



Compte Rendu

Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications

Electronique Analogique

TP3 : Lignes de transmission

2^{eme} Année

Année : 2023 - 2024

Camille Lanfredi

Rémi Weidle

1. Mesures de l'inductance et de la capacité linéiques de la ligne

Dans un premier temps, nous mesurons les valeurs caractéristiques du câble coaxial. Pour cela, nous utilisons un banc de mesure composé d'éléments passifs qui permet de mesurer l'impédance en fonction d'une certaine fréquence en module et phase. Nous obtenons ces valeurs.

$$C = 1.55nF, \text{ avec } \varphi_c = -90^\circ$$

$$L = 4.7\mu H, \text{ avec } \varphi_l = 73$$

Nous savons que le déphasage de la capacité est lié à l'impédance complexe $\frac{1}{jC\omega}$. Quant à l'impédance de la bobine, elle devrait être en opposition de phase à celle de la capacité, soit $+90^\circ$.

Or, nous notons une différence entre la valeur théorique et expérimentale. Cela est dû à la présence de pertes résistives.

De plus, nous devons prendre en compte la longueur du câble de 15 mètres. Cela équivaut à 15 câbles de 1 mètre en parallèle. Donc pour obtenir les valeurs linéiques, nous devons diviser les valeurs obtenues par le nombre de lignes d'un mètre.

$$C = \frac{1.55 * 10^{-9}}{15} = 103pF/m$$

$$L = \frac{4.7}{15} = 300nH/m$$

En outre, pour calculer la résistance de ligne, nous utilisons son expression :

$$R_L = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}} = \sqrt{\frac{4700}{1.55}} = 55\Omega$$

Lors des essais, nous nous plaçons à une fréquence de 100kHz. Cela nous permet d'être des conditions de milieu de ligne et de modéliser une ligne courte de 15 mètres.

$$Ligne_{courte} = \frac{L}{\lambda} = \frac{L}{\frac{vitesse\ de\ phase}{F}} = \frac{L}{\frac{c}{F}}$$

Avec : c = vitesse de la lumière

Donc

$$\lambda < \frac{c}{F} \text{ et } \lambda = \frac{L * c}{F} \ll 1$$

$$F < \frac{c}{L} = \frac{2 * 10^8}{15}$$

$$F < 20MHz$$

C'est pour cela que nous nous plaçons à des centaines de kHz.

2. Etude en régime impulsionnel

Désormais, nous allons observer les réflexions multiples pour différentes configurations de ligne fermée. Pour chaque cas, nous allons en plus déterminer :

- La distance de propagation
- Le temps de propagation
- La vitesse de propagation
- Le coefficient de réflexion

1^{er} cas : Circuit ouvert

Pour réaliser ce montage, nous appliquons à l'aide d'un GBF, une tension d'entrée de ligne de 500 mVpp.

