

TP 24 : Lignes de transmissions d'un signal électrique

Capacités exigibles :

- Présenter les différents types de lignes de transmission : ligne bifilaire, coaxiale.
- Décrire le modèle équivalent de la ligne de transmission à l'aide de ses paramètres linéiques
- Définir l'impédance caractéristique d'une ligne de transmission. Donner et utiliser son expression dans le cas d'une ligne sans pertes
- Étudier expérimentalement la transmission d'une impulsion dans le cas d'une charge nulle, infinie ou adaptée. Définir le coefficient de réflexion.

Capacités expérimentales :

- Utilisation du logiciel de simulation Orcad.
- Mesure d'un retard à l'aide du logiciel

Travail préparatoire (à faire à la maison) :

Compléter l'annexe 01 du TP24.

APPEL 0 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

Situation problème :

Vous êtes un grand technicien (aussi connu chez les techniciens que Justin Bieber est connu chez les adolescents) : vous êtes chargé de réaliser le câblage en utilisant le câble cat 6A LSOH de chez Legrand, entre un serveur et une carte réseau. Vous utilisez un câble F-UTP de référence 0 327 78.

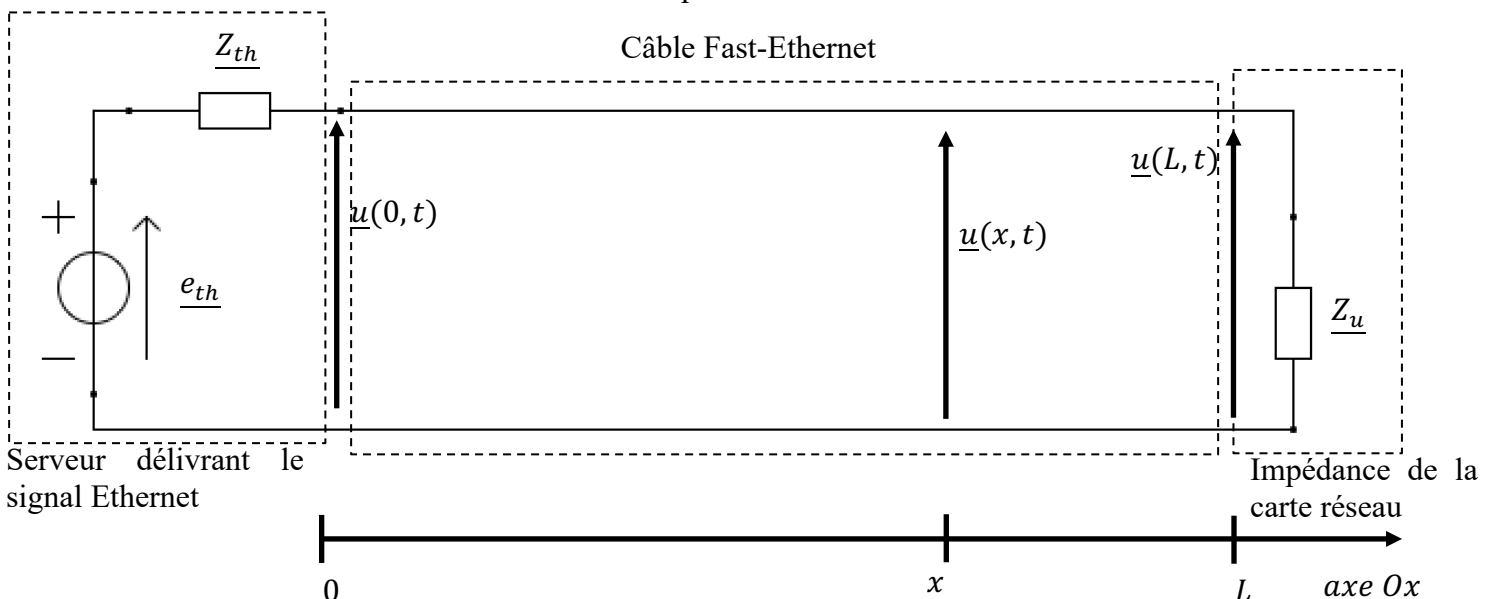
Vous devez tirer $L = 21,0 \text{ m}$ de câble. La fiche technique de ce câble fast-ETHERNET est fournie sur le site habituel. Vous avez le choix entre plusieurs cartes réseaux :

- La carte réseau A dont l'impédance d'entrée est de $0,001 \Omega$
- La carte réseau B dont l'impédance d'entrée est de 100Ω
- La carte réseau C dont l'impédance d'entrée est de $10 \text{ M}\Omega$

Le but de ce TP est de trouver quelle carte réseau utiliser ici (et de devenir par conséquent plus connu que Justin).

