

TP 23: Lignes de transmissions d'un signal électrique

Réponse fréquentielle

Capacités exigibles :

- Savoir définir l'impédance caractéristique d'une ligne comme étant l'impédance à placer en bout de ligne permettant de l'adapter
- Savoir identifier à partir d'un chronogramme du signal en entrée de la ligne, si elle est adaptée, en court-circuit ou circuit ouvert
- Savoir localiser un défaut ou déterminer la longueur d'une ligne de transmission à partir d'un chronogramme du signal en entrée d'une ligne non adaptée

Capacités expérimentales :

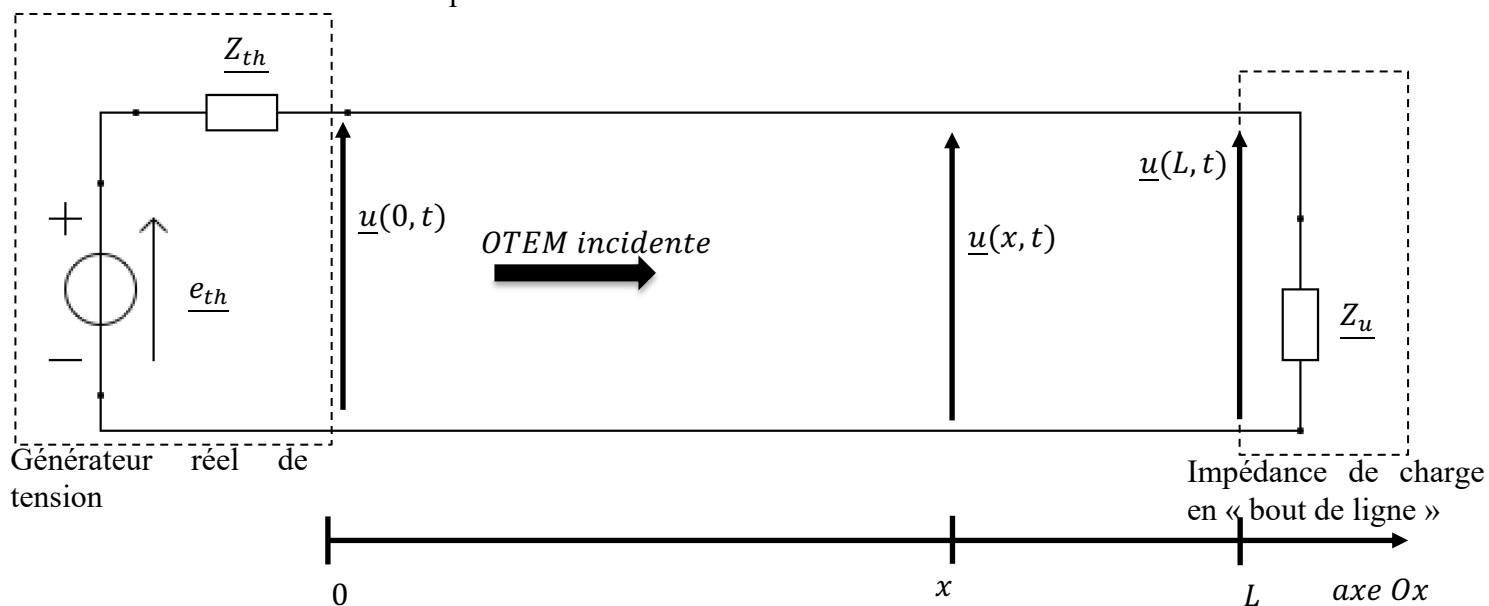
- *Proposer et réaliser un protocole pour déterminer les caractéristiques d'une ligne de transmission (impédance caractéristique, coefficient de vélocité et atténuation linéique)*

Situation problème :

On étudie ici la transmission d'une onde électromagnétique plane (transverse) progressive harmonique de fréquence f (nommée onde incidente) au sein d'un câble coaxial. Le câble est supposé sans pertes (pas d'absorption de l'onde car absence de résistance interne). La permittivité relative au vide ϵ_r de l'isolant (ou diélectrique) présent dans le câble est : $\epsilon_r = 2,50$. L'impédance caractéristique du câble est $Z_C = 75 \Omega$. La longueur de ce câble est $L = 19,0 \text{ m}$.