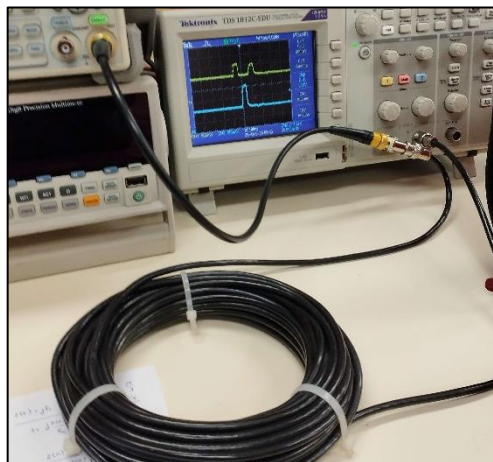


Fig1.Photo du montage en circuit ouvert

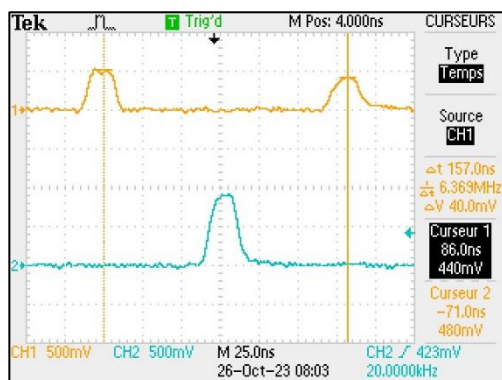


Fig2.Mesure du temps aller - retour

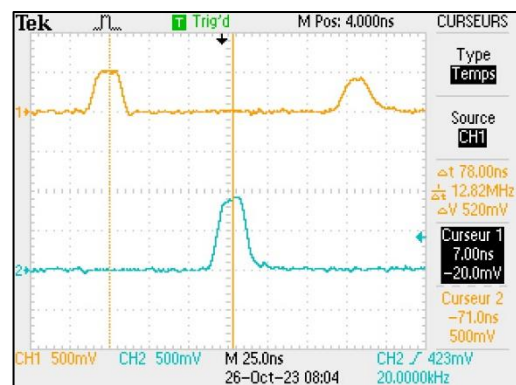


Fig3. Mesure du temps d'aller

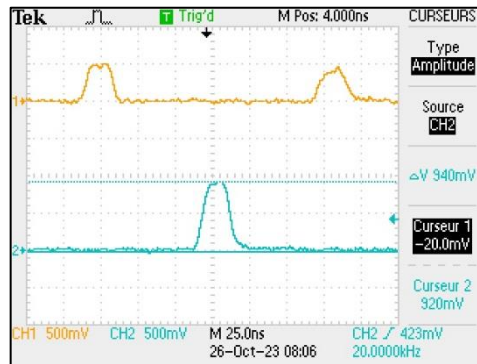


Fig4. Mesure de l'amplitude de l'impulsion de fin de ligne

Comme nous pouvons le voir, nous obtenons :

- Un temps de propagation : 157 ns (Aller-Retour), ce qui correspond à 30m de ligne
78 ns (Aller), ce qui correspond à 15m de ligne
- Une tension d'entrée de ligne de 520mV, correspondant à la première impulsion (jaune) puis une seconde impulsion de retour de ligne a 420mV (jaune).
- Une impulsion de fin de ligne (15m) de 940mV (en bleu), correspondant à la somme des impulsions d'aller et retour de ligne.
- La vitesse de propagation : $v = \frac{30m}{157ns} = 1,91 * 10^8 m/s$. Ce qui est bien inférieur et proche de la vitesse de la lumière.

Les temps de propagation nous permettent de déterminer le coefficient de réflexion :

$$Coeff_{réflexion} = \frac{V_{retour}}{V_{aller}} = \frac{420}{520} = 0,8$$

En théorie, le coefficient de réflexion d'un circuit ouvert est très proche de 1, car l'extrémité d'une ligne de transmission n'est pas connectée à une charge. Lorsqu'un signal électrique se déplace le long de la ligne et atteint le circuit ouvert, une grande partie de son énergie est réfléchi. Cette réflexion est influencée par la différence d'impédance entre la ligne de transmission et la charge ($R_L = \infty$). Cette différence élevée d'impédance entraîne une réflexion presque totale du signal, renvoyant presque toute son énergie dans la direction opposée.

Donc un coefficient de réflexion proche de 1, indiquant que pratiquement toute l'énergie du signal est réfléchi.

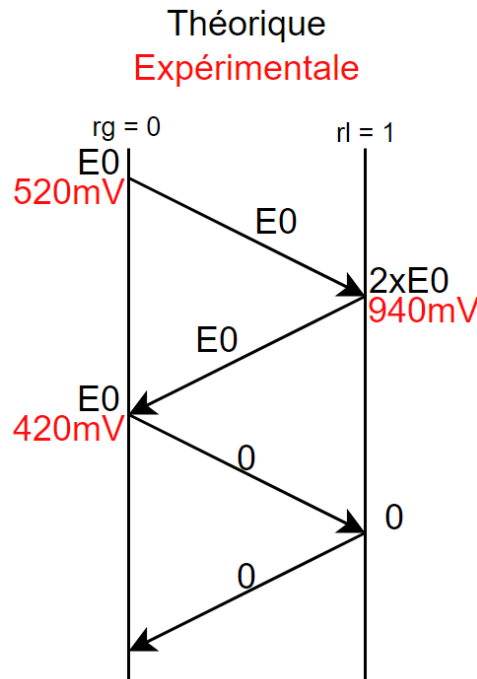
Pour vérifier nos résultats, nous utilisons la méthode du tableau. Pour cela, nous devons déterminer 2 choses : la résistance de charge et la résistance de générateur. D'après le cours, en circuit ouvert, le coefficient de charge est égal à 1.

$$\Gamma_{\ell} = \frac{R_{\ell} - R_c}{R_{\ell} + R_c} \quad R_{\ell} = \infty \Rightarrow \Gamma_{\ell} = +1$$

Quant au coefficient de réflexion du générateur :

$$\Gamma_g = \frac{r_g - r_c}{r_g + r_c} = \frac{50 - 55}{50 + 55} = 0,0476 = 0,05$$

Nous pouvons donc utiliser la méthode du tableau :



Nous pouvons voir que les deux modèles sont quasiment identiques. La différence de valeurs entre les signaux « aller-retour » est dû, bien évidemment, à la résistance de ligne de 50Ω .

