



UNIVERSITÉ DE  
**SHERBROOKE**

Faculté de Génie

Département de génie électrique et de génie informatique

**Session S3 informatique**  
**Unité d'APP 5**  
**Été 2025**

**Ondes Guidées**  
**Guide de l'étudiant**

**Document :** GuideEtudiant.pdf

**Version :** 23 juin 2025

**Note :** En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes. Toute ressemblance avec des personnages réels ou fictifs ne serait que pure coïncidence.

**Copyright :** © 2019–2024, Max Hofheinz, mise à jour par Abdelaziz Ramzi, 2024-2025

**Table des matières**

<b>1</b>	<b>Énoncé de la problématique</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Références essentielles à consulter</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Sommaire des activités</b>	<b>7</b>
3.1	Activités de la première semaine . . . . .	7
3.2	Activités de la deuxième semaine . . . . .	7
3.3	Activités de la troisième semaine . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Évaluations et productions à remettre</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Matériel</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Procédural 1 : domaine temporel</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Laboratoire</b>	<b>11</b>
7.1	Calcul théorique sur le câble . . . . .	11
7.2	Mesure de l'impédance caractéristique du câble . . . . .	12
7.3	Longueur et atténuation du câble . . . . .	12
7.4	Longueur et atténuation : autre approche . . . . .	14
7.5	Atténuation du câble en fonction de la fréquence . . . . .	15
7.6	Réflexion sur différentes résistances . . . . .	16
7.7	Réflexion sur différentes capacités . . . . .	16
7.8	Conclusion générale . . . . .	17
<b>8</b>	<b>Procédural 2 : Domaine fréquentiel</b>	<b>18</b>

**Liste des tableaux**

1	Caractéristiques nominales des câbles . . . . .	12
2	Atténuation des câbles en fonction de la fréquence. . . . .	15

## 1 Énoncé de la problématique

Vous venez d'être recruté chez Hi-ER-net (pour high equipment-reliability network solutions), un fabricant de cartes réseau, pour travailler sur les pilotes et les micro-logiciels de ces cartes.

Un des projets en développement chez Hi-ER-net est une carte réseau pouvant directement communiquer avec toutes les autres cartes sur un réseau au lieu de passer par un commutateur de réseau dispendieux. Les lignes de transmission qui relient les cartes du réseau sont connectés ensemble à l'aide de connecteurs en T pour envoyer un signal d'une carte source vers toutes les autres cartes sur le réseau. Les lignes de transmission utilisées sont de simples câbles coaxiaux au lieu des câbles Ethernet qui contiennent 4 lignes de transmission sous forme de paires torsadées.

Avant votre arrivée, un premier prototype fonctionnant avec une fréquence d'horloge de 1 MHz a été validé avec succès. Les cartes sont adaptées à l'impédance caractéristique du câble et peuvent fonctionner en mode full duplex : elles peuvent émettre un signal qui se propage sur la ligne de transmission en s'éloignant de la carte et en même temps recevoir un signal qui se propage vers la carte.

Une deuxième version de la carte qui monte la fréquence d'horloge à 10 MHz est actuellement en validation, et vous êtes maintenant chargé de mettre au point le pilote et le micro-logiciel, puis de vous assurer que les cartes communiquent correctement. Pour cela votre patron vous propose d'utiliser le réseau de câbles coaxiaux de type RG58u, qui a déjà été utilisé pour tester la génération précédente fonctionnant à 1 MHz. Le réseau est très simple et a une topologie d'étoile (ou de T) avec 3 branches A B et C. Depuis son installation les locaux ont été rénovés et le réseau se trouve maintenant derrière des murs immaculés que votre patron aimerait garder intacts. Seulement les connecteurs BNC qui terminent les branches A, B et C sont accessibles.

Vous avez déjà implémenté le pilote et le micro-logiciel et vous avez validé que la communication directe entre deux cartes reliées par un câble RG58u assez court fonctionne sans erreurs.

Vous commencez alors à tester les cartes sur le réseau de l'entreprise en les connectant sur les ports A et B du réseau, mais la communication ne s'établit pas et ceci malgré le fait que vous avez gardé le port C en circuit ouvert. La trame émise semble revenir vers la carte émettrice et la carte réceptrice ne reçoit rien.

Vous avez vérifié tous vos codes et vous commencez à soupçonner qu'il pourrait y avoir un problème ailleurs. Vous demandez alors au département hardware de vérifier le bon fonctionnement des cartes. Ils confirment que l'impédance des cartes est bien de  $50\ \Omega$ , qu'elles sont donc adaptées à l'impédance caractéristique des câbles coaxiaux. Il ne devrait donc pas y avoir de réflexion de signal, ni en émission, ni en réception.

