

P6 - Propagation des ondes dans différents domaines de la physique ; application au câble coaxial

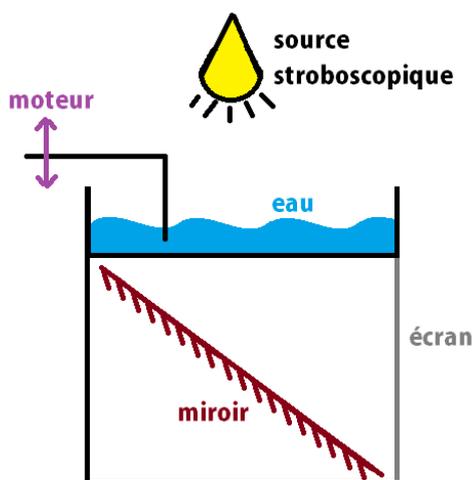
Une onde est une oscillation se propageant de proche en proche dans un milieu, ou éventuellement dans le vide dans le cas d'ondes électromagnétiques. Dans chaque cas il n'y a pas de transport de matière mais simplement déplacement d'énergie.

Durant ce montage, nous étudierons les types d'ondes associées aux différents domaines de la physique. Ceci nous permettra d'étudier les caractéristiques et propriétés d'une onde en général. Pour finir nous étudierons en détail la propagation des ondes électromagnétiques dans un câble coaxial.

1. LA PROPAGATION LIBRE

1.1. Mise en évidence de la propagation d'une onde / Domaine mécanique

(Duffait)



On étudie les ondes formées à la surface d'une cuve contenant 6 à 8 mm d'eau. Elles sont générées par un moteur relié à une pointe au contact de la surface. Le fond de la cuve étant transparent, on projette l'image de la surface sur un écran au moyen d'un miroir et d'une lampe stroboscopique dont on peut régler la fréquence.

NB : Il est impératif de s'assurer que la cuve est disposée parfaitement horizontalement à l'aide d'un niveau à bulle.

Dans un premier temps, on détermine le grandissement du système en posant un objet de taille connue sur la surface de la cuve au repos.

objet : 210mm image de l'objet : 392mm

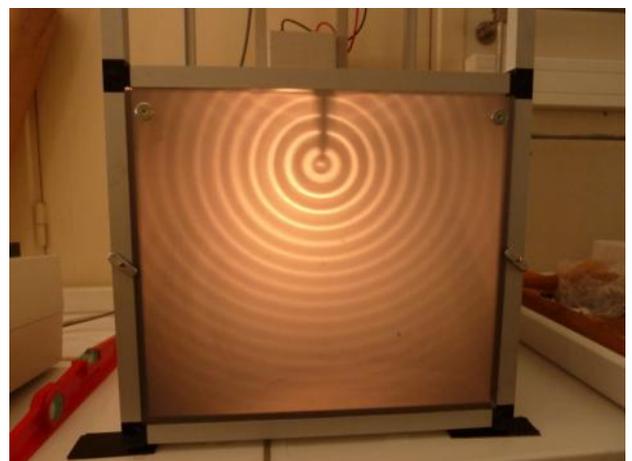
On allume le moteur à une fréquence $f = 25$ Hz. En laissant la lumière allumée de façon continue observe les rides sombres (maxima de l'onde) et claires (minima de l'onde) se déplaçant rapidement à l'écran. Le stroboscope permet d'observer plus attentivement la propagation de **l'onde mécanique** en nous donnant l'impression de « ralentir » le mouvement. Les ondes observées sont qualifiées de transversales : leur direction de propagation (horizontale) est perpendiculaire à la direction de la perturbation (verticale).

Afin de pouvoir réaliser des mesures, on règle l'éclairage stroboscopique à la même fréquence que les oscillations. L'image apparaît alors « figée » grâce à la persistance rétinienne. On définit la longueur d'onde comme étant la distance séparant deux maxima (ou minima) consécutifs à un instant donné.

On mesure la distance entre 9 rides (afin de minimiser

l'incertitude sur la mesure). On a donc

$$\lambda = \frac{210\text{mm}}{392\text{mm}} \frac{112\text{mm}}{9} = 6,67\text{mm}.$$



Une onde se caractérise aussi par sa fréquence (réglable sur le moteur mais aussi déterminable à l'aide du stroboscope lorsque l'image paraît figée) et la période de ses oscillations ($T = \frac{1}{f}$).