2^e cas : Court-circuit

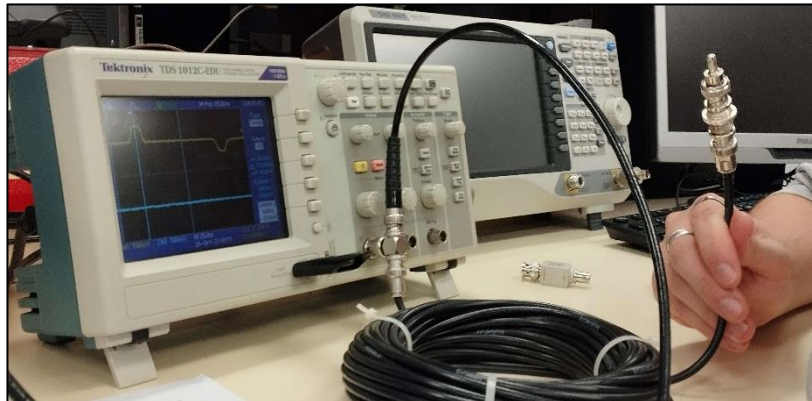


Fig5.Photo du montage en court circuit

Un court-circuit sur une ligne de transmission se produit lorsqu'une extrémité de la ligne est en contact avec une impédance très basse ou égale à zéro. Cela crée une discontinuité dans la ligne de transmission.

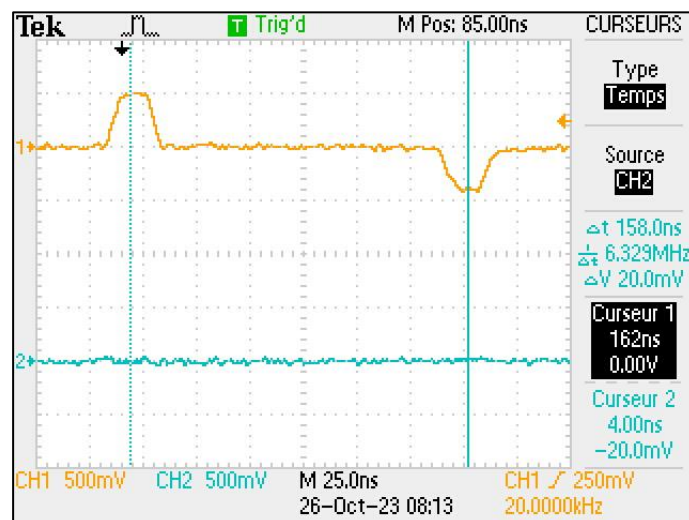


Fig6. Représentation des signaux en court-circuit et Mesure du temps de propagation

Comme nous pouvons le voir, nous obtenons :

- Un temps de propagation : 158 ns (Aller-Retour), ce qui correspond à 30m de ligne
- Une tension d'entrée de ligne de 520mV, correspondant à la première impulsion (jaune) puis une seconde impulsion de retour de ligne a - 420mV (jaune).
- Une impulsion de fin de ligne (15m) de 940mV (en bleu), correspondant à la somme des impulsions d'aller et retour de ligne.
- La vitesse de propagation : $v = \frac{30m}{158ns} = 1,9 * 10^8 m/s$. Ce qui est bien inférieur et proche de la vitesse de la lumière.

Les temps de propagation nous permettent de déterminer le coefficient de réflexion :

$$Coeff_{réflexion} = \frac{V_{retour}}{V_{aller}} = \frac{-420}{520} = -0,8$$

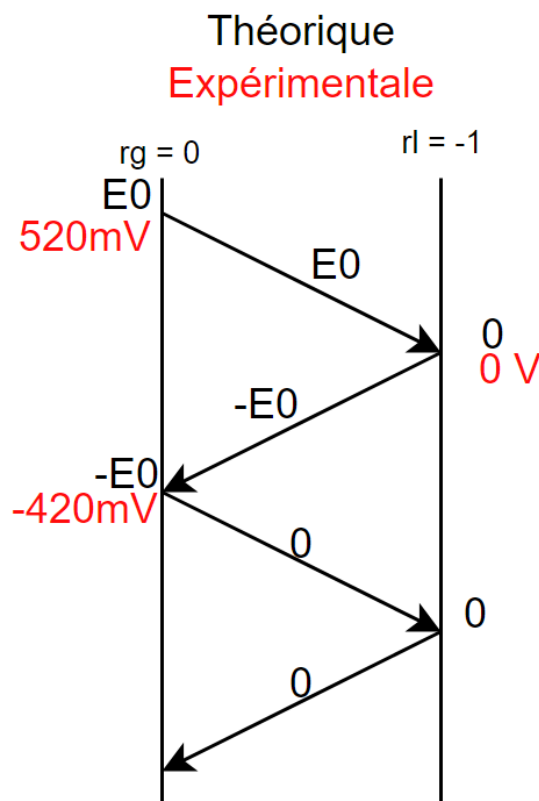
Cette énorme différence d'impédance entraîne une réflexion totale du signal, mais cette fois-ci avec un renversement de phase. En conséquence, le coefficient de réflexion est de -1. Cela signifie que le signal est inversé (déphasé de 180 degrés) lorsqu'il est réfléchi à partir du court-circuit. Il se produit une annulation complète du signal incident et du signal réfléchi en amplitude et en phase. C'est pour cela qu'il n'y a pas de signal sur la voie 2 (en bleu) (signal incident ou signal de fin de ligne).