Ils ont également vérifiés qu'en émission la carte produit bien des impulsions rectangulaires avec un rapport cyclique de 50 % et une période de 100 ns. L'amplitude de l'impulsion est de  $V_0 = 10\text{ V}$  crête-crête dans un circuit ouvert. L'information est transmise dans la phase de l'impulsion par encodage Manchester. Pour 0 la tension est négative puis positive, pour 1 la

tension est positive puis négative. Ceci veut dire que 000000... et 111111... correspondent tous les deux à des signaux rectangulaires de 10 MHz, mais avec une phase différente. En réception, la carte respecte également les spécifications. Elle arrive à recevoir correctement une trame si l'amplitude dépasse  $\pm 0.5$  V pendant au moins un quart de la période pour chaque polarité.

Vous déduisez donc que, soit le réseau test de l'entreprise a été endommagé lors de la rénovation, de tel sorte que le signal ne puisse plus se rendre de l'autre côté, soit il y a un problème fondamental avec le principe de fonctionnement du réseau proposé. Vous en faites part à votre patron.

Il vous demande d'analyser la situation et de lui transmettre d'ici le 11 juillet 2025, 9h un rapport qui explique clairement l'origine du problème. Vous aurez accès au générateur de signaux et l'oscilloscope du département de hardware pour reproduire et mesurer les signaux émis et reçus par les cartes de réseau.

Votre patron veut une explication claire du dysfonctionnement du réseau. Il veut également une caractérisation des longueurs du câble de chaque branche depuis le connecteur en T jusqu'aux ports A, B ou C. Comme il ne veut pas défaire les rénovations toutes récentes, vous ne pouvez pas accéder aux 3 câbles et au connecteur en T, mais seulement aux ports A B et C.

Pour montrer que le problème vient effectivement du réseau, vous décidez d'abord de reproduire le dysfonctionnement observé avec le générateur de fonctions et l'oscilloscope tout en documentant précisément vos branchements.

Ensuite, pour déterminer si le réseau a été endommagé ou non, vous décidez de commencer par analyser la transmission et la réflexion dans le domaine temporel avec un signal approprié et facile à analyser. Si la position et la hauteur de chaque créneau observé peuvent être expliquées avec la configuration en T du réseau, le réseau n'a alors pas été endommagé et il doit s'agir d'un problème plus fondamental, qu'il faut alors expliquer. Si le signal observé ne peut pas correspondre à un réseau en T, la méthode de la réflectométrie dans le domaine temporel devrait alors vous permettre d'identifier et localiser le défaut.

Votre analyse temporelle devrait vous donner une longueur approximative des 3 branches du réseau, mais vous vous dites quelle ne sera sans doute pas très précise, car les fréquences de coupure du générateur et de l'oscilloscope sont à peine plus hautes que la fréquence d'opération, ce qui devrait arrondir significativement les créneaux observés. Une analyse fréquentielle de la transmission entre deux ports devrait permettre de contourner ce problème et d'obtenir une meilleure précision sur les longueurs des 3 branches du réseau grâce au principe de l'impédance ramenée. Vous vous dites que ce concept pourrait aussi vous permettre d'expliquer le dysfonctionnement de manière plus simple.

Votre patron veut évidemment résoudre ce problème et vous demande une proposition pour rendre ce réseau fonctionnel tout en gardant les mêmes cartes, les câbles qui ne sont pas endommagés et le même principe (topologie arbitraire, pas de commutateur). Il voudrait savoir s'il est possible de rendre le réseau fonctionnel, au moins en mode half-duplex, en imposant une terminaison bien choisie au port non-utilisé du réseau, et vous lui proposez de répondre à cette question par des mesures sur le réseau.

Ensuite il vous demande si le mode full duplex pourrait être possible en remplaçant le T avec un circuit passif qui pourrait totalement éliminer les réflexion dans le réseau.

Il a apprécié votre sens critique et votre compréhension des phénomènes de propagation RF et vous demande également d'évaluer la viabilité de la technologie du réseau de Hi-ER-net pour des réseaux futurs plus performants. Il veut savoir si le principe de fonctionnement du réseau actuel, soit

- un réseau de topologie arbitraire avec des connexions T, possiblement remplacées par votre circuit passif,
- un fonctionnement en mode full-duplex sur une seule ligne de transmission grâce aux cartes adaptées en impédance,

peut être ramené facilement à

- des fréquences d'horloge plus élevées d'au moins 1 GHz,
- des réseaux plus larges, avec des centaines de clients et un grand nombre de Ts.