1.2. Mesure de la vitesse de propagation

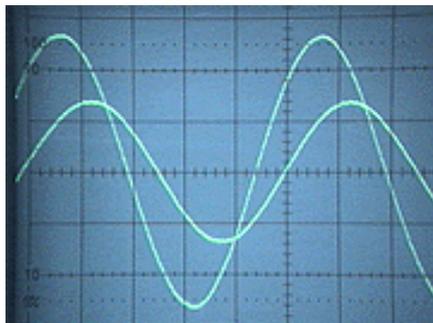
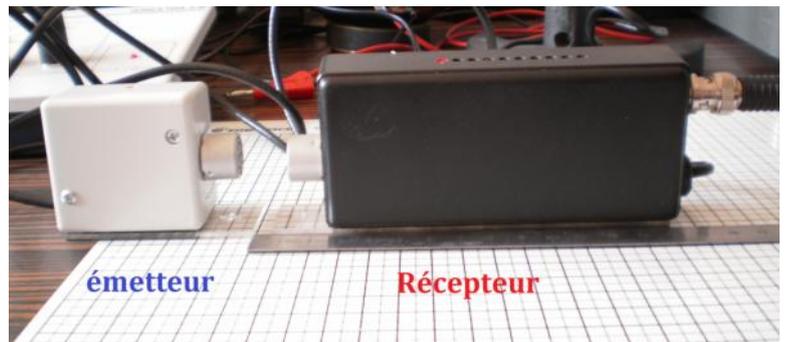
a) Onde transversale

La vitesse de propagation est liée à la longueur et à la fréquence de l'onde considérée. On a $v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$.

En reprenant l'expérience de la cuve à onde, on en déduit la vitesse de propagation de l'onde mécanique dans l'eau comme étant $v = 0,167 \text{ m/s}$.

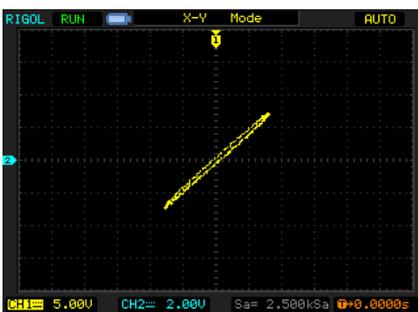
b) Onde longitudinale / Domaine acoustique

Les ultrasons sont des **ondes acoustiques** de fréquences élevées les rendant inaudibles (ici l'émetteur est paramétré sur 40 kHz). Les ultrasons se propagent dans une direction unique. Il est impératif de bien aligner émetteur et récepteur. Une règle permet de suivre l'écart les séparant.

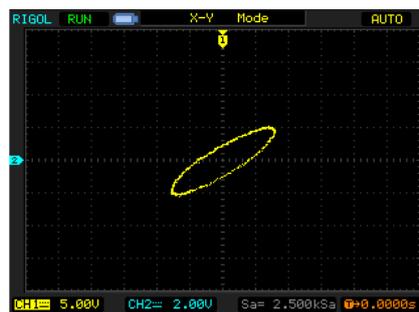


Si on affiche les deux signaux (celui émis et celui reçu) sur un oscilloscope, on observe un déphasage dû à la distance séparant les deux dispositifs. Ceci va permettre de mesurer la célérité des ondes sonores.

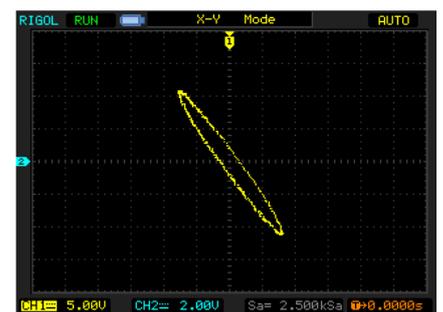
Une étude du déphasage est plus aisée lorsque l'on passe en mode XY sur l'oscilloscope. On commence par positionner le récepteur (l'émetteur étant fixé) de telle façon à ce que les signaux soient en phase. Ensuite éloigne le récepteur jusqu'à les retrouver à nouveau en phase. La distance parcourue correspond à la longueur d'onde λ du signal.



$$\varphi = 0$$



$$\varphi > 0$$



$$\varphi = \pi$$

Afin de minimiser les erreurs de mesure, on mesure plusieurs longueurs λ :

$$8\lambda = 7,1\text{cm} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = 8,88 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

