



UNIVERSITÉ
LAVAL

Rapport de laboratoire 3

Transmission des ondes électromagnétiques

présenté à

M. Dominique Grenier

| <i>matricule</i> | <i>nom</i> |
|------------------|------------------|
| 910 055 897 | Daniel Thibodeau |
| 910 097 879 | Francis Valois |

Université Laval
26 octobre 2012

Chapitre 1

Laboratoire 2

1.1 Projet 1

Nous avons choisi une charge de valeur 100Ω puisque pour cette valeur, on obtient un coefficient de réflexion théorique faible. Pour affirmer cela, on utilise l'expression suivante :

$$\Gamma_g(s) = \frac{Z_g(s) - Z_0(s)}{Z_g(s) + Z_0(s)} \quad (1.1)$$

Dans le circuit étudié, on cherche à avoir Z_0 (l'impédance mise en parallèle avec la source) $\approx Z_G$ (l'impédance de la ligne)

Afin d'observer de manière pratique le comportement des réflexions du circuit, nous avons essayé chacune des résistance disponible dans les choix en plus de celle de 100Ω . Nous présenterons les courbes obtenus à l'oscilloscope à l'annexe A. Comme seule la courbe pour la résistance de 100Ω est requise selon l'énoncé de laboratoire, elle est présentée ci-dessous :

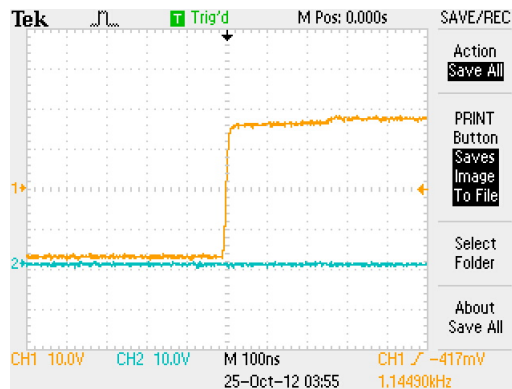


Figure 1.1 – Courbes obtenus à l'oscilloscope pour le projet 1 en utilisant une résistance de 100Ω

On note dans cette figure que la réflexion est bel et bien faible, mais existante, en utilisant une résistance variable (le potentiomètre), on lit au multimètre une résistance très proche de 93Ω . Cette résistance est très proche de l'impédance intrinsèque de ligne du tableau 1 présenté dans le protocole de laboratoire($z_0 = 93\Omega$). L'ensemble des autres courbes est présenté dans l'annexe A

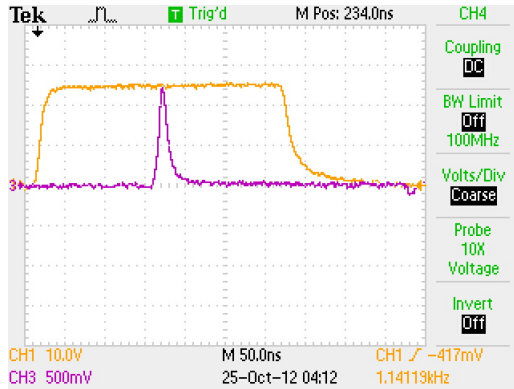
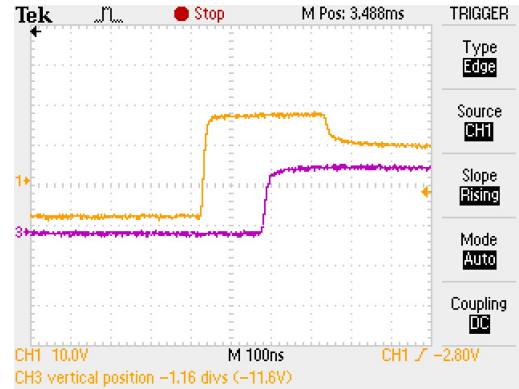
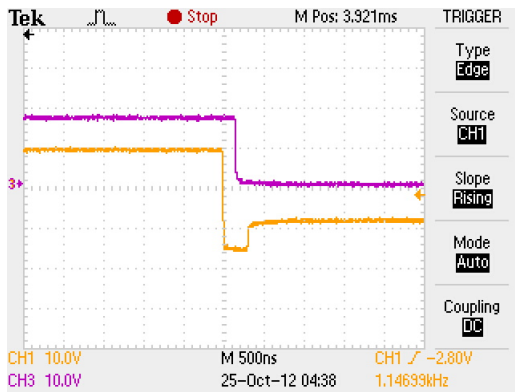
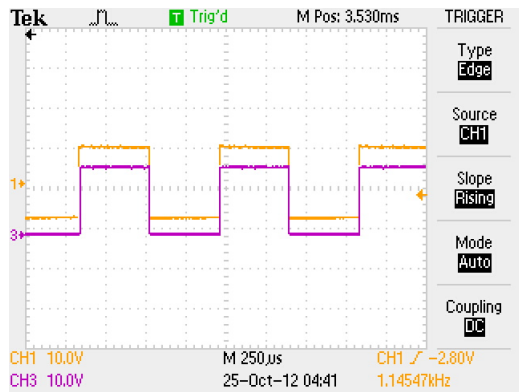
On remarque que la valeur fournie par le manufacturier est très précise. La différence entre la valeur du manufacturier et celle mesurée repose sur le bruit du signal qui affecte la précision de la lecture à l'oscilloscope et aussi la précision limitée de l'instrument de mesure de la résistance.