Pour vérifier nos résultats, nous utilisons la méthode du tableau. Pour cela, nous devons déterminer 2 choses : la résistance de charge et la résistance de générateur. D'après le cours, en circuit ouvert, le coefficient de réflexion est de -1.

$$\Gamma_{\ell} = \frac{R_{\ell} - R_c}{R_{\ell} + R_c} \quad R_{\ell} = 0 \Rightarrow \Gamma_{\ell} = -1$$

Quant au coefficient de réflexion du générateur :

$$\Gamma_g = \frac{r_g - r_c}{r_g + r_c} = \frac{50 - 55}{50 + 55} = 0,0476 = 0,05$$



Nous pouvons voir que les deux modèles sont quasiment identiques. La différence de valeurs est du bien évidemment à la résistance de ligne de 50 Ω .

3^e cas : charge adaptée

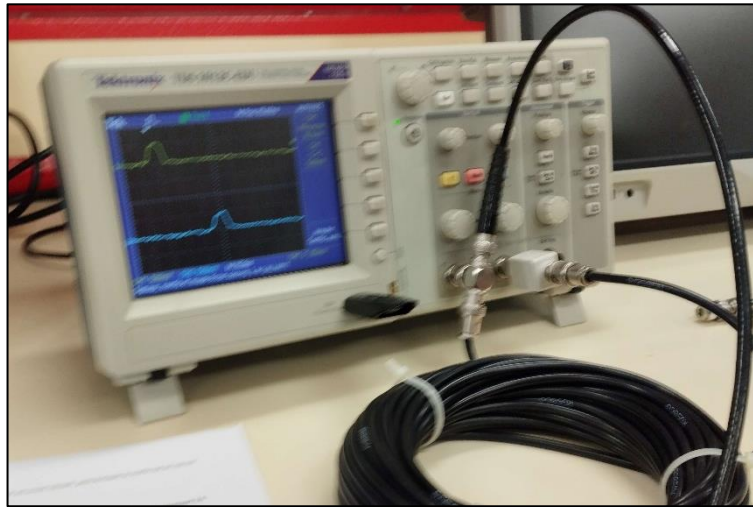


Fig7.Photo du montage en charge adaptée

En présence d'une charge adaptée sur une ligne de transmission, le phénomène de réflexion est différent de celui observé avec un court-circuit ou un circuit ouvert. Une charge adaptée sur une ligne de transmission signifie que l'impédance de la charge est égale à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission. Dans cette situation, il n'y a pas de discontinuité d'impédance à l'extrémité de la ligne.

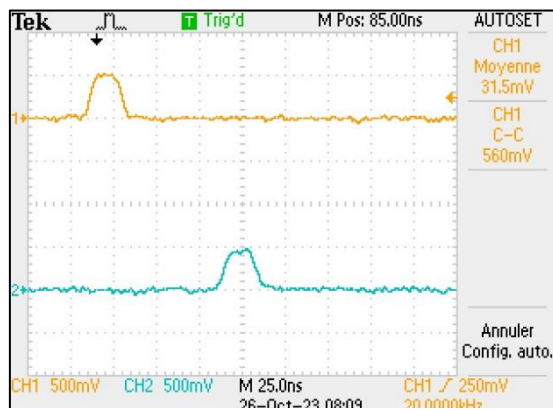


Fig8.Chronogramme des signaux en charge adaptée

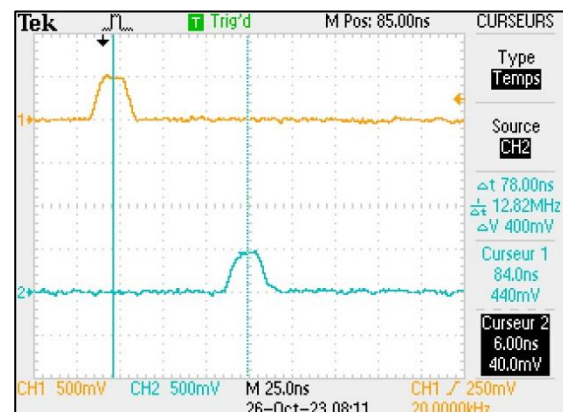


Fig9.Mesure du temps de propagation

Comme nous pouvons le voir, nous obtenons :

- Un temps de propagation : 78 ns (Aller), ce qui correspond à 15m de ligne
- Une tension d'entrée de ligne de 520mV, correspondant à la première impulsion (jaune) puis une seconde impulsion de retour de ligne a 420mV (jaune).
- Une impulsion de fin de ligne (15m) de 520mV (en bleu), qui est identique à l'impulsion d'entrée car somme de l'impulsion d'aller et retour (520mV + 0).
- La vitesse de propagation : $v = \frac{15m}{78ns} = 1,92 * 10^8 m/s$. Ce qui est bien inférieur et proche de la vitesse de la lumière.