Il veut donc connaître les difficultés technologiques auxquelles il faudra s'attendre quand la fréquence augmente et quand le nombre de clients augmente.

Comme tous les patrons, le votre est très occupé. Il vous demande donc d'être le plus concis possible tout en restant clair et en incluant toutes les étapes de votre raisonnement.

## 2 Références essentielles à consulter

- Clayton. R. Paul, *Electromagnetics for Engineers with applications*, Wiley, 2003, ISBN 0-471-27180-2. Chapitre 6 : *Transmission Lines*

Ce chapitre est disponible sur le site de la session.

**Attention : ces documents PDF sont sujets aux droits d’auteur et ne peuvent en aucun cas être distribué de quelque manière. En particulier, mettre les documents sur un autre site que le site à accès restreint de la session est une infraction.**

D’autres documents pourront être mis sur le site de l’unité.

## 3 Sommaire des activités

### 3.1 Activités de la première semaine

1. Première rencontre de tutorat.
2. Étude personnelle.
3. Formation à la pratique procédurale sur les lignes de transmission : approche temporelle.
4. Formation à la pratique en laboratoire sur les lignes de transmission. Pour en profiter pleinement vous devez y préparer en avance (voir section 7).

### 3.2 Activités de la deuxième semaine

1. Formation à la pratique procédurale sur les lignes de transmission : approche fréquentielle.
2. Travail au laboratoire sur la problématique en groupe de 2.
3. Rencontre facultative de collaboration à la solution de la problématique.
4. Validation pratique de la solution à la problématique au laboratoire en groupe de 2.
5. Remise du rapport d’APP.
6. Seconde rencontre de tutorat.
7. Évaluation formative et rétroaction.
8. Étude personnelle.

### 3.3 Activités de la troisième semaine

1. Consultation facultative.
2. Évaluation sommative.

## 4 Évaluations et productions à remettre

**La validation** se fera dans l'ordre de l'inscription des équipes et durera 10 min par équipe. Il vous sera demandé de

- montrer et expliquer les branchements et les réglages de l'oscilloscope et du générateur de signaux pour les différentes mesures
- expliquer votre démarche pour le calcul de la longueur des câbles

**Le rapport** est à remettre le 11 juillet 2025, 9h par équipe de 2, sur le site de dépôt habituel. Un gabarit sera fourni sur le site de l'APP. Veillez à bien documenter votre démarche et votre raisonnement. Un résultat dont il n'est pas clair comment il a été obtenu ne donne pas de points.

**Les examens sommatif et final** sont théoriques à livres fermes et dureront 3 heures. En plus d'un formulaire distribué avec l'examen vous aurez droit à une page lettre manuscrite (ou écrite sur tablette) recto-verso qui devra être rendue avec l'examen. Faites une copie avant l'examen sommatif si vous voulez garder la même feuille pour le final.

**Faites tous les calculs au niveau symbolique** et simplifiez les expressions autant que possible. Faites l'application numérique seulement à la fin (si des valeurs numériques des variables sont données). Un mauvais calcul numérique ne donnera pas de points et une simple faute de frappe sur votre calculatrice vous fera perdre beaucoup de points. Un calcul symbolique est plus facile à suivre pour le correcteur (et à vérifier pour vous) et peut donner des points même s'il contient des fautes.

## 5 Matériel

Pour le laboratoire 1, un kit consistant d'une longue ligne de transmission et de la connectique sera distribué à chaque équipe. Il est à rendre à la fin de la séance.

Le laboratoire 2 porte sur la problématique. Une bobine avec 3 sorties représentant le réseau de la problématique vous sera distribuée avec un kit de connectique. Ce matériel est à rendre lors de la validation.

Des connecteurs peuvent se détériorer avec l'usage. Si vous constatez des résultats instables ou surprenants, veuillez avertir le tuteur ou le support technique pour remplacer le matériel défectueux.



## 6 Procédural 1 : domaine temporel

Dans ce procédural nous traitons la propagation et la réflexion de signaux dans le domaine temporel. Pour tirer profit de procédural vous devez être avoir lus attentivement les chapitres 6.1 et 6.2 du livre de Paul.

**Exercice 1.** Vérifiez si les signaux suivants remplissent l'équation d'onde (eq. 6.2), ce qui veut dire qu'il peut s'agir de signaux qui se propagent sur une ligne de transmission.