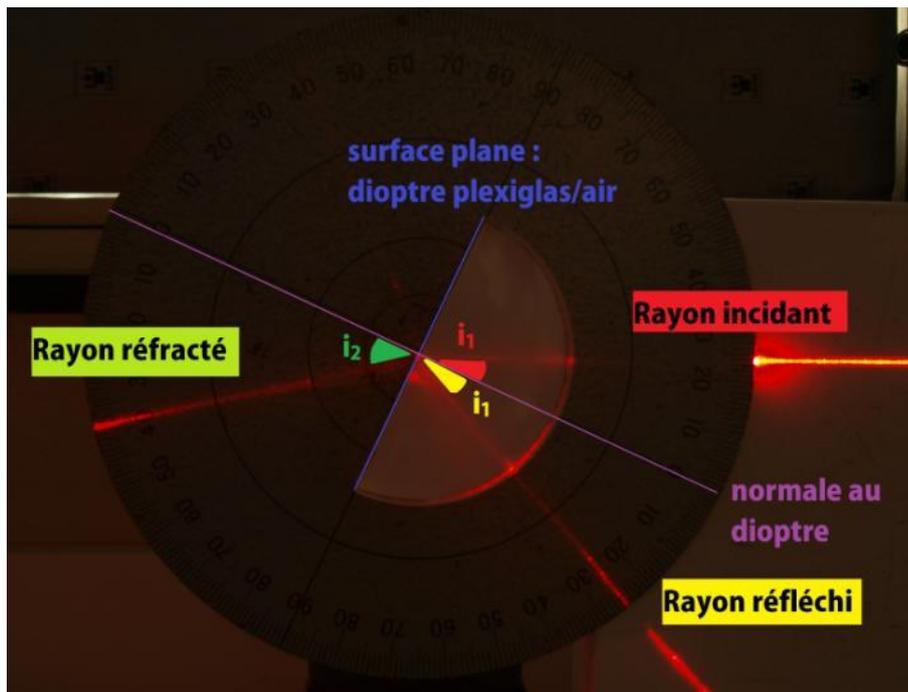
donc $c = \lambda \cdot f$ nous donne $c = 355\text{m/s}$

Cette valeur est proche de la valeur tabulée de 341m/s dans les conditions standards d'expérimentation.

La célérité des ondes acoustiques dans un milieu homogène est donnée par la formule $c = \sqrt{\rho \cdot \chi_s}$ où ρ est la masse volumique du milieu et χ_s le coefficient de compressibilité adiabatique ($\chi_s = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial p}{\partial v}$). Ainsi plus un milieu est dense et plus le son se propage vite.

1.3. Phénomène de réfraction / Domaine de l'optique géométrique

On choisit de travailler avec un laser car cela nous permet d'avoir un faisceau lumineux relativement fin et surtout non divergeant. On peut donc en observer la trajectoire facilement. Le laser fait partie d'un équipement magnétique que l'on fixe sur un tableau. On place un demi-cylindre de plexiglas sur sa trajectoire. Celui-ci peut tourner librement et un rapporteur permet de mesurer l'angle que fait un rayon avec la normale de sa surface plane.



Propriétés du rayon lumineux :

- On constate que les rayons observés sont tous des segments de droite. *Dans un milieu homogène, un rayon lumineux a une trajectoire rectiligne uniforme.*
- Ce n'est qu'à l'interface plexiglas/air que le rayon comporte différemment. Un rayon réfracté et un rayon réfléchi apparaissent. *Lors de la traversée d'un **dioptre** (interface entre deux milieux homogènes différents), la trajectoire d'un rayon est altérée.*

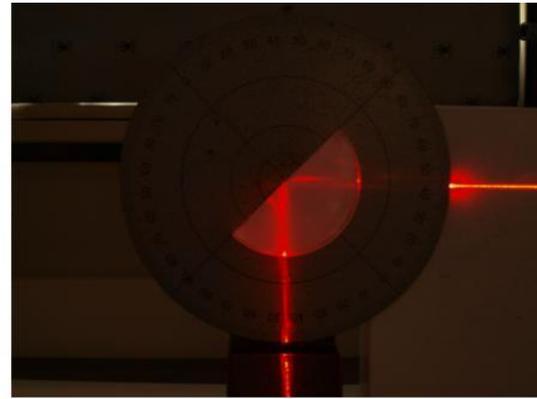
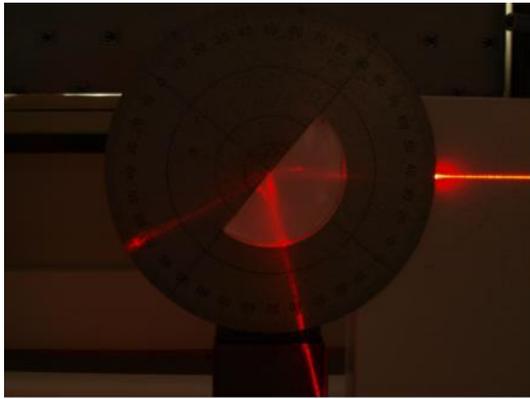
Comme pour un miroir, les rayons incident et réfléchi forment un même angle avec la normale du dioptre.