Pour ce qui est de déterminer la longueur de ligne, nous avons que la première réflexion vue à la source pour une résistance de $27\ \Omega$ est vue à une différence de temps (par rapport à la montée initiale) de $\approx 250\text{ns}$. Or, ce temps correspond au temps d'aller-retour. Afin de déterminer la longueur de la ligne, on divise par deux le temps d'aller-retour, ce qui donne 125ns et puis, on divise la vitesse de propagation par ce temps. Soit $v_p = 0.86 \times c \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$, $l[m] = 0.86 \times c \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times 125\text{ns} = 37.475[m]$. La ligne de transmission fait donc $37.475[m]$ de long.

1.2 Projet 2

Dans ce projet, il était demandé de visualiser simultanément les signaux au niveau de la charge et de la source sur la ligne RG-58 de 30m. Cela fut fait pour des charges de respectivement $0\ \Omega$, $27\ \Omega$ et 50Ω . Les courbes obtenues sont présentées à la section suivante.

1.2.1 Présentation des courbes obtenues expérimentalement

(a) Régime transitoire pour $R = 0\Omega$ (b) Front montant du régime transitoire pour $R = 27\Omega$ (c) Front descendant du régime transitoire pour $R = 27\Omega$ (d) Vue d'ensemble du régime transitoire pour $R = 27\Omega$

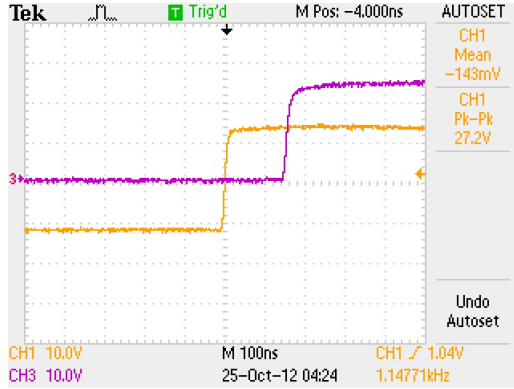
1.2.2 Présentation des calculs

Un exemple de chacun des calculs demandés est présenté ci-dessous. L'équation utile au calcul du coefficient de réflexion est présentée à l'équation 1.1.

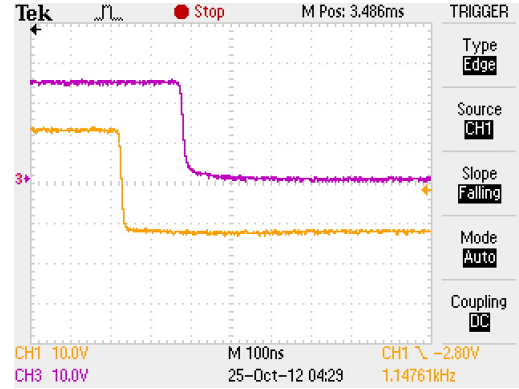
Calcul du coefficient de réflexion vu par la source

Le développement du calcul du coefficient de réflexion vu par la source est présenté ci-dessous :

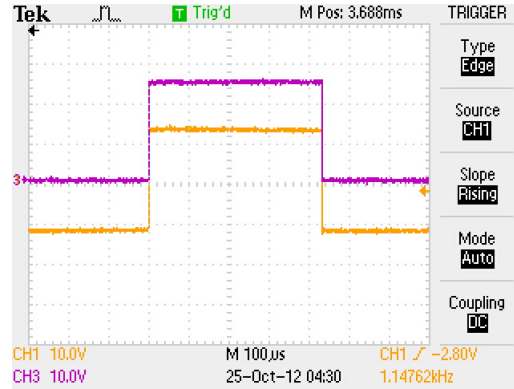
$$\begin{aligned}
 \Gamma_g(s) &= \frac{Z_g(s) - Z_0(s)}{Z_g(s) + Z_0(s)} \\
 &= \frac{50 - 50}{50 + 50} \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{1.2}$$



(e) Front montant du régime transitoire pour $R = 50\Omega$



(f) Front descendant du régime transitoire pour $R = 50\Omega$



(g) Vue d'ensemble du régime transitoire pour $R = 50\Omega$

Calcul de la tension $V^+(s)$

On note premièrement sur la figure 1.2(e) que la tension de la source était de 27.2 V.

$$\begin{aligned} V^+(s) &= \frac{Z_0}{Z_0 + R_g} V_g(s) \\ &= \frac{50}{50 + 50} 27.2 \\ &= 13.6V \end{aligned} \tag{1.3}$$

Calcul des coefficients de réflexion vus aux charges

$$\Gamma_c(s) = \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \tag{1.4}$$

Pour $R = 0\Omega$

$$\begin{aligned}\Gamma_c(s) &= \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \\ &= \frac{0 - 50}{0 + 50} \\ &= -1\end{aligned}$$

Pour $R = 27\Omega$

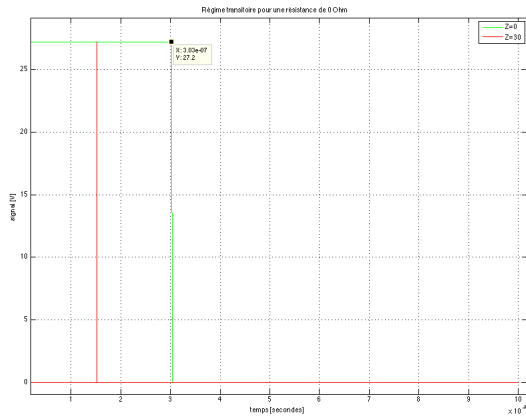
$$\begin{aligned}\Gamma_c(s) &= \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \\ &= \frac{27 - 50}{27 + 50} \\ &= -0.2987\end{aligned}$$

