que pour des interconnexions dans les réseaux informatiques.

I.1 Caractéristiques linéiques

Un câble coaxial est constitué de deux très bons conducteurs de même longueur et de même axe Ox : un cylindre plein (appelé l'âme du conducteur, de rayon R_1) et une tresse cylindrique d'épaisseur faible (de rayon R_2), séparés par un diélectrique (isolant). Le conducteur central sert à amener un courant électrique et la tresse extérieure en assure le retour (jouant le rôle de masse).

La longueur de câble utilisée (une centaine de mètres) fait qu'on ne peut plus négliger le temps de propagation du signal le long de la ligne : on adopte alors un modèle dit à constantes réparties, où le câble est caractérisé par sa capacité linéique Γ , son inductance linéique Λ , sa résistance linéique ρ et sa conductance linéique de fuite σ . La portion de câble coaxial de longueur dx entre x et $x + dx$ est équivalente au quadripôle d'inductance Λdx en série avec la résistance ρdx entre l'entrée et la sortie. Entre les deux bornes de sortie, il y a la capacité Γdx et la résistance de fuite de conductance σdx .



Pour le câble de 50Ω , le fabricant donne $2R_1 = 0,7 \text{ mm}$ et $2R_2 = 2,5 \text{ mm}$.

L'isolant est du polyéthylène, de permittivité relative $\epsilon_r = 2,25$.

Dans le cas d'un câble coaxial cylindrique de longueur infinie, on montre que la capacité linéique et l'inductance linéique sont données par :

$$\Gamma = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad \text{et} \quad \Lambda = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ et $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

Déterminer les valeurs théoriques de Γ et Λ .

I.2 Équation des télégraphistes

1. Pour la ligne à constantes réparties **en tenant compte des pertes**, représenter la quadripôle équivalent entre x et $x + dx$ en faisant apparaître $u(x, t)$, $i(x, t)$, $u(x + dx, t)$ et $i(x + dx, t)$.
2. Établir l'équation aux dérivées partielles régissant la tension $u(x, t)$ le long de la ligne (Équation des télégraphistes).
3. À quelle équation se réduit l'équation des télégraphistes si on néglige les pertes ?

II Étude expérimentale

II.1 Évaluation des pertes

Comment évaluer à l'ohmmètre la résistance par unité de longueur et la conductance de fuite par unité de longueur ?

Mesurer et conclure.

II.2 Adaptation d'impédance du générateur

Le constructeur indique une impédance de ligne de 75Ω pour le câble TV/vidéo et une impédance de ligne de 50Ω pour le câble instrumentation/informatique. Cette valeur peut-elle être rapprochée des valeurs statiques mesurées précédemment ?

Noter la valeur de l'impédance de sortie du GBF ; en déduire la résistance à placer en série avec le GBF pour obtenir un générateur de Thévenin de résistance interne égale à l'impédance de ligne (adaptation d'impédance).

Dans la suite, sauf indication contraire, on utilisera le générateur adapté à la ligne.

II.3 Étude de la propagation d'une onde progressive harmonique

La ligne a une longueur $\ell = (100 \pm 3)$ m. On place en bout de ligne une résistance de 75Ω pour le câble TV (resp. 50Ω pour le câble instrumentation).

Vérifier que, pour des fréquences de l'ordre du kHz, les tensions à l'entrée et la sortie de la ligne sont en phase. Justifier ceci par une évaluation d'ordres de grandeur.

Vérifier que, pour des fréquences de l'ordre du MHz, le déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie dépend fortement de la fréquence. Chercher une fréquence f_0 pour laquelle v_e et v_s sont en phase.

Cette fréquence f_0 est-elle unique ? Si V désigne la célérité de propagation de l'onde de tension le long de la ligne, quelle est alors la relation entre f_0, V et ℓ ? Peut-on en déduire la vitesse de propagation V dans la ligne ?

Quel doit être le déphasage entre v_e et v_s pour $f \in \left\{ \frac{f_0}{3}, \frac{f_0}{2}, \frac{2f_0}{3}, \frac{4f_0}{3}, \frac{3f_0}{2} \right\}$? Vérifier expérimentalement.

II.4 Réflexion d'un échelon en bout de ligne

a Réflexion sur une extrémité de ligne ouverte

On ôte la résistance en bout de ligne ; quelle est la condition imposée en $x = \ell$?

On envoie cette fois des crêteaux périodiques en entrée ; on choisit la fréquence des crêteaux de telle sorte que :

- le front montant du crêteau ait eu le temps de se propager de 0 à ℓ , de se réfléchir en bout de ligne et de revenir en $x = 0$ avant qu'un autre front soit envoyé à l'entrée.
- la durée de l'aller-retour d'un front soit mesurable aisément à l'oscillo.

Quelle gamme de fréquences convient ?

Décrire le signal observé en $x = 0$ et interpréter.

Mesurer la vitesse de propagation du front montant ; comparer au résultat obtenu dans l'étude de la propagation de l'onde harmonique.

b Réflexion sur une extrémité de ligne en court-circuit

On met l'extrémité de la ligne en court-circuit ; quelle est la condition imposée en $x = \ell$?

Reprendre l'expérience précédente ; décrire le signal observé en $x = 0$ et interpréter. Comparer avec la situation précédente.

c Résistance itérative en bout de ligne

Replacer la résistance de 75Ω en $x = \ell$; que peut-on dire du front réfléchi ?

Donner une interprétation théorique.

II.5 Réalisation d'ondes stationnaires

Peut-on avoir un nœud de tension en $x = 0$ ou en $x = \ell$?

Peut-on avoir un nœud d'intensité en $x = 0$ ou en $x = \ell$?

Déterminer toutes les situations d'ondes stationnaires stables que l'on peut réaliser avec une bobine de 100 m, puis éventuellement avec deux ou trois bobines, compte tenu de la gamme des fréquences disponibles.

Mesurer expérimentalement les fréquences correspondantes et vérifier la cohérence de la valeur de la vitesse de propagation obtenue avec les résultats précédents.

Donner la meilleure évaluation possible de la vitesse de propagation dans la ligne et estimer l'incertitude sur cette évaluation.

Déterminer l'inductance propre linéique et la capacité linéique. En déduire la constante diélectrique de l'isolant séparant l'âme et la gaine.