I. Étude des caractéristiques du câble fast-ETHERNET :

La propagation d'un signal électrique d'un point à un autre du câble fast-ETHERNET (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 note $\underline{u}(0, t)$ le signal en entrée du câble et $\underline{u}(L, t)$ le signal en sortie du câble. On modélise la situation étudiée par le schéma suivant :



1. A l'aide de la *partie I.A du chapitre 12* et de la fiche technique, déterminer le type de ligne de transmission utilisée ici (câble coaxial ou paire torsadée).

Dans un premier temps, on considère que l'isolant entre les fils est le **vide**.

2. A l'aide de *votre travail préparatoire sur l'annexe 01* et sachant que la fréquence du signal sinusoïdal alternatif en entrée du câble est $f = 100 \text{ MHz}$, **calculer** la longueur d'onde λ de l'onde se propageant dans le câble. **Conclure en déterminant** si l'on doit tenir compte des phénomènes de propagation dans notre étude (en justifiant votre réponse).

On donne deux grandeurs caractéristiques du câble ETHERNET : sa capacité linéique C_l et son inductance linéique L_l , calculées à partir de la fiche technique et en considérant que l'isolant entre les fils est le vide :

$$C_l = 18,8 \text{ pF/m}$$

$$L_l = 0,593 \text{ }\mu\text{H/m}$$

3. A l'aide de la *partie I.D du chapitre 12*, calculer la valeur théorique de l'impédance caractéristique de la ligne $Z_{vide,C}$.
4. A l'aide de la *fiche technique*, relever la valeur et l'unité de l'impédance caractéristique de la ligne Z_C donnée par le constructeur.
5. A-t-on $Z_{vide,C} = Z_C$? Quelle hypothèse fautive avons-nous fait ?

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

On considère que l'isolant entre les fils n'est plus le vide, mais un **isolant électrique autre**. On donne la permittivité relative au vide ϵ_r de l'isolant (ou diélectrique) présent dans le câble :

$$\epsilon_r = 3,17$$

6. A l'aide de la *partie I.A du chapitre 12*, calculer la valeur théorique de la célérité v des ondes TEM dans ce câble.
7. En déduire la longueur d'onde λ sachant que la fréquence du signal est $f = 100 \text{ MHz}$, dans ce câble. Conclure en déterminant si l'on doit tenir compte des phénomènes de propagation dans notre étude (en justifiant votre réponse).
8. A l'aide la fiche technique, calculer la résistance R d'une longueur $L = 21,0 \text{ m}$ d'une paire de fils torsadée : peut-on négliger ici les pertes dues à cette résistance ?
9. 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.

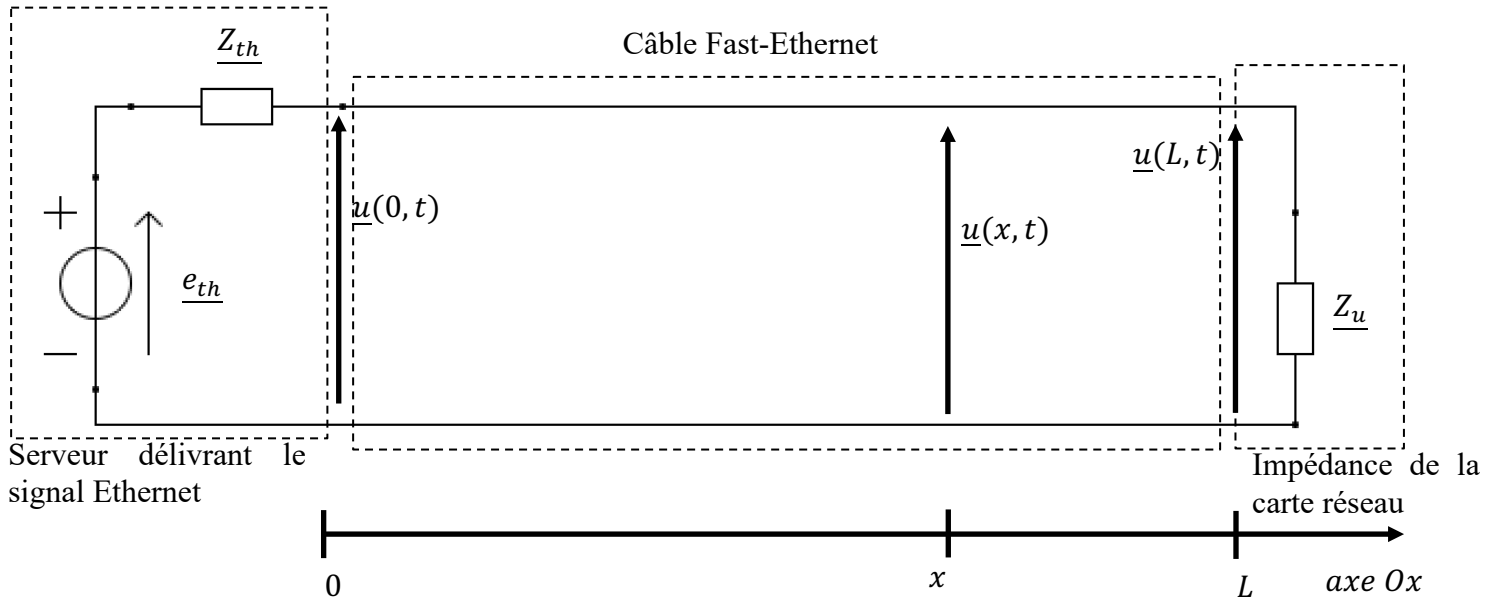
II. Coefficient de réflexion en bout de ligne :