Pour $R = 50\Omega$

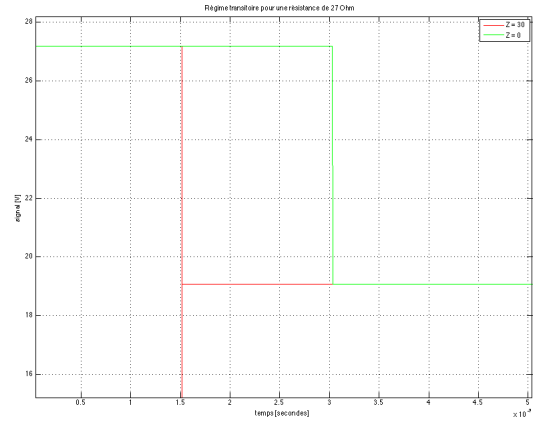
$$\begin{aligned}\Gamma_c(s) &= \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \\ &= \frac{50 - 50}{50 + 50} \\ &= 0\end{aligned}$$

1.2.3 Présentation des courbes théoriques de régime transitoire

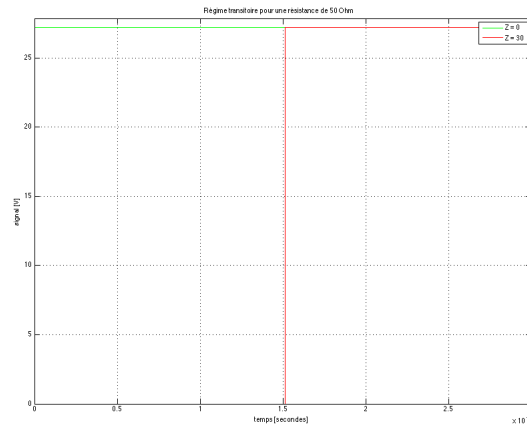
Les courbes théoriques utiles pour l'analyse et la discussion sont présentées ci-dessous.



(h) Régime transitoire théorique pour $R = 0\Omega$



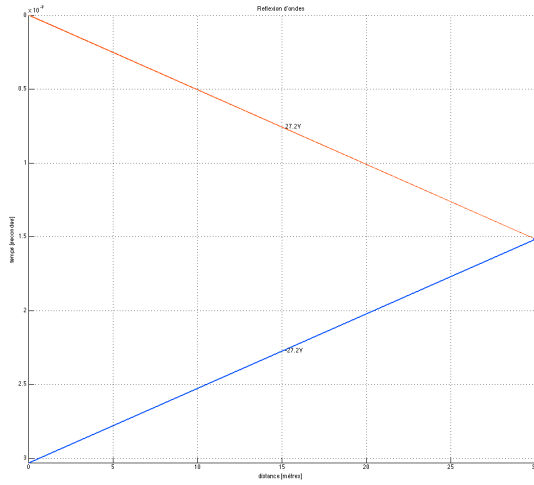
(i) Régime transitoire théorique pour $R = 27\Omega$



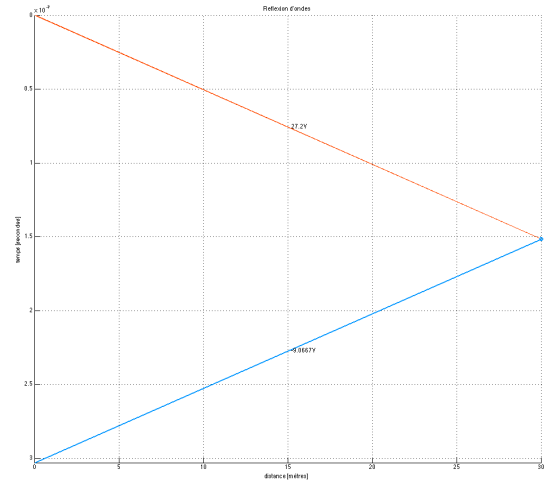
(j) Régime transitoire théorique pour $R = 50\Omega$

1.2.4 Présentation des diagrammes en z

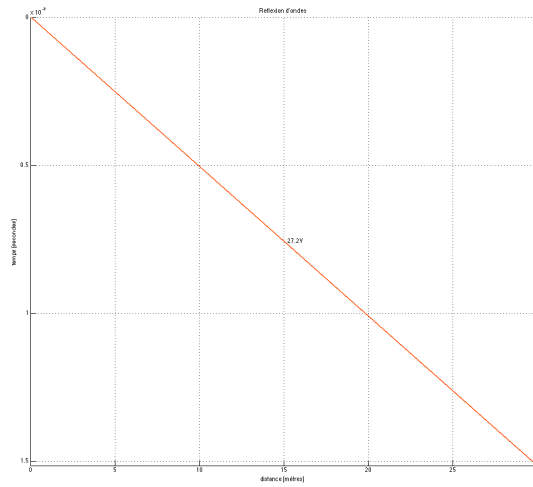
Cette section présente les diagrammes en z qui ont été réalisés au moyen du logiciel matlab et du programme disponible sur le site web du cours.