- $V(z, t) = \sin(\omega t - \beta z)$
- $V(z, t) = \sin(\omega t) - \sin(\beta z)$

Quelle forme générale doit avoir un signal propagatif? Comment peut on déterminer la vitesse et la direction de propagation?

**Exercice 2.** Une ligne de transmission est formée par une piste de 1 mm de large sur un film de capton avec un épaisseur de  $12.7 \mu\text{m}$  et  $\epsilon_r = 3.4$  avec un plan de masse sur l'autre face. Quelles sont les propriétés

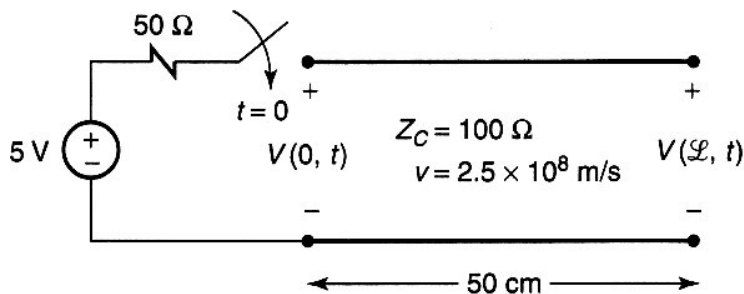
- capacité par unité de longueur
- inductance par unité de longueur
- vitesse de propagation
- impédance

de cette ligne de transmission?

**Exercice 3.** Une ligne de  $75 \Omega$  a un courant  $I(z, t) = I(3.77 \cdot 10^9 t - 18.13z)$ . Déterminer :

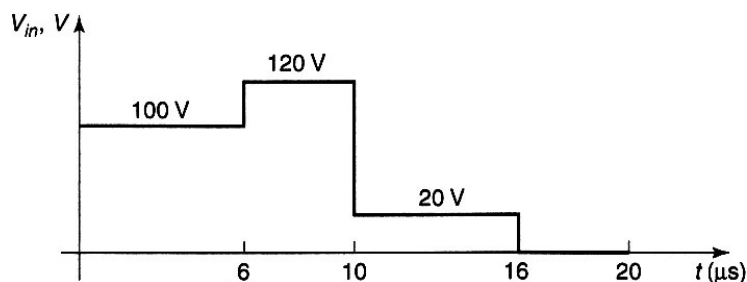
- la direction de propagation
- la vitesse de propagation
- la permittivité relative
- la tension sur la ligne

**Exercice 4.** (Paul 6.2.10) Dessiner la tension à la charge  $V(\mathcal{L}, t)$  et la tension d'entrée  $V(0, t)$  pour le problème ci-dessous pour  $0 < t < 20 \text{ ns}$ . Vers quelle valeur devraient converger les tensions dans l'état stationnaire?



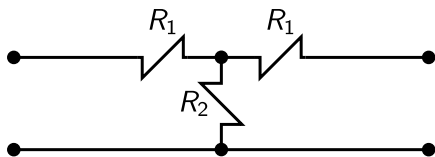
**Exercice 5.** La reflectométrie dans le domaine temporel (time-domain reflectometry, TDR, en anglais) permet de déterminer des propriétés des lignes de transmission, en particulier elle permet de localiser des imperfections comme des interruptions ou des court circuits. Cet instrument envoie une impulsion sur la ligne et mesure ce qui revient. Supposons une TDR avec une impédance de source de  $50\ \Omega$  attachée à une ligne de  $50\ \Omega$  avec une longueur inconnue, terminée par une charge dont l'impédance est inconnue. Le diélectrique du câble est du Teflon ( $\varepsilon_r = 2$ ). L'impulsion TDR a une durée de  $10\ \mu\text{s}$ . Pour le signal TDR montré dans la figure ci-dessous déterminer

- la longueur du câble
- l'impédance de la charge



**Exercice 6.** Probablement il n'y aura pas le temps de traiter cet exercice dans la séance. La solution sera alors déposée sur le site de l'APP. Calculer les coefficients de transmission et de réflexion pour les défauts suivants sur une ligne de transmission.

- Il y a une fuite entre les conducteurs qui peut être décrite par une résistance  $R$ .
- Un des conducteurs présente un défaut qui peut être décrit par une résistance série  $R$  sur ce conducteur.
- Une combinaison des deux défauts selon le schéma ci-dessous avec  $R_1 = \frac{1}{3}Z_C$  et  $R_2 = \frac{4}{3}Z_C$ .