Les temps de propagation nous permettent de déterminer le coefficient de réflexion :

$$Coeff_{réflexion} = \frac{V_{retour}}{V_{aller}} = \frac{0}{520} = 0$$

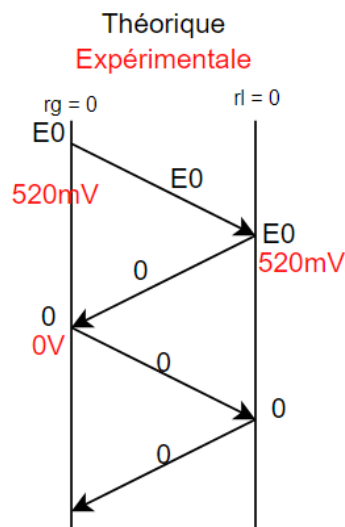
Lorsqu'un signal se propage le long de la ligne de transmission et atteint une charge adaptée, le coefficient de réflexion est de 0. Cela se produit lorsqu'il n'y a pas de différence d'impédance entre la ligne et la charge, donc il n'y a pas de réflexion d'énergie. Quand le signal atteint la charge adaptée, toute l'énergie du signal est absorbée par la charge et aucune énergie n'est renvoyée en arrière dans la ligne de transmission. Ainsi, le coefficient de réflexion est nul.

Pour vérifier nos résultats, nous utilisons la méthode du tableau. Pour cela, nous devons déterminer 2 choses : la résistance de charge et la résistance de générateur. D'après le cours, en circuit ouvert, le coefficient de réflexion est de 0.

$$\Gamma_L = \frac{R_L - R_c}{R_L + R_c} \quad R_L = R_c \Rightarrow \Gamma_L = 0$$

Quant au coefficient de réflexion du générateur :

$$\Gamma_g = \frac{r_g - r_c}{r_g + r_c} = \frac{50 - 55}{50 + 55} = 0,0476 = 0,05$$



4^e cas : Résistance en parallèle du générateur

Dans ce cas, nous voulons, à l'aide d'une résistance de 18Ω en parallèle sur le générateur, faire en sorte de transformer le générateur d'impulsions en générateur d'impédance interne $13,2 \Omega$.