La propagation d'un signal (modélisé ici par une onde) dans un câble (nommé aussi « ligne de transmission ») s'accompagne parfois d'un phénomène de réflexion.

Il y a réflexion chaque fois que l'onde rencontre une « rupture » du milieu de propagation : par exemple, lorsque l'onde arrive sur une « charge » placée à l'extrémité du câble ou de la ligne.

Une partie de la puissance incidente est réfléchiée et retourne vers le générateur, l'autre étant transmise à la charge.

On rappelle que l'on modélise la situation étudiée par le schéma suivant :



Rappels :

Le câble ETHERNET a une impédance caractéristique de $Z_c = 100 \Omega$. Le technicien a le choix entre plusieurs cartes réseaux :

- La carte réseau A dont l'impédance d'entrée est de 0Ω
- La carte réseau B dont l'impédance d'entrée est de 100Ω
- La carte réseau C dont l'impédance d'entrée est de $10 M\Omega$

10. A l'aide de votre travail préparatoire sur l'annexe 01, calculer la valeur du coefficient de réflexion $\rho(L)$, en $x = L$ pour **chaque carte réseau**.

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

Rappels pour la poursuite du TP :

Le câble ETHERNET a une impédance caractéristique de $Z_c = 100 \Omega$, une longueur $L = 21,0 m$. Une perturbation électromagnétique met $\Delta t = 125 ns$ à parcourir cette longueur L .

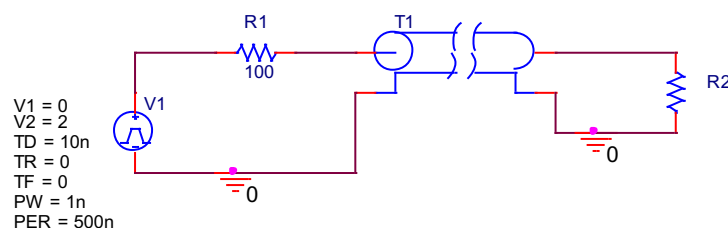
III. Étude de la réponse impulsionnelle du système pour les 3 cartes réseaux :


Pour l'ensemble du *paragraphe III de ce TP*, le signal en entrée du câble ETHERNET est une **impulsion électrique, émise à l'instant $t = 10 ns$ et de hauteur $E = 1,0 V$** .

A. Carte réseau A :

Utiliser la fiche méthode expérimentale 04 (concernant le logiciel Orcad 17) pour la suite du TP. Ne pas l'utiliser serait une grosse erreur (aussi grosse que Justin faisant un duo avec Mireille Mathieu).

Ouvrir Orcad 17 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 VPULSE : double cliquer sur V1, V2 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.

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 Justin ». 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 serveur délivrant le signal Ethernet est simulé par la source VPULSE en série avec l'impédance R_1 .