## 7 Laboratoire

**Il est impératif d'avoir lu ce texte avant de se présenter au laboratoire.**

### Objectifs visés

Les objectifs visés par ce laboratoire sont :

- a. se familiariser avec les propriétés d'une ligne de transmission réelle, comportant des pertes ;
- b. apprendre à mesurer l'impédance caractéristique d'une ligne en utilisant les propriétés du diviseur de tension ;
- c. utiliser la réflectométrie dans le domaine du temps pour déterminer la longueur et l'atténuation d'un câble ;
- d. étudier l'effet de la fréquence du signal sur l'atténuation d'un câble ;
- e. observer l'effet d'une charge réactive sur la réponse temporelle à l'entrée d'un câble.

### Expérimentation en laboratoire

Ce laboratoire porte sur la réflectométrie temporelle sur un câble coaxial. En effet, nous avons vu dans nos lectures qu'un signal transmis sur une ligne de transmission sera totalement ou partiellement réfléchi sur la charge selon la valeur de l'impédance de cette charge comparée à l'impédance caractéristique de la ligne. Par le diagramme de réflexion, la forme d'onde peut être facilement calculée à n'importe quel point sur la ligne, en réponse à un échelon envoyé sur cette ligne.

Pour observer ce phénomène, plusieurs mesures seront réalisées lors de ce laboratoire sur un câble coaxial de longueur *inconnue*. Ces différentes mesures sont expliquées aux pages suivantes.

**Chaque équipe doit choisir un câble au début de la séance et prendre en note le numéro pour référence ultérieure.** Tous les résultats des observations doivent être consignés (par chaque membre de l'équipe) et pourront faire l'objet de l'évaluation sommative. Il est essentiel de lire attentivement toute la procédure décrite ci-après, et d'effectuer d'avance toutes les démarches préparatoires (calculs, lectures, etc.) qui conviennent.

#### 7.1 Calcul théorique sur le câble

Les caractéristiques nominales du câble coaxial sont résumées dans le tableau 1.

À partir de ces valeurs, calculer :

- l'inductance du câble en Henry/mètre
- la vitesse de propagation sur le câble de deux façons, soit avec les constantes diélectrique et magnétique, soit avec l'inductance  $L$  et la capacité  $C$ .

Comparer avec le résultat du tableau 1.

TABLE 1 – Caractéristiques nominales des câbles

	Câble	
	RG-58/U	RG-58A/U
Diamètre interne (a – mm)	0.81	0.94
Diamètre externe (b – mm)	2.95	2.90
Impédance caract. ( $Z_C - \Omega$ )	53.5	50
Vitesse de propagation (% de $c_0$ )	66%	78%
Capacité distribuée (pF/m)	93.5	85.3
Constante diélectrique	2.25	1.65

## 7.2 Mesure de l'impédance caractéristique du câble

### Montage

- Réaliser le montage comme sur la figure 1,  $\hat{Z}_L$  étant un circuit ouvert.
- Régler le générateur comme suit :
  - Onde carrée, largeur de l'impulsion (duty cycle) 20 %.
  - Amplitude : 2 Volts p/p.
  - Fréquence : 200 kHz.

La forme d'onde qui doit être obtenue à l'oscilloscope est représentée schématiquement à la figure 2. **Lors de la préparation, essayez de répondre le plus clairement à la question : pourquoi obtient-on cette forme d'onde.**

### Mesures

- a. Observer et expliquer la forme d'onde obtenue.
- b. Quel est le circuit équivalent du câble lors du premier crêteau observé ? En déduire l'impédance caractéristique du câble.
- c. Faire varier le rapport cyclique jusqu'à 50 % et observer la trace sur l'oscilloscope en expliquant ce qui se passe.

## 7.3 Longueur et atténuation du câble

### Montage

- Réaliser le montage comme sur la figure 1,  $\hat{Z}_L$  étant un circuit ouvert.
- Régler le générateur comme suit :
  - Onde carrée, largeur de l'impulsion (duty cycle : entre 20 % et 50 %).
  - Amplitude : 2 Volts p/p.
  - Fréquence : 200 kHz.