4^e.1 cas : Circuit ouvert

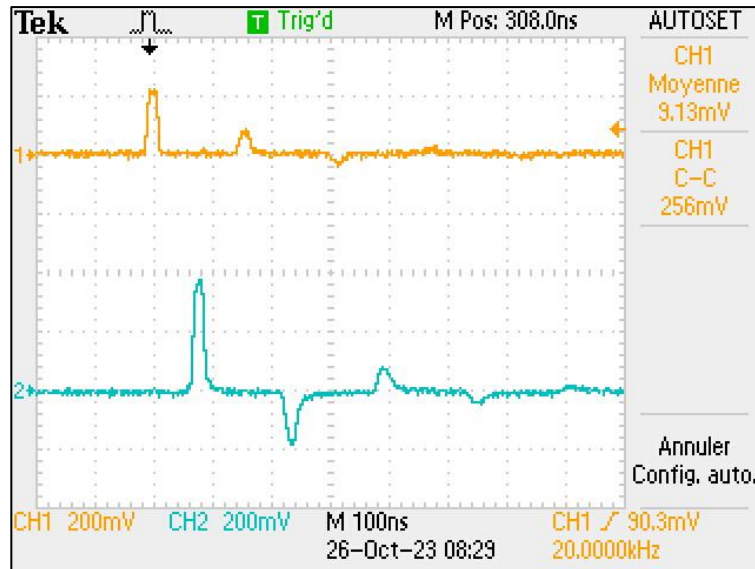


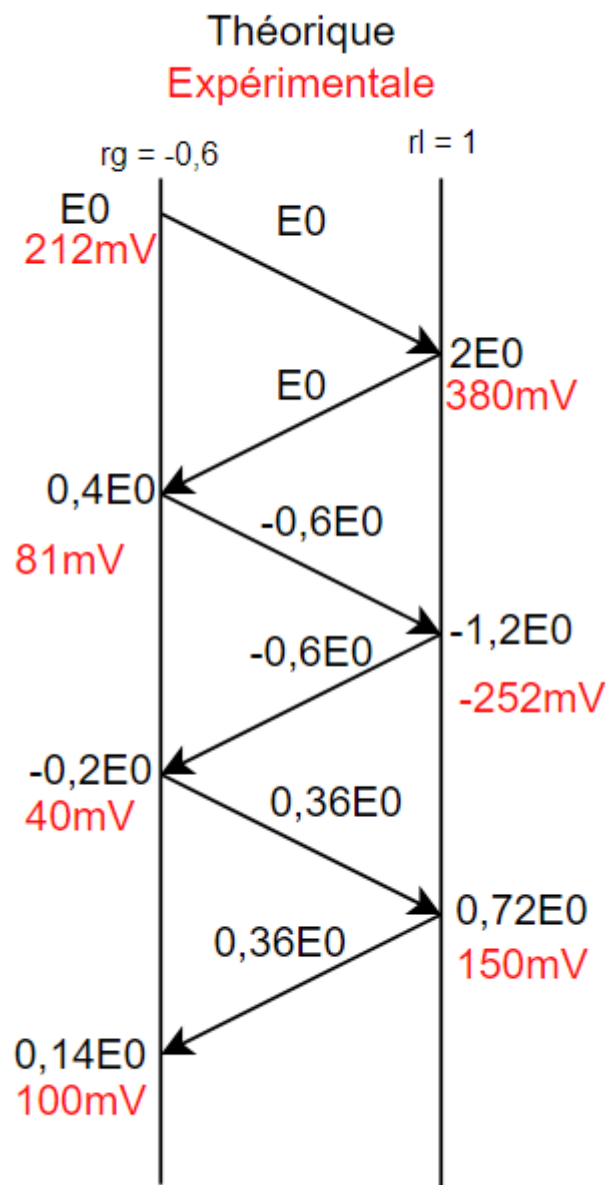
Fig10. Chronogrammes des signaux de sortie de lignes en circuit ouvert

Nous pouvons observer que les amplitudes des réflexions tendent vers zéro. De plus, nous notons que les réflexions s'alternent entre positive puis négative puis positive de nouveau.

Cela se vérifie par la méthode du tableau :

$$\Gamma_g = \frac{r_g - r_c}{r_g + r_c} = \frac{13,2 - 55}{13,2 + 55} = -0,6$$

$$\Gamma_\ell = \frac{R_\ell - R_c}{R_\ell + R_c} \quad R_\ell = \infty \Rightarrow \Gamma_\ell = +1$$



4^e.2 cas : Court-circuit

Puis nous utilisons le montage en court-circuit.



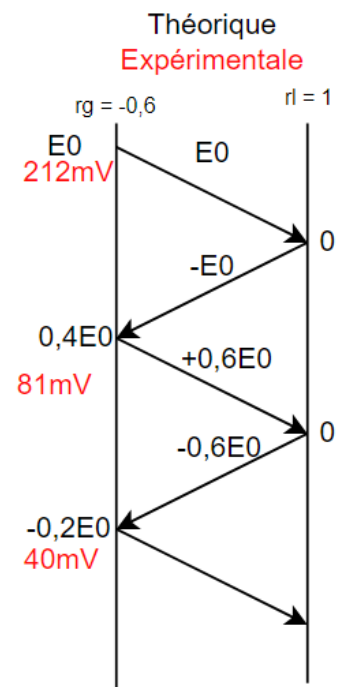
Fig11. Chronogrammes des signaux de sortie de lignes en court circuit

Nous pouvons observer que le signal présente uniquement des réflexions négatives. Cela n'est pas tout à fait et nous le verrons avec la méthode du tableau. Normalement à la suite d'une réflexion négative se trouve une réflexion positive.

Méthode du tableau :

$$\Gamma_{\ell} = \frac{R_{\ell} - R_c}{R_{\ell} + R_c} \quad R_{\ell} = 0 \Rightarrow \Gamma_{\ell} = -1$$