Dans ce TP, on cherche à déterminer les conditions à respecter afin que le signal en entrée du câble $\underline{u}(0, t)$ soit reçu aux bornes de la charge en bout de ligne. Le signal en sortie du câble est noté $\underline{u}(L, t)$

On modélise la situation étudiée par le schéma suivant :



I. Étude des caractéristiques du câble coaxial :

La propagation d'un signal électrique d'un point à un autre du câble (appelé « ligne de transmission ») n'est pas instantanée car elle correspond à la propagation d'une onde électromagnétique à une célérité qui dépend du milieu de propagation. On rappelle que l'on note $\underline{u}(0, t)$ le signal en entrée du câble et $\underline{u}(L, t)$ le signal en sortie du câble.

1. A l'aide de la l'introduction du paragraphe II du chapitre 12, calculer la valeur théorique de la célérité v des ondes TEM dans ce câble.

2. Sachant que la fréquence du signal sinusoïdal alternatif en entrée du câble est $f = 15,00 \text{ MHz}$, calculer la longueur d'onde λ de l'onde se propageant dans le câble. A l'aide de l'annexe 01 du précédent TP, conclure en déterminant si l'on doit tenir compte des phénomènes de propagation dans notre étude (en justifiant votre réponse).
3. Calculer la valeur de la durée de propagation Δt d'une variation de ce signal, pour se propager de l'entrée à la sortie de ce câble. On exprimera le résultat en nanoseconde.

APPEL 1 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

II. Coefficient de réflexion :

A. En bout de ligne :

4. A l'aide de votre annexe 01 du précédent TP, calculer la valeur du coefficient de réflexion en amplitude $\rho(L)$, en $x = L$ pour **chaque cas ci-dessous** :
 - la ligne de transmission est ouverte en bout de ligne
 - l'impédance de la charge en bout de ligne est $Z_u = 75 \Omega$
 - la ligne est court-circuitée en bout de ligne
5. Parmi les 3 cas cités ci-dessus, donner celui ou ceux permettant d'aboutir à l'apparition d'ondes stationnaires dans le câble.
6. Parmi les 3 cas cités ci-dessus, donner celui ou ceux permettant d'obtenir une adaptation d'impédance (on parle aussi de « ligne adaptée »).

APPEL 2 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

Le câble coaxial peut donc être modélisé comme un **milieu infini**, avec des ondes qui se réfléchissent uniquement en bout de ligne.

III. Étude de la réponse fréquentielle dans des cas « extrêmes » :

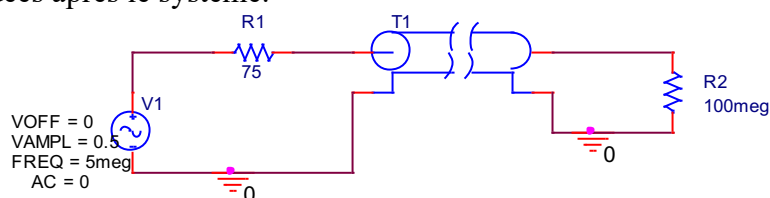
A. Bout de ligne en circuit ouvert :


La ligne de transmission étudiée est en circuit ouvert en bout de ligne (en sortie) : le coefficient de réflexion en amplitude $\rho(L)$ vaut $\rho(L) = +1$. La fréquence du signal sinusoïdal alternatif en entrée du câble est $f = 5,00 \text{ MHz}$, d'amplitude $E = 0,500 \text{ V}$

Représentations temporelles des signaux d'entrée et de sortie :

Utiliser la fiche méthode expérimentale 04 (concernant le logiciel Orcad 17) pour la suite du TP. Ne pas l'utiliser serait une grosse erreur (souvenez de Justin).

Ouvrir Capture CIS Lite (dossier Cadence Release 17 puis Orcad CIS Lite) puis créer le système suivant à l'aide des consignes situées après le système.




Les éléments constituant le système sont disponibles sous l'icône , sous les noms suivants (à taper dans le champ « Part ») :


- la source « V1 » est nommée VSIN : double cliquer sur VOFF, VAMPL etc pour saisir les valeurs souhaitées

- la ligne de transmission est nommée T
- les conducteurs ohmiques sont nommés R : double cliquer sur la valeur affichée par défaut (1k) pour y entrer la valeur souhaitée. On donne à R_2 la valeur $100\text{ M}\Omega$ pour simuler au mieux le circuit ouvert en bout de ligne (le logiciel Orcad n'accepte pas l'infini comme valeur – ça se comprend).