(k) Diagramme en z pour $R = 0\Omega$



(l) [Diagramme en z pour $R = 27\Omega$



(m) [Diagramme en z pour $R = 50\Omega$

1.2.5 Discussion

Nous faisons premièrement le constat que les signaux produits par le générateur ne sont pas idéaux et qu'ils peuvent biaiser la forme des courbes. La bande passante limitée de l'oscilloscope amène des contraintes quant à la visualisation de signaux avec des transitions brusques comme les échelons. Nous pouvons aussi noter la présence d'impédances complexes parasites présentes sur la ligne qui peut modifier la forme des courbes obtenues. Les courbes seront analysées selon la théorie en négligeant ces détails plus techniques.

La figure 1.2(a) représente le régime transitoire pour $R = 0 \Omega$ que nous avons mesuré au laboratoire. Lorsque nous comparons avec la figure théorique 1.2(h), nous remarquons tout de suite la similitude entre les deux courbes. Le signal à la source est complètement atténué après un certain temps. Ceci est causé par le signal réfléchi qui est en opposition de signe avec le signal initial. La courbe en Z théorique pour une résistance de 0Ω (figure 1.2(k)) présente ce comportement. À $Z = 0$, l'échelon va rencontrer la première droite de 27.2 V au temps $t = 0$ et crée le front montant. Par la suite, il rencontre la droite de -27.2 V à $t = 2T$ et crée le front descendant.

Le signal vu à la charge peut être analysé de la même façon. Le pic est causé par le signal qui rencontre la droite de 27.2 V à environ $Z = 30$ et $t = T$ et rencontre la droite de -27.2 V quelques nanosecondes plus tard. Ce pic est bien présent dans les deux figures ce qui valide le modèle utilisé. De plus, selon le calcul de la section 1.2.2, le coefficient de réflexion est de -1 ce qui explique la forme des courbes obtenues.

En utilisant la même méthode que précédemment, il est possible de valider la concordance de la théorie avec la pratique. La courbe en Z théorique pour une résistance de 27Ω (figure 1.2(l)), a la même allure que la courbe pour une résistance de 0Ω mais avec des valeurs d'amplitudes de signaux réfléchis différentes. Pour la courbe vue de la source, il doit y avoir un échelon de 27.2 V à $t = 0$ et un échelon de -9 V à $t = 2T$ tandis que pour la courbe vue de la charge, il doit y avoir un échelon d'environ 18 V à $t = T$. C'est bien ce qui a été obtenu au laboratoire comme il est montré à la figure 1.2(b). De plus, il est possible de voir que le régime statique du signal se situe bien à environ 19 V comme le prévoit le coefficient de réflexion de -0.2987 . En ce qui concerne le régime transitoire théorique (figure 1.2(i)), celle-ci posséderait les mêmes caractéristiques que la courbe pratique si ce n'était pas du pic à $t = T$. Ce pic peut-être expliqué par le choix d'afficher la courbe à $Z = 29.999$ au lieu de 30 , car le programme était incapable d'afficher une courbe pour une telle valeur. Comme l'affichage se sert de la courbe en Z , l'échelon passe par la courbe 27.2 à $t = T$ et passe par la courbe de -9 V quelque nanosecondes plus tard comme précédemment.

Théoriquement, le coefficient de réflexion lorsque la ligne RG-58 est compensée par sa résistance intrinsèque doit être de 0 . Le régime transitoire pour une résistance de cet ordre est présenté à la figure 1.2(e). En analysant cette figure, il est possible de voir que le coefficient

est très proche de 0, car il n'y a aucune contribution positive ou négative due à une réflexion du signal. Le délai entre les deux signaux est bien présent comme prévu par la courbe en Z présenté à la figure 1.2(m). Tout ce que nous avons sur cette courbe est la droite de 27.2 qui va créer un délai dans le signal. De plus, il n'y a pas de différence entre la figure théorique (1.2(i)) et la figure expérimentale.

1.3 Projet 3

La courbe observée à l'oscilloscope est présentée à la figure 1.2. Le numéro de la charge utilisée est TOEM #1. On identifie graphiquement une forme de courbe $R - L$ série. Le V^+ est de 14V et le $2V^+$ d'environ 27V.

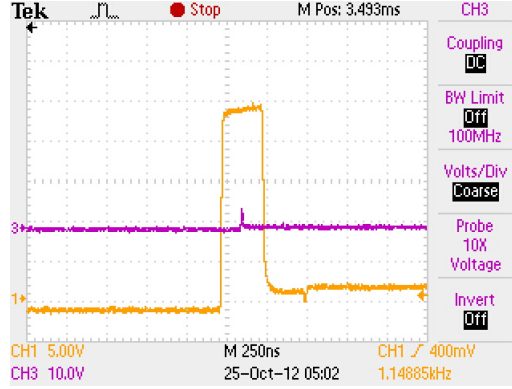


Figure 1.2 – Courbes obtenus à l'oscilloscope pour le projet 3 en utilisant une charge complexe

Calcul de R

En identifiant la valeur finale de la tension (après quelques constantes de temps), on peut déduire la valeur de R connaissant V^+ et Z_0 . On utilise l'équation suivante :

$$V_{finale} = V^+ \left(1 + \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \right) \quad (1.5)$$