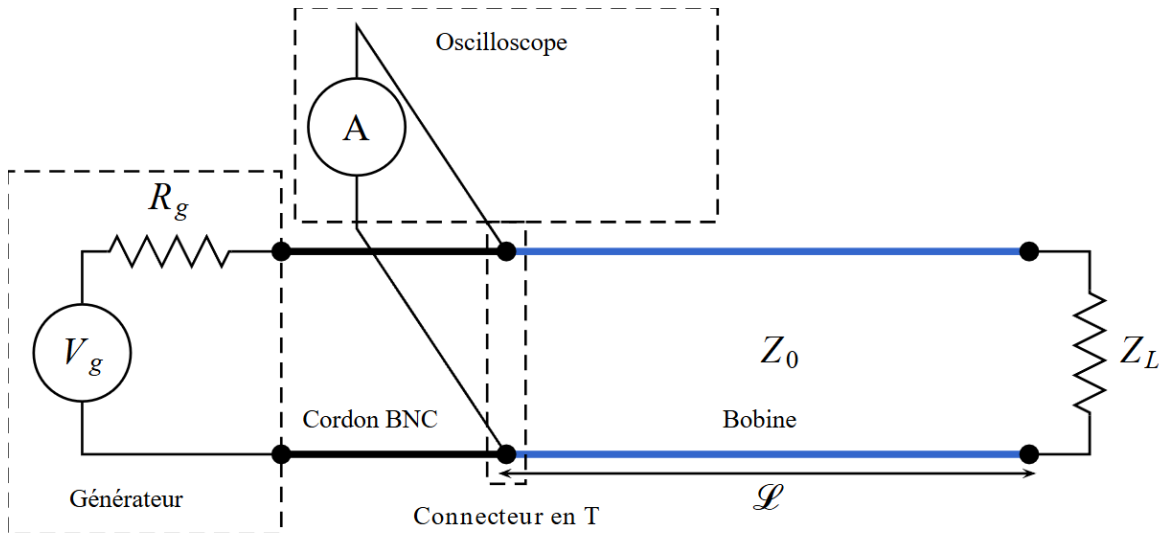


FIGURE 1 – Montage à réaliser pour la section 7.2

### Mesures

- Calculer la longueur du câble en choisissant la largeur d'impulsion qui convient le mieux.
- Calculer l'atténuation du câble en dB/100 m. Pour le calcul de l'atténuation, on donne :

$$\text{Att(dB)} = -20 \log \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

où  $V_1$  est la tension envoyée sur le câble et  $V_2$  la tension mesurée au point d'observation sur le câble.

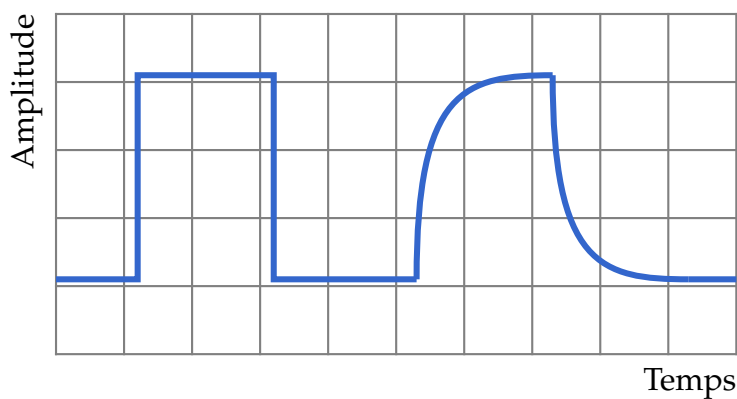


FIGURE 2 – Forme d'onde obtenue à l'oscilloscope

c. Pourquoi la deuxième impulsion sur la figure 2 n'a pas la même forme que la première ?

Bien noter les détails de tous les calculs, les valeurs des tensions mesurées, la justification du choix de rapport cyclique, etc.

## 7.4 Longueur et atténuation : autre approche

### Montage

- Réaliser le montage comme sur la figure 3,  $\hat{Z}_L$  est constituée de la charge adaptée ou d'une charge proche de  $50\ \Omega$ .
- Régler le générateur comme suit :
  - Onde carrée, largeur de l'impulsion (duty cycle) : entre 20 % et 50 %.
  - Amplitude : 2 Volts p/p.
  - Fréquence : 200 kHz.