Si en saisissant les noms dans le champ « Part », rien ne s'affiche dans le champ « Part List », appelez l'enseignant en disant « Monsieur, svp, je veux devenir aussi talentueux que Beyoncé ». Il viendra vous secourir.

A l'aide d'un clic droit sur l'élément placé, vous pouvez faire tourner un élément d'un angle de 90° à l'aide de la fonction « Rotate ».

Utiliser la fonction Zoom pour placer les fils de connexion disponibles sous l'icône 


Sous l'icône , vous trouverez la masse se nommant « 0/CAPSYM » (à placer en dernier)

Le câble coaxial est simulé par la ligne de transmission T.

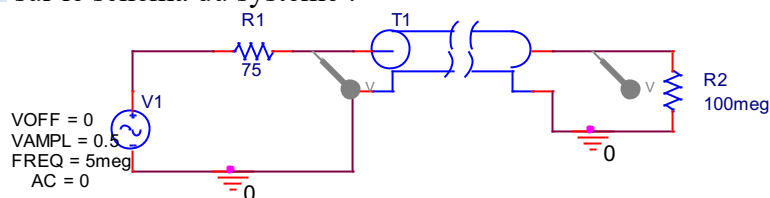
La sonde en entrée permet d'obtenir le signal en début de ligne noté $u(0, t)$.

La sonde en sortie permet d'obtenir le signal en bout de ligne noté $u(L, t)$.

Il faut maintenant paramétrer les grandeurs caractéristiques du câble Ethernet. Pour cela, double cliquer sur la ligne T : un tableau apparaît. Dans la colonne Z_0 (case grisée en bout de tableau, sur la droite), entrer la valeur de l'impédance caractéristique du câble ($75\ \Omega$). Faire de même avec la grandeur TD (durée de propagation) à 100 ns .


Créer un profil de simulation en cliquant sur  : donner un nom à votre simulation. Une fenêtre permettant de paramétrer la simulation va s'ouvrir (cela peut prendre plus de temps qu'un étudiant de première année pour ouvrir son chapitre 12 un soir de révision) . Une fois ouverte, choisir comme type de simulation « Time Domain » avec Run to Time à 800 ns et Maximum Step Size sur 0.01 ns . Cliquer sur OK.

Placer deux sondes  sur le schéma du système :



La sonde de gauche permet d'obtenir le signal en début de ligne, noté $u(0, t)$.

La sonde de droite permet d'obtenir le signal en bout de ligne, noté $u(L, t)$.

Lancer la simulation à l'aide de l'icône  : on obtient alors sur un même graphe, la représentation temporelle de $u(0, t)$ et $u(L, t)$.

On souhaite obtenir une représentation temporelle par signal :

- clic droit puis ADD PLOT, deux fois
- sur le premier graphe vierge, clic droit puis ADD TRACE et sélectionner le nom du signal correspondant à $u(0, t)$ (le nom apparaît en bas à gauche du premier graphe obtenu – s'aider des couleurs)
- sur le premier graphe vierge, clic droit puis ADD TRACE et sélectionner le nom du signal correspondant à $u(L, t)$ (le nom apparaît en bas à gauche du premier graphe obtenu – s'aider des couleurs)
- sur le graphe contenant les deux signaux, clic droit puis DELETE PLOT.

Sur chaque courbe, faites un clic droit puis sélectionner « Trace Property » : changer l'épaisseur du trait grâce à « width » (sélectionner la deuxième épaisseur).

Vous devez alors avoir sur votre écran, une représentation temporelle pour le signal en début de ligne et une pour le signal en bout de ligne.

Copier-coller le graphe (Window/Copy to clipboard et cocher « change all colors to black ») dans un fichier Word vierge. Étaler le graphe au maximum, sur une page au format paysage (Fichier/Mise en page sur Word) et nommer le graphe « Réponse fréquentielle pour un bout de ligne en circuit ouvert ».

APPEL 3 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

Imprimer le document Word.