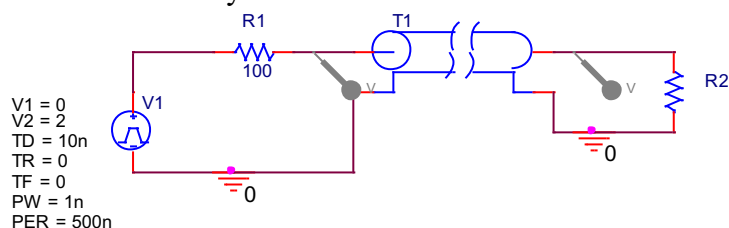
Le câble Fast-Ethernet est simulé par la ligne de transmission T.

La carte réseau est simulée par son impédance d'entrée R_2 .

Il faut maintenant paramétrer les grandeurs caractéristiques du câble Ethernet. Pour cela, double cliquer sur la ligne T : un tableau apparait. Dans la colonne Z0 (case grisée en bout de tableau, sur la droite), entrer la valeur de l'impédance caractéristique du câble (100Ω). Faire de même avec la grandeur TD (durée de propagation) à $125ns$.

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 convertir $1,25 \times 10^{-7}s$ en $125 ns$). Une fois ouverte, choisir comme type de simulation « Time Domain » avec Run to Time à $400ns$ et Maximum Step Size sur $0.01ns$. 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 $u(L, t)$.

Enfin, pour donner à R_2 la valeur souhaitée pour simuler la carte A (c'est-à-dire 0Ω), supprimer la résistance R_2 et la remplacer par un simple fil de connexion.

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 apparait en bas à gauche du premier graphe obtenu – s’aider des couleurs)
- sur le deuxième graphe vierge, clic droit puis ADD TRACE et sélectionner le nom du signal correspondant à $u(L, t)$ (le nom apparait 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) et nommer le graphe « Réponse impulsionnelle pour la carte A ».

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

Imprimer le document Word.

11. Sur votre impression, indiquer le graphe correspondant au signal $u(0, t)$.
12. Sur votre impression, indiquer le graphe correspondant au signal $u(L, t)$.
13. Sur votre impression, indiquer quelle impulsion correspond à l’impulsion émise.
14. Sur votre impression, indiquer quelle impulsion correspond à l’impulsion réfléchie.
15. A quel instant t devrait apparaître l’impulsion reçue en sortie du câble ?
16. L’impulsion émise a-t-elle été reçue ?
17. Comment expliquer que le signal $u(L, t)$ en bout de ligne soit nul à l’instant $t = 135 \text{ ns}$? On s’aidera du coefficient de réflexion $\rho(L)$, calculé en question 10 pour la carte A.
18. Quel signal contient l’impulsion émise ?
19. Quel signal contient l’impulsion réfléchie ?
20. Déterminer graphiquement la valeur de la durée $\Delta t'$, séparant les deux impulsions.
21. Cette durée $\Delta t'$ correspond-elle à la durée de propagation $\Delta t = 125 \text{ ns}$ (pour un aller simple le long du câble) calculée précédemment ?
22. A partir de $\Delta t'$, calculer la célérité v des ondes dans le câble.
23. La comparer à la valeur obtenue à la question 6.

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

B. Carte réseau B :

Donner à R_2 la valeur souhaitée pour simuler la carte B.

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.

Copier-coller les graphes (Window/Copy to clipboard et cocher « change all colors to black ») dans un fichier Word vierge. Étaler le graphe sur une page au format paysage et nommer le graphe « Réponse impulsionnelle pour la carte B ».

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

Imprimer le document Word.

24. Sur votre impression, indiquer le graphe correspondant au signal $u(0, t)$.
25. Sur votre impression, indiquer le graphe correspondant au signal $u(L, t)$.
26. Attribuer l'adjectif qualificatif correct, à l'impulsion présente sur le signal $u(0, t)$: émise, réfléchie ou reçue.
27. Attribuer l'adjectif qualificatif correct, à l'impulsion présente sur le signal $u(L, t)$: émise, réfléchie ou reçue.
28. L'impulsion émise a-t-elle été reçue à l'identique ?
29. A quel instant t (sur le signal d'entrée) devrait apparaître l'impulsion réfléchie (créée en bout de ligne) ? Est-ce le cas ici ?
30. Comment expliquer l'absence d'impulsion réfléchie ? On s'aidera du coefficient de réflexion $\rho(L)$, calculé en question 10 pour la carte B.
31. Déterminer graphiquement la valeur de la durée $\Delta t''$, séparant les deux impulsions.
32. Cette durée $\Delta t''$ correspond-elle à la durée de propagation $\Delta t = 125 \text{ ns}$ (pour un aller simple le long du câble) calculée précédemment ?
33. A partir de $\Delta t''$, calculer la célérité v des ondes dans le câble.
34. La comparer à la valeur obtenue à la question 6.