La **loi de Snell-Descartes** relie l'angle d'incidence i_1 à l'angle réfracté i_2 : $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

où les n_i sont les indices des deux milieux de part et d'autre du dioptre. Ces indices sont liés à la célérité de la lumière dans le milieu par la relation $v_i = \frac{c}{n_i}$, c étant la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

NB : Le premier dioptre (air/plexiglas) n'a pas d'action sur le rayon car celui-ci le coupe perpendiculairement. Les relations ci-dessus restent effectivement valables.

On fait progressivement tourner le disque et on s'aperçoit que le rayon réfracté se rapproche progressivement de la surface du dioptre jusqu'à y disparaître. On dit alors qu'il y a **réflexion totale**.



On introduit ainsi la notion d'**angle limite de réfraction** θ . A cette limite on a la relation $n_1 \sin(i_1) = n_2$. En l'occurrence l'indice de l'air est $n_2 \approx 1$. Il en résulte $n_1 = \frac{1}{\sin(\theta)}$

Pour le disque de plexiglas, on mesure $\theta = 42^\circ$.

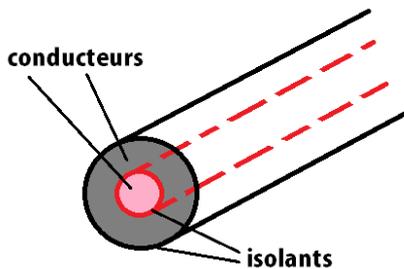
On en déduit la valeur de l'indice de réfraction du plexiglas $n_1 = 1,49$.

Cette valeur est proche de la valeur tabulée $n_{\text{plexiglas}} = 1,51$.

2. LA PROPAGATION GUIDÉE : APPLICATION AU CÂBLE COAXIAL

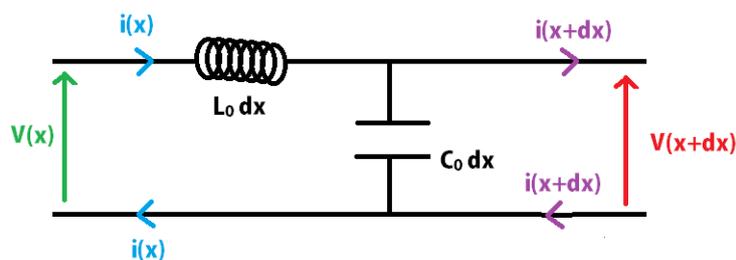
(Duffait / pas dans toutes les éditions)

Jusqu'à présent, nous avons vu des cas d'ondes se propageant librement dans un milieu donné. Dans le cas du câble coaxial, la propagation est guidée par le matériau.



Le câble coaxial est constitué d'une **âme** en matériau conducteur entourée d'un isolant la séparant d'une **gaine** conductrice. Le tout est protégé par une seconde gaine isolante.

Les conducteurs n'étant pas parfaits, on apparente chaque portion élémentaire dx du câble à un circuit électrique capacitif et inductif comme schématisé comme suit :



On en déduit l'équation de propagation $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0$

avec $c^2 = \frac{1}{C_0 L_0}$ dont C_0 est la capacité caractéristique et L_0 est l'inductance caractéristique du câble.

La solution d'une telle équation est une onde monochromatique progressive et une onde régressive équivalente.