7. Sur votre impression, indiquer quel graphe représente la représentation temporelle de $u(0, t)$ et quel graphe représente la représentation temporelle de $u(L, t)$
8. Comment expliquer que le signal $u(L, t)$ en bout de ligne ait une amplitude double (par rapport au signal émis) à partir de l'instant $t = 100 \text{ ns}$?
9. Comment expliquer qu'après la durée $\Delta t' = 200 \text{ ns}$, (durée d'un aller-retour), le signal $u(0, t)$ voit son amplitude doublée ?
10. Le signal émis est-il transmis à l'identique en bout de ligne dans ce cas ?
11. Calculer la valeur du TOS : a-t-on une onde progressive ici ?
12. Les deux extrémités $x = 0$ (entrée) et $x = L$ (sortie) de la ligne correspondent-elles à des nœuds ou à des ventres de vibrations ?

APPEL 4 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

Représentations spatiales des signaux :

Dans le logiciel PYZO, ouvrir le fichier nommé « TP25_ligne_reponse_frequentielle.py ». Ce script permet de tracer l'onde incidente et l'onde réfléchie (une fois le régime transitoire passé) ainsi que l'onde totale apparaissant dans la ligne (résultant de la somme de ces deux ondes).

Ce script est incomplet : compléter les lignes 9 à 13. Puis lancer l'exécution du script.

APPEL 5 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

13. Retrouvez-vous votre réponse à la question précédente grâce à la simulation Python ?
14. En quel point (on donnera la valeur en abscisses) a-t-on une tension électrique nulle, quel que soit l'instant ? Comment nomme-t-on ce type de point ?
15. A l'aide du nombre de fuseaux présents sur la ligne, déterminer le rang n et la fréquence f_n du mode propre observé ici.
16. Déterminer la fréquence f_4 du signal d'entrée permettant d'observer le mode propre de rang 4 sur la ligne.

Entrer cette valeur de fréquence dans le script, puis lancer son exécution.

17. Déterminer les valeurs des abscisses des nœuds de vibration.

APPEL 6 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

18. La fréquence $f = 7,50 \text{ MHz}$ correspond-elle à la fréquence d'un mode propre d'ordre n du câble ? Si oui, indiquer le rang n de ce mode.

Entrer cette valeur de fréquence dans le script, puis lancer son exécution.

19. Déterminer graphiquement le nombre de fuseaux présents sur la ligne. Est-ce un nombre entier ? Observe-t-on un mode propre ?
20. Obtient-on une onde progressive ou stationnaire ici ? Justifier votre réponse.
21. Déterminer précisément les abscisses des nœuds de vibration.

Conclure en répondant à ces deux questions :

22. La valeur de la fréquence f du signal d'entrée doit-elle être un multiple entier de la fréquence propre $f_1 = 5,00 \text{ MHz}$ du câble afin d'obtenir des ondes stationnaires ?

APPEL 7 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

B. Court-circuit en bout de ligne :

La ligne de transmission étudié est en court-circuit en bout de ligne (en sortie) : le coefficient de réflexion en amplitude $\rho(L)$ vaut $\rho(L) = -1$.

La fréquence du signal sinusoïdal alternatif en entrée du câble est toujours $f = 5,00 \text{ MHz}$, d'amplitude $E = 0,500 \text{ V}$.

Représentations temporelles des signaux d'entrée et de sortie :

Sur Orcad 17, remplacer R_2 par un simple fil : la ligne est ainsi en court-circuit.

Lancer la simulation pour obtenir la représentation temporelle de $u(0, t)$ et $u(L, t)$.

Comme précédemment, effectuer le nécessaire pour avoir sur votre écran, une représentation temporelle pour le signal en début de ligne et une pour le signal en bout de ligne, sur un document Word dont le titre est « Réponse fréquentielle pour un bout de ligne en court-circuit ».

APPEL 8 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

Imprimer le document Word.

23. Sur votre impression, indiquer quel graphe représente la représentation temporelle de $u(0, t)$ et quel graphe représente la représentation temporelle de $u(L, t)$
24. Comment expliquer qu'après la durée $\Delta t' = 200 \text{ ns}$, (durée d'un aller-retour), le signal $u(0, t)$ devienne nul ?
25. Comment expliquer que le signal $u(L, t)$ en bout de ligne soit nul à partir de l'instant $t = 100 \text{ ns}$?
26. Le signal émis est-il transmis en bout de ligne dans ce cas ?
27. Calculer la valeur du TOS : a-t-on une onde progressive ici ?
28. Les deux extrémités $x = 0$ (entrée) et $x = L$ (sortie) de la ligne correspondent-elles à des nœuds ou à des ventres de vibrations ?