$$\Gamma_g = \frac{r_g - r_c}{r_g + r_c} = \frac{13,2 - 55}{13,2 + 55} = -0,6$$



3. Simulation des variations de tension sur la ligne d'alimentation d'un composant consommant 1A de façon impulsionnelle

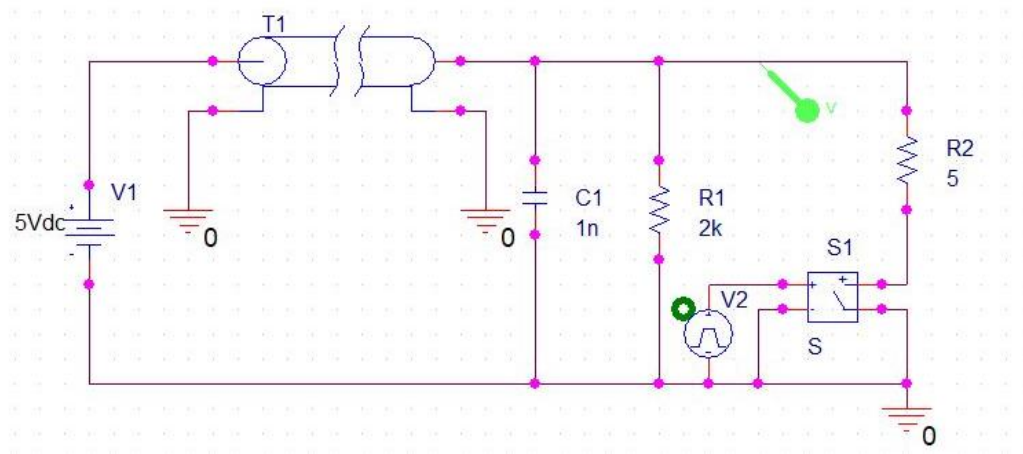


Fig12. Schéma électrique du montage

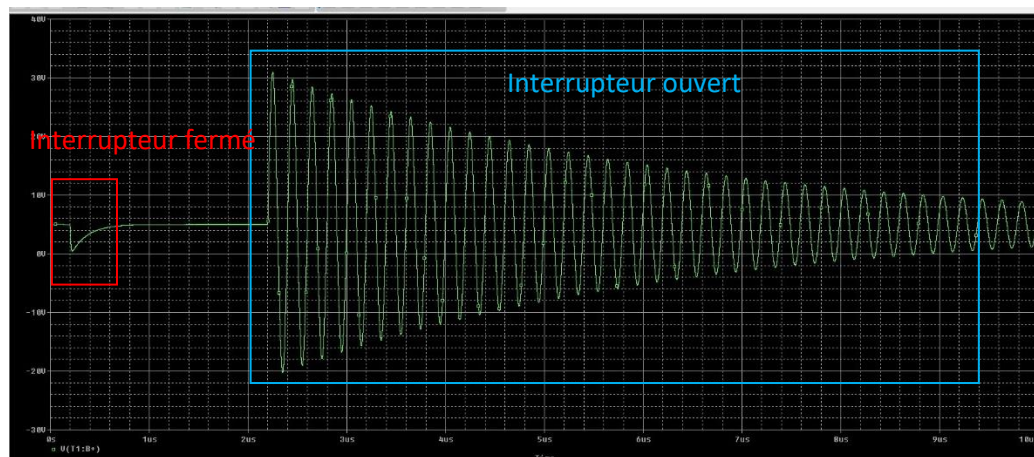


Fig13. Chronogramme des variations de tension sur la ligne

Pour bien configurer le « step ceiling », il faut qu'il soit bien inférieur au temps de propagation. Quelques nanosecondes sont suffisantes.

A la fermeture de l'interrupteur, la résistance de la ligne est chargée car elle se comporte comme une inductance. Cela donne une réponse à un circuit LR de 1^{er} ordre. A l'ouverture, nous avons une capacité et une inductance, ce qui correspond à un circuit du 2^e ordre avec une réponse peu amortie.

Le condensateur C6 permet de moduler la période des oscillations. Donc quand C6 se décharge le nombre de réflexions diminue.

Quant à la comparaison avec la production d'un arc électrique lors de l'ouverture d'un circuit parcouru par un fort courant continu, cela peut générer des transitoires très intenses, provoquant des pics de tension considérables lors de la rupture du circuit. Ces pics sont dus à l'inductance du circuit et aux propriétés de stockage d'énergie des éléments du circuit.

4. Etude en régime indiciel

1^{er} cas : Circuit ouvert

Dans un premier temps, nous envoyons un indice d'amplitude 1V dans la ligne coaxial de 15 mètres.

Puis, une fois le signal diffusé dans la ligne voici le signal de sortie :

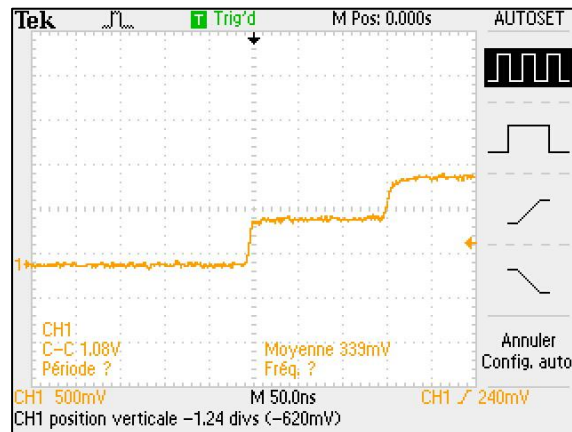


Fig14. Chronogramme de sortie de ligne agrandi

En sortie de ligne, nous pouvons observer que le signal est en forme d'escalier. Cela est normal car il représente 2 indices. Le premier indice (1^{ère} marche) correspond au signal envoyé/généré. Le second indice (2^e marche) correspond au signal réfléchi. Il y a addition des 2 échelon car nous sommes en circuit ouvert. Donc un coefficient de réflexion de 1.