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

C. Carte réseau C :

Donner à R_2 la valeur souhaitée pour simuler la carte C.

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.

Copier-coller le graphe (Window/Copy to clipboard et cocher « change all colors to black ») dans un fichier Word vierge. Étaler le graphe sur une page au format paysage et nommer le graphe « Réponse impulsionnelle pour la carte C ».

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

Imprimer le document Word.

35. Sur votre impression, indiquer le graphe correspondant au signal $u(0, t)$.
36. Sur votre impression, indiquer le graphe correspondant au signal $u(L, t)$.
37. Sur votre impression, attribuer l'adjectif qualificatif correct, pour chacune des impulsions présentes dans les deux signaux : émise, réfléchie ou reçue.
38. Quel signal contient l'impulsion émise ?
39. Quel signal contient l'impulsion réfléchie ?
40. Quel signal contient l'impulsion reçue ?
41. L'impulsion émise a-t-elle été reçue à l'identique ?
42. Comment expliquer votre réponse à la question précédente ? On s'aidera du coefficient de réflexion $\rho(L)$, calculé en question 10 pour la carte C.
43. Entre quelles impulsions mesure-t-on la durée Δt ?
44. Entre quelles impulsions mesure-t-on la durée $\Delta t'$?

Conclusion :

45. Quelle carte permet d'obtenir une adaptation d'impédance avec le câble ETHERNET ?
46. A l'aide de l'ensemble de vos simulations, choisir la carte réseau que le technicien doit utiliser afin d'assurer la transmission du signal entre le serveur et la carte réseau. Justifier votre réponse.

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

D. Un pirate empêche la transmission du signal :

Vous voilà enfin connu et reconnu : Justin n'a qu'à bien se tenir. Vous savez quelle carte réseau utiliser avec le câble Ethernet. Un pirate informatique (un technicien frustré, dont le pseudo est ABRUGR) vient malheureusement contrecarrer vos plans. Il a dégradé le câble Ethernet présent entre le serveur et la carte que vous avez sélectionné (avec tellement de brio).

47. A l'aide de l'annexe 02, déterminer la valeur du coefficient de réflexion $\rho(L)$ pour chaque situation présentée.
48. Pour chaque situation, déterminer la nature du défaut (court-circuit ou circuit ouvert) créé par le pirate en justifiant votre réponse.
49. Pour chaque situation, déterminer la distance D séparant le serveur et le défaut.
50. L'impédance caractéristique du câble étant toujours de $Z_C = 100 \Omega$, déterminer la valeur de l'impédance du défaut pour chaque cas de l'annexe 02, à l'aide de la partie I.E du chapitre 12.

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

IV. Étude de la réponse indicielle du système pour les 3 cartes réseaux :

Pour l'ensemble du *paragraphe IV de ce TP*, le signal en entrée du câble ETHERNET est un **signal échelon, basculant à l'instant $t = 50 \text{ ns}$ et de hauteur $E = 1,0 \text{ V}$.**

A. Carte réseau A :

On garde le même générateur dans la simulation : mettre le paramètre PW sur 500n et le paramètre TD de la source VPULSE sur 50n. On transforme ainsi notre générateur d'impulsions en générateur d'échelons. Donner à R_2 la valeur souhaitée pour simuler la carte A.

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.

Afin de percevoir plus clairement les signaux, clic droit sur une courbe puis « trace property » et « width » : choisir un trait plus épais pour chaque courbe.

Copier-coller le graphe (Window/Copy to clipboard et cocher « change all colors to black ») dans un fichier Word vierge. Étaler le graphe sur une page au format paysage et nommer le graphe « Réponse indicielle pour la carte A ».

Imprimer le document Word.

51. Sur votre impression, indiquer quel front correspond au front émis.
52. A quel instant t devrait apparaître le front reçu en sortie du câble ? Est-ce le cas ici ?
53. Le front émis a-t-il été reçu ?
54. Comment expliquer que le signal $u(L, t)$ en bout de ligne reste nul à l'instant $t = 175 \text{ ns}$? On s'aidera du coefficient de réflexion $\rho(L)$, calculé en question 10 pour la carte A.