On a que $V_{finale} = 3V$ et $Z_0 = 50\Omega$. On développe l'équation :

$$\begin{aligned} V_{finale} &= V^+ \left(1 + \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \right) \\ 3 &= 14 \left(1 + \frac{R - 50}{R + 50} \right) \\ R &= 6\Omega \end{aligned}$$

Calcul de τ

Connaissant maintenant R , on peut trouver τ au moyen d'un point dans la pente descendante de la courbe, selon l'équation suivante :

$$V_{t \leq \tau} = V^+ \left(\left(1 + \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \right) + \left(1 - \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \right) e^{-t/\tau} \right) \quad (1.6)$$

Pour $R = 6\Omega$, $Z_0 = 50\Omega$ et $V_{t=250ns} = 16$, on développe l'équation précédente :

$$\begin{aligned}
 16 &= 14 \left(\left(1 + \frac{6 - 50}{6 + 50} \right) + \left(1 - \frac{6 - 50}{6 + 50} \right) e^{-250 \times 10^{-9} / \tau} \right) \\
 0.5102 &= e^{-250 \times 10^{-9} / \tau} \\
 \tau &= \frac{1}{\frac{\ln(0.5102)}{-250 \times 10^{-9}}} \\
 \tau &= 371.497 [ns]
 \end{aligned}$$

Calcul de L

Connaissant maintenant τ , on peut déterminer l'inductance L au moyen de l'équation suivante :

$$\tau = \frac{L}{R + Z_0} \quad (1.7)$$

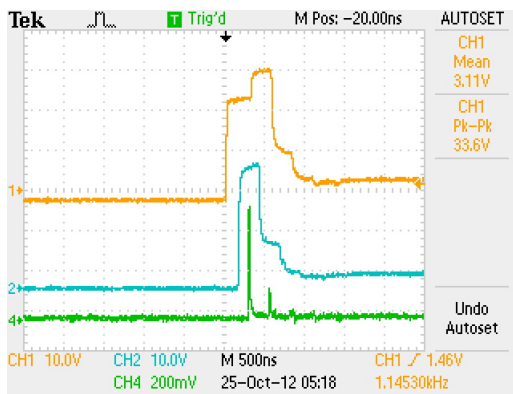
Pour $R = 6\Omega$, $Z_0 = 50\Omega$ et $\tau = 371.497 [ns]$, on développe l'équation précédente :

$$\begin{aligned}
 371.497 \times 10^{-9} &= \frac{L}{6 + 50} \\
 L &= 20.8 [\mu H]
 \end{aligned}$$

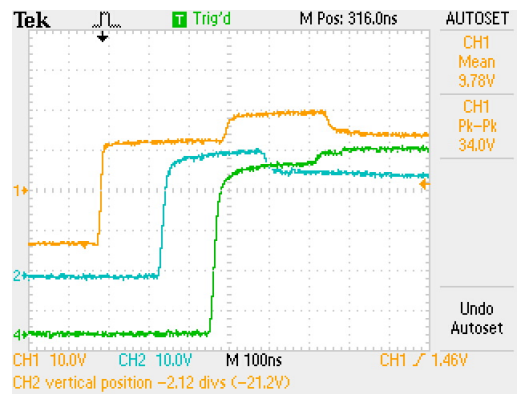
1.4 Projet 4

1.4.1 Tracé des régimes transitoires à l'oscilloscope

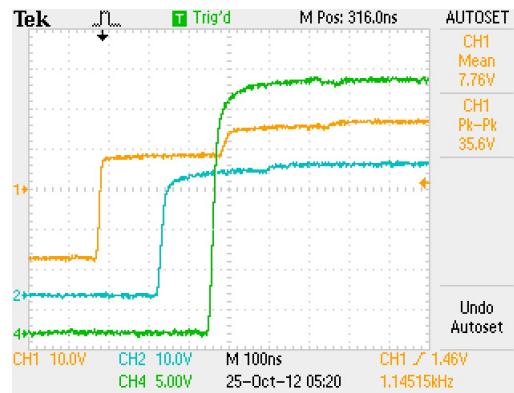
Nous avons réalisé le montage pratique tel qu'illustré à la figure 4 de l'énoncé de laboratoire. L'ordre des lignes de transmission a été respecté. Le tracé (à l'oscilloscope) des réponses transitoires obtenues pour des impédances de respectivement $0\ \Omega$, $50\ \Omega$ et $100\ \Omega$ sont présentées aux figures ci-dessous. Il est à noter que le signal vu de la source est sur le canal 1 (orange), que le signal vu à la jonction entre les deux lignes est sur le canal 2 (bleu) et que le signal vu de la charge est sur le canal 3 (vert).