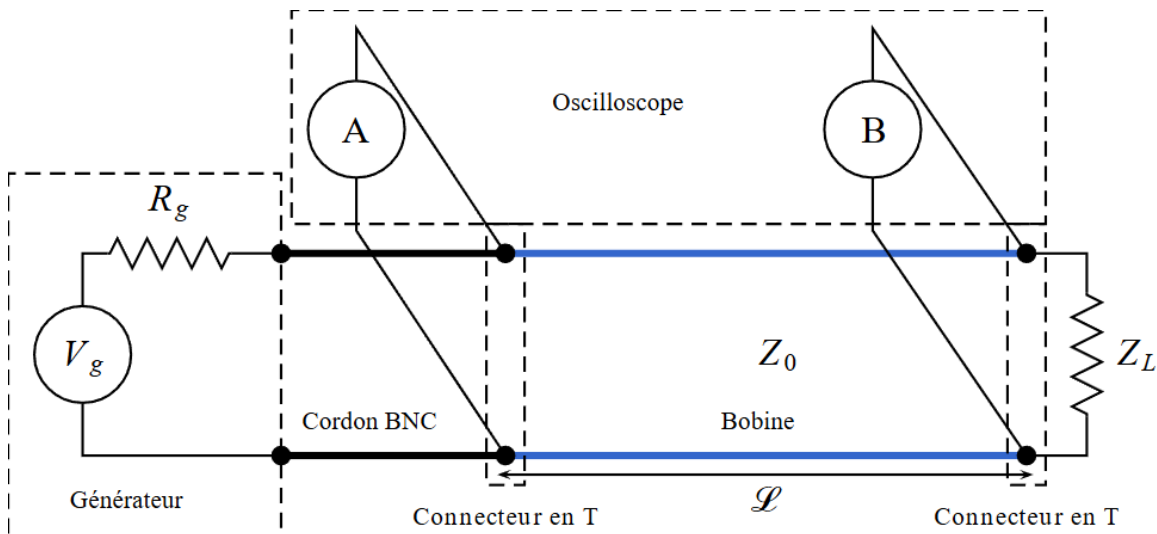


FIGURE 3 – Montage à réaliser pour la section 7.4

### Mesures

- a. Calculer la longueur du câble en choisissant la largeur d'impulsion qui convient le mieux.
- b. Calculer l'atténuation du câble en dB/100 m en utilisant la même technique qu'à la section 7.3.

Bien noter encore une fois tous les résultats de mesures, et effectuer une comparaison

TABLE 2 – Atténuation des câbles en fonction de la fréquence.

RG-58/U		RG-58A/U	
Fréq.	Att.	Fréq.	Att.
MHz	dB/100m	MHz	dB/100m
1	1.1	1	1.2
10	3.9	10	4.6
50	10.2	50	10.5
100	14.8	100	14.8
200	22.3	200	21
400	32.8	400	29.5
700	45.9	700	39.4
900	52.5	900	45.3
1000	55.8	1000	47.6

## 7.5 Atténuation du câble en fonction de la fréquence

### Montage

- Réaliser le montage comme sur la figure 3,  $\hat{Z}_L$  est constituée de la charge adaptée ou d'une charge proche de  $50\ \Omega$ .
- Régler le générateur comme suit :
  - **Onde sinusoïdale.**
  - Amplitude : 2 Volts p/p.
  - Fréquence variable de 100 kHz à 10 MHz.

### Mesures

Mesurer l'atténuation du câble en dB/100m en utilisant le montage de la figure 3 et la formule donnée dans la section 7.3 pour différents points de fréquence entre 100 kHz à 10 MHz.

### Traitement des résultats

Représenter l'atténuation mesurée en fonction de la fréquence sur un graphique. Tracer sur le même graphique la courbe d'atténuation obtenue à partir des données du manufacturier (tableau 2). commenter sur la compatibilité des résultats avec ceux du manufacturier.

## 7.6 Réflexion sur différentes résistances

### Montage

- Réaliser le montage comme sur la figure 1,  $\hat{Z}_L$  étant une charge variable.
- Régler le générateur comme suit :
  - Onde carrée, largeur de l'impulsion (duty cycle) : entre 20 % et 50 %.
  - Amplitude : 2 Volts p/p.
  - Fréquence : 200 kHz.

### Mesures

Observer à l'oscilloscope les réponses temporelles pour les valeurs de charge  $\hat{Z}_L$  suivantes :

- a.  $\hat{Z}_L$  est un circuit ouvert.
- b.  $\hat{Z}_L$  est un court-circuit.
- c.  $\hat{Z}_L \approx Z_C$
- d.  $\hat{Z}_L \approx 2Z_C$
- e.  $\hat{Z}_L \approx 4Z_C$
- f.  $\hat{Z}_L \approx Z_C/2$

### Traitement des données

Tracer pour chacune des six charges la réponse théorique obtenue à l'aide du diagramme de réflexion et la réponse mesurée. Expliquer quantitativement la différence entre la théorie et la mesure pour chacun des cas.