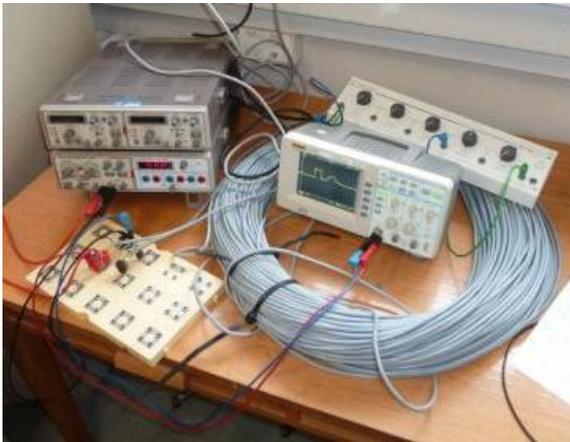
$$V(x,t) = V_+(x-ct) + V_-(x+ct)$$

On peut trouver le même résultat pour le courant traversant le câble et on établit les relations $i_+ = \frac{V_+}{R_C}$ et $i_- = \frac{V_-}{R_C}$

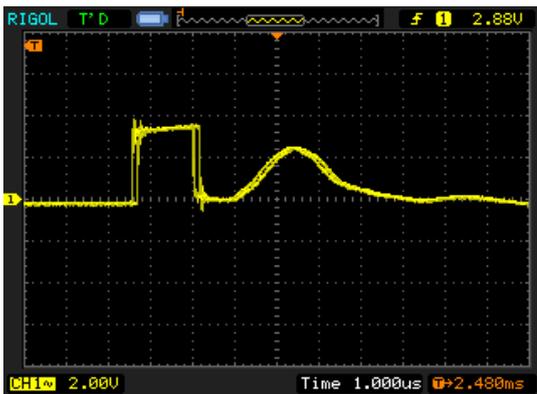
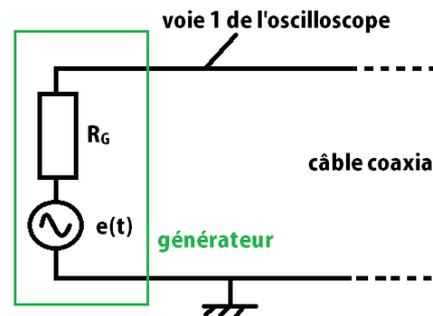
où $R_C = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ est la résistance caractéristique.

On travaille dans cette partie du montage avec un câble coaxial de 200m de long et de résistance caractéristique R_c que l'on cherchera par la suite à déterminer.

2.1. Mesure de la vitesse de propagation



On connecte l'entrée du câble à un GBF de résistance interne $R_G = 50\Omega$. Le générateur peut délivrer des signaux carrés très espacés. On le règle pour générer des impulsions à une fréquence avoisinant les 100kHz et d'une durée inférieure à $2\mu s$. La sortie est, quant à elle, laissée libre. On suit à l'oscilloscope la tension à l'entrée du câble.



On constate que, en plus de l'impulsion carrée nettement visible, il existe une seconde la suivant. Celle-ci n'est pas générée par le GBF.

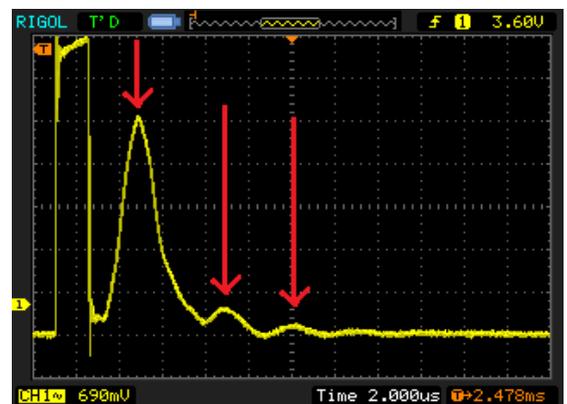
Comme pour la lumière traversant le dioptre plexiglas-air, lorsque l'onde électromagnétique rencontre un changement d'impédance, il se produit une réflexion partielle de l'onde. Dans le cas où la sortie du câble n'est pas connectée, cette réflexion est totale.

C'est cette réflexion de l'impulsion que l'on observe sur l'oscilloscope. L'écart entre les deux impulsions correspond au temps nécessaire à au signal pour parcourir deux fois la longueur du câble.

On mesure un écart de $\Delta T = 3,04\mu s$. On en déduit la célérité de l'onde $c = \frac{2 \times 200m}{\Delta T}$ soit $c = 1,32 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

En réalité, quand on diminue l'échelle en tension, on constate qu'il existe plus d'une seule réflexion. En effet, l'impédance du câble étant différente de celle du générateur, il se produit là aussi une réflexion partielle. Les réflexions successives sont régulièrement espacées (toujours de ΔT).

NB : Si on déplace les curseurs on se rend compte que la seconde réflexion est inversée. Ce phénomène se produit très certainement du fait que l'impédance du câble et celle du générateur sont très proches. Le problème ne se pose plus si on rajoute une résistance en série avec le GBF.