(a) Régime transitoire vu de la source, à la jonction entre les lignes et à la charge pour $R = 0\ \Omega$



(b) Régime transitoire vu de la source, à la jonction entre les lignes et à la charge pour $R = 50\ \Omega$



(c) Régime transitoire vu de la source, à la jonction entre les lignes et à la charge pour $R = 100\ \Omega$

1.4.2 Calcul du coefficient de réflexion à la source

Pour calculer le coefficient de réflexion à la source, on utilise l'équation 1.1 en sachant qu'elle sera la même peu importe la charge :

$$\begin{aligned}\Gamma_g(s) &= \frac{50 - 50}{50 + 50} \\ &= 0\end{aligned}$$

1.4.3 Calcul du coefficient de réflexion du côté de la ligne # 1

On définit l'équation suivante et on la développe selon les valeurs connues

$$\begin{aligned}\Gamma_{11} &= \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \\ &= \frac{93 - 50}{93 + 50} \\ &= 0.3007\end{aligned}\tag{1.8}$$

1.4.4 Calcul du coefficient de réflexion du côté de la ligne # 2

On définit l'équation suivante et on la développe selon les valeurs connues

$$\begin{aligned}\Gamma_{22} &= \frac{Z_{01} - Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \\ &= \frac{50 - 93}{93 + 50} \\ &= -0.3007\end{aligned}\tag{1.9}$$

1.4.5 Calcul des coefficients de réflexion du côté des charges

Pour $R = 0\Omega$

$$\begin{aligned}\Gamma_c(s) &= \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \\ &= \frac{0 - 93}{0 + 93} \\ &= -1\end{aligned}$$

Pour $R = 50\Omega$

$$\begin{aligned}\Gamma_c(s) &= \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \\ &= \frac{50 - 93}{93 + 50} \\ &= -0.3007\end{aligned}$$

Pour $R = 100\Omega$

$$\begin{aligned}\Gamma_c(s) &= \frac{Z_c(s) - Z_0(s)}{Z_c(s) + Z_0(s)} \\ &= \frac{100 - 93}{100 + 93} \\ &= 0.0363\end{aligned}$$

1.4.6 Calcul du coefficient de transmission de la ligne # 1 vers la ligne # 2

On définit l'équation suivante et on la développe selon les valeurs connues

$$\begin{aligned}\tau_{12} &= (1 - \Gamma_{11}) \\ &= 1 - 0.3007 \\ &= 0.6993\end{aligned}\tag{1.10}$$

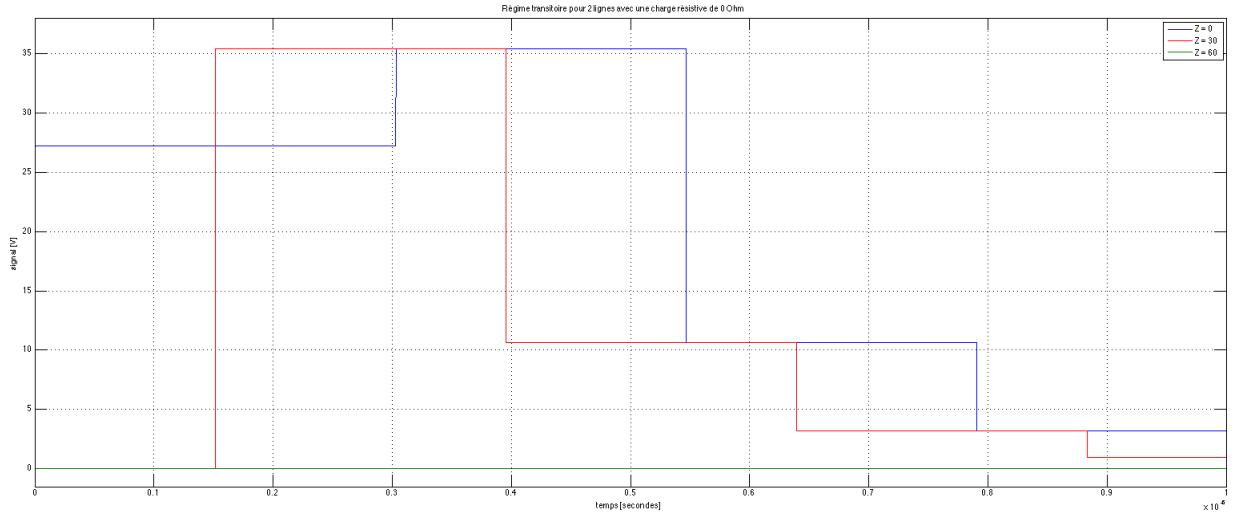
1.4.7 Calcul du coefficient de transmission de la ligne # 2 vers la ligne # 1

On définit l'équation suivante et on la développe selon les valeurs connues

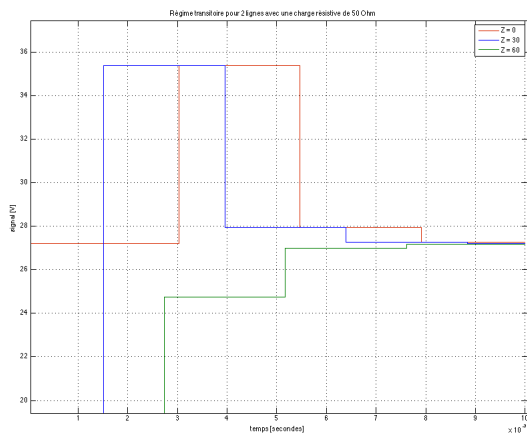
$$\begin{aligned}\tau_{21} &= (1 - \Gamma_{22}) \\ &= 1 + 0.3007 \\ &= 1.3007\end{aligned}\tag{1.11}$$