## 7.7 Réflexion sur différentes capacités

### Montage

- Réaliser le montage comme sur la figure 1,  $\hat{Z}_L$  étant une charge variable.
- Régler le générateur comme suit :
  - Onde carrée, largeur de l'impulsion (duty cycle : entre 20 % et 50 %).
  - Amplitude : 2 Volts p/p.
  - Fréquence : 200 kHz.



**Mesures**

Observer à l'oscilloscope les réponses temporelles et calculer les temps de montée pour les valeurs de charge  $\hat{Z}_L$  suivantes :

- a.  $\hat{Z}_L$  est un circuit ouvert
- b.  $\hat{Z}_L$  est une capacité de valeur 1 nF.
- c.  $\hat{Z}_L$  est une capacité de valeur 5 nF.

**Traitement des données**

Comment expliquez-vous les résultats obtenus ?

**7.8 Conclusion générale**

Rédiger, pour votre propre usage dans l'approfondissement des connaissances acquises, une conclusion générale sur le laboratoire. Cette conclusion ne doit pas consister en une simple répétition des énoncés. Il faut dégager les choses principales que vous avez observées et tirer vos conclusions sur ces observations.

## 8 Procédural 2 : Domaine fréquentiel

Dans le premier procédural nous avons considéré des signaux de forme arbitraire (surtout des signaux rectangulaires) se propageant sur des lignes. Nous nous focalisons maintenant sur des signaux sinusoïdaux, ce qui permet de modéliser plus simplement les pertes et réflexions et de prendre en compte des propriétés des lignes et des terminaisons qui changent avec la fréquence. Pour bénéficier de ce procédural vous devez être à l'aise avec les **phaseurs** (voir document "Rappel sur les phaseurs" sur le site d'APP) et avoir lu attentivement les **chapitres 6.3 et 6.6** du livre de Paul.

**Exercice 1.** Une ligne de transmission est excitée avec un signal sinusoïdal et terminée avec une charge adaptée. Vous pouvez vous aider du code python `stationary_wave.py` disponible sur le site de l'APP.

- Dessiner l'allure de la tension  $V(z, t)$  pour différents temps.
- Dessiner l'enveloppe de  $V(z, t)$ .
- Dessiner le module du phaseur du signal  $|\hat{V}(z)|$ .
- Que se passe-t-il si la ligne est terminée avec un court-circuit ?
- Que se passe-t-il si la ligne est terminée avec un circuit ouvert ?
- Quelle est l'allure du module du phaseur du courant dans ces deux cas ?

**Exercice 2.** Une ligne d'impédance  $Z_C$  est terminée avec une charge  $\hat{Z}_L$

- Calculer le coefficient de réflexion à la charge.
- Calculer le coefficient de réflexion ramené.
- Calculer l'impédance ramenée.
- Que se passe-t-il si  $\hat{Z}_L = Z_C$  ?

**Exercice 3.** (Paul 6.3.16) Déterminer l'impédance ramenée d'une ligne quart d'onde. Qu'est-ce qui se passe en cas d'une ligne terminée par un court circuit, un circuit ouvert ?

**Exercice 4.** (Paul 6.3.3) Une ligne de transmission est excitée avec une fréquence  $f = 5$  MHz et une amplitude  $\hat{V}_S = 50 \angle 0^\circ$ . Les propriétés de la ligne sont  $v = 2 \times 10^8$  m/s,  $\mathcal{L} = 52$  m,  $Z_c = 50 \Omega$ . L'impédance de la source est  $\hat{Z}_S = 20 - j30 \Omega$ , celle de la charge  $\hat{Z}_L = 200 - j500 \Omega$ . Déterminer

- la longueur de la ligne en longueurs d'onde
- le coefficient de réflexion de tension à la charge
- le coefficient de réflexion de tension à la charge, ramené à la source
- l'impédance de la charge ramenée à la source
- la tension en fonction du temps à la source
- la puissance moyenne envoyée dans la charge

g. le taux d'onde stationnaire

**Exercice 5.** Un câble coaxial a une impédance de  $50\ \Omega$  et la résistance du conducteur central est de  $50\ m\Omega/m$ , la résistance du conducteur extérieur est négligeable. Le diélectrique est du PTFE ( $\epsilon_r = 2.25$ ) dont on néglige les pertes.

- a. Calculer la constante de propagation du câble.
- b. Comment évolue-t-elle avec la fréquence et est-ce que cette évolution est en bon accord avec ce que vous avez mesuré au laboratoire ? Pourquoi ?