55. Déterminer graphiquement la valeur de la durée s'écoulant entre les deux fronts : correspond-elle à Δt (pour un aller simple) ou à $\Delta t'$ (pour un aller-retour) ?
56. Comment expliquer que le signal d'entrée $u(0, t)$ devienne nul à l'instant $t = 300 \text{ ns}$? On s'aidera du coefficient de réflexion $\rho(L)$, calculé en question 10 pour la carte A.

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

B. Carte réseau B :

Donner à R_2 la valeur souhaitée pour simuler la carte B.

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.

Afin de percevoir plus clairement les signaux, clic droit sur une courbe puis « trace property » et « width » : choisir un trait plus épais pour chaque courbe.

Copier-coller le graphe (Window/Copy to clipboard et cocher « change all colors to black ») dans un fichier Word vierge. Étaler le graphe sur une page au format paysage et nommer le graphe « Réponse indicielle pour la carte B ».

Imprimer le document Word.

57. Sur votre impression, attribuer l'adjectif qualificatif correct, à chaque front : émis, réfléchi ou reçu.
58. Le front émis a-t-il été reçu ?
59. Comment expliquer qu'après la durée $\Delta t'$, (durée d'un aller-retour), le signal d'entrée $u(0, t)$ ne devienne pas nul, comme précédemment ?
60. Déterminer graphiquement la valeur de la durée $\Delta t''$, séparant les deux fronts.
61. Cette durée $\Delta t''$ correspond-elle à la durée de propagation $\Delta t = 125 \text{ ns}$ (pour un aller simple le long du câble) calculée précédemment ?

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

C. Carte réseau C :

Donner à R_2 la valeur souhaitée pour simuler la carte C.

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.

Afin de percevoir plus clairement les signaux, clic droit sur une courbe puis « trace property » et « width » : choisir un trait plus épais pour chaque courbe.

Copier-coller le graphe (Window/Copy to clipboard et cocher « change all colors to black ») dans un fichier Word vierge. Étaler le graphe sur une page au format paysage et nommer le graphe « Réponse indicielle pour la carte C ».

Imprimer le document Word.

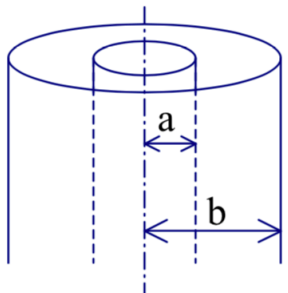
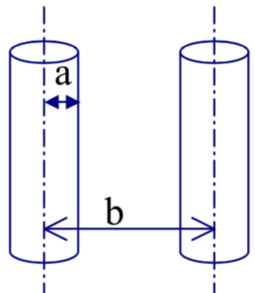
62. Sur votre impression, attribuer l'adjectif qualificatif correct, à chaque front: émis, réfléchi ou reçu.
63. Le front émis a-t-il été reçu à l'identique ?

64. Comment expliquer votre réponse à la question précédente ? On s'aidera du coefficient de réflexion $\rho(L)$, calculé en question 10 pour la carte C.
65. Entre quels fronts mesure-t-on la durée Δt ?
66. Entre quels fronts mesure-t-on la durée $\Delta t'$?
67. Comment expliquer la présence du front réfléchi sur le signal d'entrée ?

APPEL 12 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.

V. Pour aller plus loin (que Justin) :

On peut démontrer les formules suivantes :

Câble coaxial	Ligne bifilaire
	
$C_l = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$	$C_l = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$
$L_l = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$	$L_l = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$

avec ϵ_0 : permittivité du vide ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$)

μ_0 : perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$)

68. A l'aide de la fiche technique, déterminer les valeurs de a et b .
69. Déterminer les valeurs de la capacité linéique C_l et de l'inductance linéique L_l de cette ligne de transmission, en supposant que l'isolant électrique est le vide.
70. En déduire la valeur théorique de l'impédance caractéristique de la ligne $Z_{vide,C}$. Retrouve-t-on la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne ?

Comment faire si l'isolant de la ligne n'est pas le vide ?

Dans l'ensemble des formules contenant ϵ_0 , il faut remplacer ϵ_0 par $\epsilon_0 \times \epsilon_r$

71. Démontrer que $Z_C = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}}$ donne la relation suivante si l'isolant n'est pas le vide :

$$Z_C = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

72. En déduire la valeur de la permittivité relative du milieu isolant, notée ϵ_r .

APPEL 13 : Appeler le professeur afin qu'il note et valide votre travail.