1.4.8 Régimes transitoires théoriques

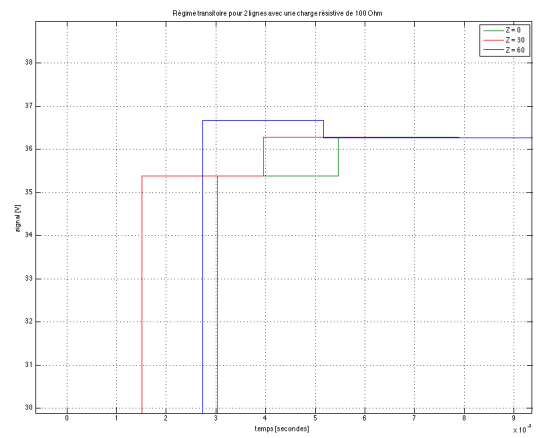
1.4.9 Diagrammes en z



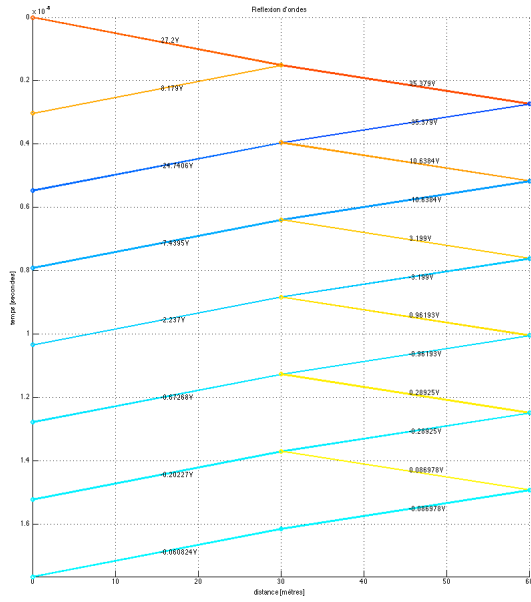
(d) Régime transitoire théorique vu de la source, à la jonction entre les lignes et à la charge pour $R = 0\Omega$



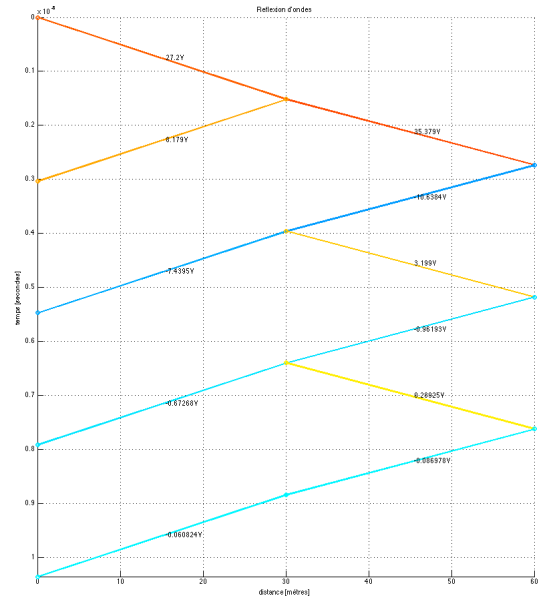
(e) Régime transitoire théorique vu de la source, à la jonction entre les lignes et à la charge pour $R = 50\Omega$



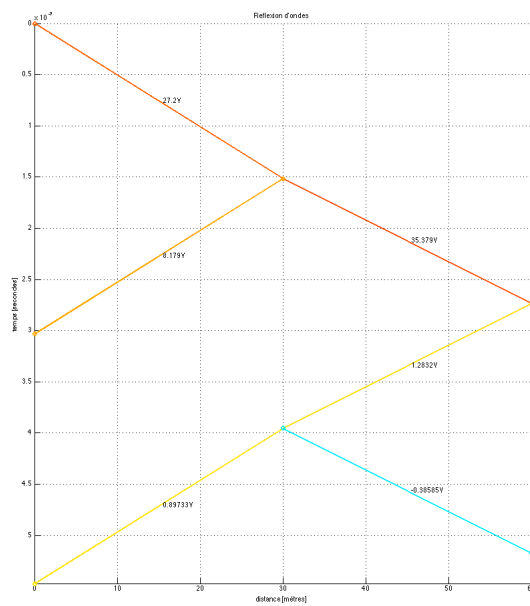
(f) Régime transitoire théorique vu de la source, à la jonction entre les lignes et à la charge pour $R = 100\Omega$



(g) Diagramme en z pour $R = 0\Omega$



(h) Diagramme en z pour $R = 50\Omega$



(i) Diagramme en z pour $R = 100\Omega$

1.4.10 Discussion

1.4.10.1 Régime transitoire

Les figures 1.3(a), 1.3(b) et 1.3(c) présentent les régimes transitoires pour diverses charges. Le code de couleur utilisé est toujours le même, tel que présenté à la section 1.4.1. Les figures 1.3(d), 1.3(e) et 1.3(f) présentent le pendant théorique des courbes mesurées expérimentalement. Pour ce qui est des courbes présentant le comportement du système avec une résistance $R = 0\Omega$, on note premièrement que la courbe théorique relatant le comportement de la tension vue à la source (la courbe bleue) suit le même comportement que celle mesurée expérimentalement. En dehors des limitations physiques de la source de tension, l'incurvation de la courbe expérimentale s'explique par la limite en bande passante de l'oscilloscope ainsi que par la présence d'impédances complexes dans le circuit.

Pour ce qui est de la tension vue à la première jonction, on remarque que le comportement est similaire à la théorie. Cependant, le système étudié présente les mêmes limitations.

On ne réussit malheureusement pas à afficher une courbe montrant la tension vue aux bornes de la charge, cependant, comme la montée théorique est très rapide et fait intervenir le comportement aux limites du logiciel, il est compréhensible qu'il soit difficile de l'afficher.