Représentations spatiales des signaux :

Paramétrer le script Python précédent afin de simuler la situation étudiée dans ce paragraphe. Lancer l'exécution. Faire une capture d'écran du graphe obtenu et l'inclure dans votre copie.

29. Retrouvez-vous votre réponse à la question précédente grâce à la simulation Python ?
30. En quel point (on donnera la valeur en abscisses) a-t-on une tension électrique d'amplitude maximale, quel que soit l'instant ? Comment nomme-t-on ce type de point ?
31. En comparant le graphe obtenu ici à celui obtenu avant la question 16, citer la différence observée entre le mode propre de rang 1 pour un coefficient de réflexion $\rho(L) = +1$ et le mode propre de rang 1 pour un coefficient de réflexion $\rho(L) = -1$.

APPEL 9 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

IV. Étude de la réponse fréquentielle dans des cas moins « extrêmes » :

A. $Z_u = 25 \Omega$

La fréquence du signal sinusoïdal alternatif en entrée du câble est $f = 15,0 \text{ MHz}$, d'amplitude $E = 1,000 \text{ V}$. L'impédance de la charge en bout de ligne vaut maintenant $Z_u = 25 \Omega$.

32. Quel serait le rang du mode propre observé ici si les ondes étaient stationnaires ? Justifier.
33. A l'aide de la *partie II.D du chapitre 12*, calculer la valeur du coefficient de réflexion en amplitude $\rho(L)$, en $x = L$.
34. Calculer la valeur du *TOS* : a-t-on formations d'ondes purement progressives ici ?

Paramétrer le script Python précédent afin de simuler la situation étudiée dans ce paragraphe. Lancer l'exécution.

35. L'onde totale présente-elle des nœuds ? des ventres de vibrations ?
36. Déterminer graphiquement la valeur de $U_{m,max}$, amplitude maximale de l'onde et la valeur de $U_{m,min}$, amplitude minimale de l'onde.
37. Calculer $\frac{U_{m,max}}{U_{m,min}}$: quelle valeur de grandeur retrouve-t-on ?

APPEL 10 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

B. $Z_u = 75 \Omega$: ligne adaptée

La fréquence du signal sinusoïdal alternatif en entrée du câble est $f = 5,00 \text{ MHz}$, d'amplitude $E = 0,500 \text{ V}$. L'impédance de la charge en bout de ligne vaut maintenant $Z_u = 75 \Omega$. On rappelle que si la ligne de transmission est adaptée, le coefficient de réflexion en amplitude $\rho(L)$ vaut $\rho(L) = 0$.

Représentations temporelles des signaux d'entrée et de sortie :

Sur Orcad 17, replacer R_2 et mettre sa valeur à 75Ω : la ligne est ainsi adaptée. Lancer la simulation pour obtenir la représentation temporelle de $u(0, t)$ et $u(L, t)$.

Comme précédemment, effectuer le nécessaire pour avoir sur votre écran, une représentation temporelle pour le signal en début de ligne et une pour le signal en bout de ligne, sur un document Word dont le titre est « Réponse fréquentielle pour une ligne adaptée ».

38. Sur votre impression, indiquer quel graphe représente la représentation temporelle de $u(0, t)$ et quel graphe représente la représentation temporelle de $u(L, t)$
39. Mesurer le décalage temporel entre les signaux : à quelle grandeur correspond-il ?
40. Le signal émis est-il transmis en bout de ligne, dans le cas de la ligne adaptée ?
41. Calculer la valeur du *TOS* : a-t-on formations d'ondes purement progressives ici ?

Représentations spatiales des signaux :

Paramétrer le script Python précédent afin de simuler la situation étudiée dans ce paragraphe. Lancer l'exécution.

42. L'onde totale présente-elle des nœuds ? des ventres de vibrations ?
43. Que dire de l'amplitude du signal le long du câble électrique ?

APPEL 11 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

Conclusion : synthèse orale

A l'aide du logiciel Audacity et des casque-micros disponibles, réaliser et enregistrer une synthèse orale de l'ensemble de votre travail sur ce TP.

Chaque étudiant doit participer de façon équitable en temps. Les critères évalués sont les suivants :

- Utilisation d'un vocabulaire adapté,
- Synthèse comportant l'ensemble des notions abordées durant ce TP,
- Synthèse orale audible.

APPEL 12 : envoyer votre fichier sonore par courriel à l'enseignant