2^e cas : Court-circuit (Bonus)

Comme dans le premier cas, nous envoyons le même indice d'amplitude 1V dans la ligne coaxial de 15 mètres.

Puis, une fois le signal diffusé dans la ligne voici le signal de sortie :

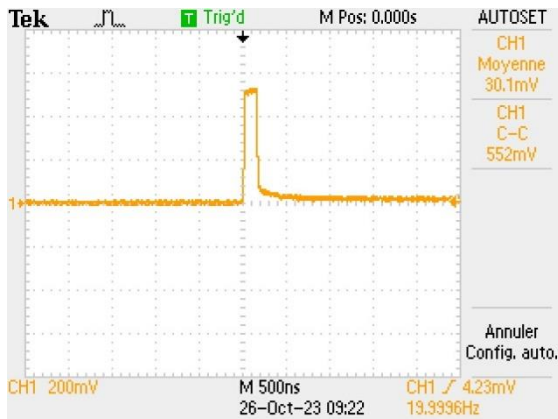


Fig15. Chronogramme de sortie de ligne brute

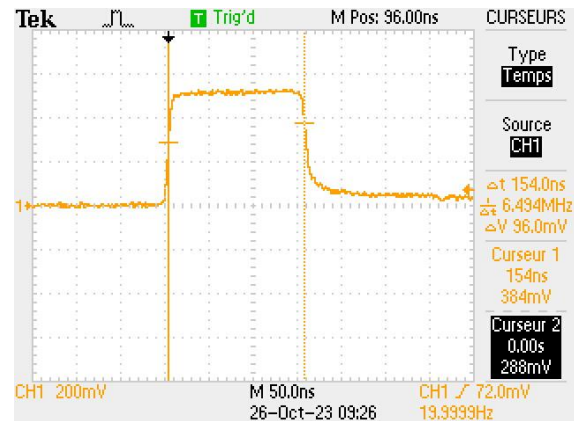


Fig16. Chronogramme de sortie de ligne agrandit

Nous pouvons observer, après avoir diminuer l'échelle de temps, un signal ayant la même amplitude mais d'une durée de 154ns. Il ne faut pas oublier que notre ligne est en court-circuit. Cela signifie que le coefficient de réflexion est de -1 et qu'il n'y a pas de signal incident car c'est le **phénomène de superposition**. En dehors, le signal envoyé est annulé par la superposition avec celui renvoyé.

L'indice représente donc « l'aller et retour » du signal. Cela se voit sur la « Fig16. Chronogramme de sortie de ligne agrandit », le signal dure exactement 154ns soit le temps de propagation du signal réfléchi ou de la ligne de 30 mètres.

Cela permet d'obtenir des impulsions par des signaux carrés en choisissant, une longueur de ligne et un temps de propagation au préalable. Comme cela, le temps de propagation donnera la largeur d'impulsion. Cela permet de moduler les largeurs d'impulsion et donc de faire des impulsions extrêmement petites pour des applications précises.

3^e cas : Charge adaptée

Comme dans le premier cas, nous envoyons le même indice d'amplitude 1V dans la ligne coaxial de 15 mètres.

Puis, une fois le signal diffusé dans la ligne voici le signal de sortie :

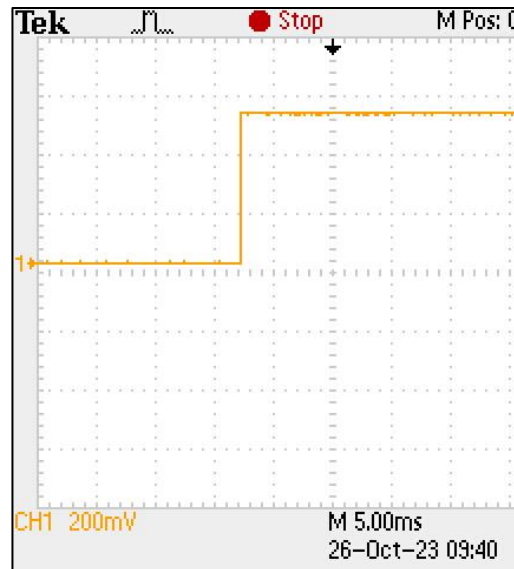


Fig17. Chronogramme de sortie de ligne

Nous pouvons observer que le signal de sortie de ligne est identique au signal d'entrée de ligne avec une amplitude 2 fois plus petite. Nous pouvons noter qu'il n'y a pas de réflexion car nous en charge adaptée. La charge permet de rendre l'effet de réflexion négligeable.