En ce qui concerne la résistance de 50Ω , le comportement est pratiquement similaire en tous points. Les transitions mesurées expérimentalement sont moins brusques, mais il est possible de déceler une forte corrélation entre les mesures expérimentale et la théorie.

Les courbes présentant le régime transitoire pour une résistance de 100Ω sont en tous points identiques. On voit que le modèle théorique prédit bien le comportement observé au laboratoire.

1.4.10.2 Diagrammes en z

Les figures 1.3(g), 1.3(h) et 1.3(i) présentent le diagramme en z pour différentes résistances placées en fin de ligne. On note que le minimum de réflexion est atteint pour une résistance de 100Ω . La résistance de 0Ω présente le nombre le plus élevé de réflexions, ce qui était prédit par les calculs et la théorie vue au cours. La résistance de 50Ω fournit un indice de réflexion moyen entre les deux valeurs extrêmes de résistance. Le nombre de réflexion est plus faible que celui avec une résistance de 0Ω , mais plus élevé que celui avec une résistance de 100Ω .

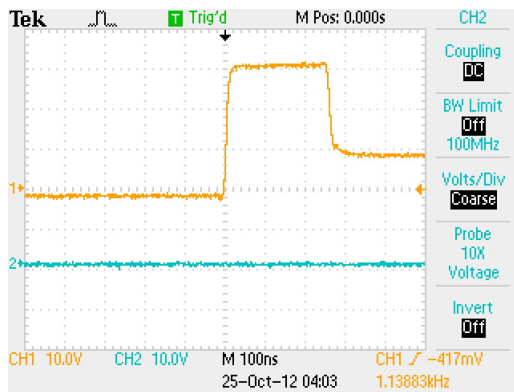
1.5 Conclusion

Les projets 1 à 4 témoignent de la véracité du modèle étudié. Les similitudes entre la théorie et l'expérimentation montrent que le modèle étudié est suffisant pour prédire le comportement expérimental des réflexions dans une ligne de transmission avec une ou plusieurs jonctions. Nous avons pu faire l'analyse transitoire des signaux pour différentes valeurs de résistance de charge et ainsi, vérifier les équations entourant les coefficients de réflexions ainsi que le modèle expérimental. Nous avons montré qu'il est possible d'identifier les différents paramètres d'une charge réactive en bout de ligne au moyen du projet 3. Aussi, lors du dernier projet, il fut possible de vérifier l'impact de l'ajout d'une jonction sur la forme des signaux à la source et aux différentes jonctions. De ce fait, il fut possible d'en tracer les diagrammes en z ainsi que les diagrammes théoriques associés, de manière à mieux saisir le comportement observé. L'ensemble du laboratoire nous a permis de nous familiariser avec la théorie et d'en comprendre les implications pratiques.

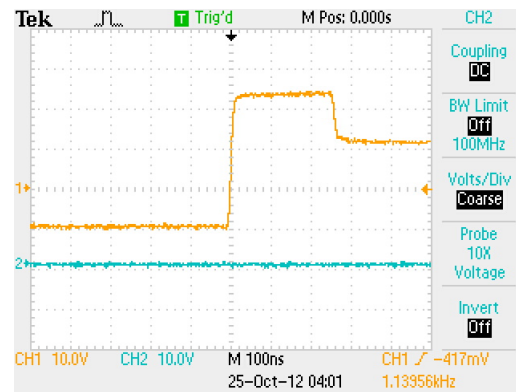
Annexe A

Projet 1

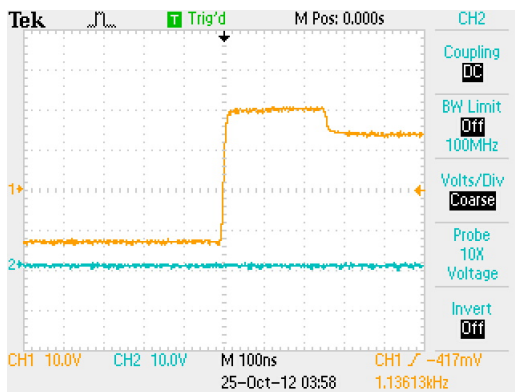
Les courbes présentées dans cet annexe sont présentées à titre formatif. Ces courbes nous ont aidé à mieux saisir l'impact d'une mauvaise adaptation de la charge sur les réflexions vues à la source.



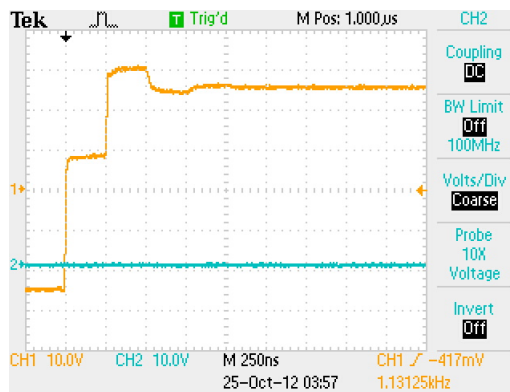
(j) Courbes de réflexion obtenue pour $R = 0\Omega$



(k) Courbes de réflexion obtenue pour $R = 27\Omega$



(l) Courbes de réflexion obtenue pour $R = 50\Omega$



(m) Courbes de réflexion obtenue pour $R = \infty$