2.2. Propagation dans un milieu dispersif

Puisque l'on parle de réflexion à l'extrémité du câble coaxial, on s'attend à avoir une impulsion réfléchie de même forme que celle envoyée par le GBF. Or ce n'est pas le cas ici puisque le signal réfléchi n'est pas une porte comme celui émis. Ceci est en fait dû au phénomène de dispersion.

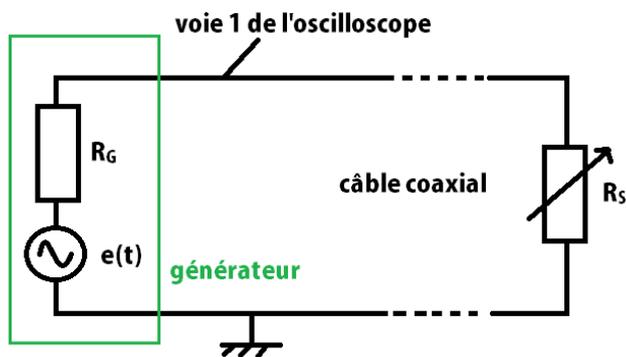
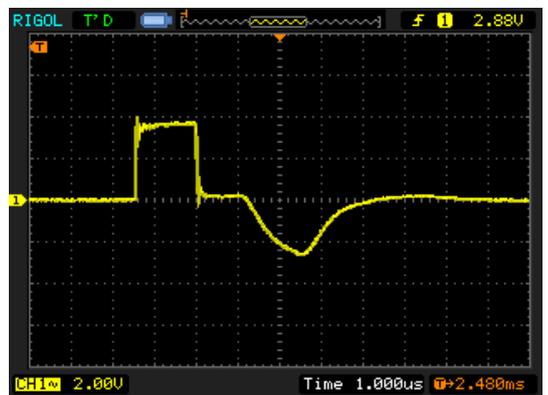
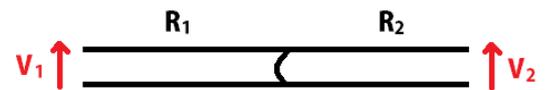
La porte qu'est l'impulsion donne une transformée de Fourier de type sinus cardinal. L'impulsion correspond donc à une multitude de fréquences. Or dans un milieu dispersif, les signaux de fréquences différentes ne se propagent pas à la même vitesse. Ceci entraîne un étalement du signal et donc sa déformation comme on l'observe ici.

La vitesse que l'on a calculée précédemment est la vitesse de groupe dans le milieu qu'est le câble coaxial.

2.3. Adaptation d'impédance

Le coefficient de réflexion, lors d'un changement de résistance, est donné par la relation $\rho = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}$. Ainsi lorsque $R_1 = R_2$, il n'y a plus de réflexion. On dit alors que l'on a adapté l'impédance.

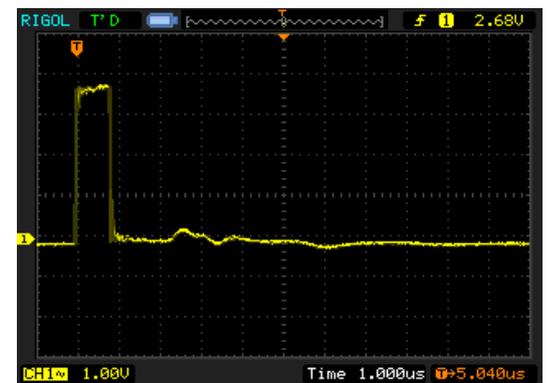
Lorsque l'on relie par un fil électrique les deux bornes en sortie du câble coaxial, on observe que la réflexion de l'impulsion est inversée. Cela revient en effet à connecter une résistance nulle. Ceci correspond alors à un coefficient de réflexion $\rho = -1$.



Cette relation donnant le coefficient ρ va nous permettre de déterminer la résistance caractéristique R_C du câble coaxial. On place cette fois une résistance variable R_S en sortie du câble.

On commence par régler R_S sur 0Ω (équivalent à un fil). On fait alors progressivement augmenter sa valeur jusqu'à observer une atténuation complète des impulsions réfléchies. On en déduit alors que $R_{S,eq} = R_C$.

On mesure ainsi $R_C = 49\Omega$.



CONCLUSION

Le câble coaxial est utilisé en électronique car sa structure le préserve de l'influence des champs magnétiques extérieurs. C'est pourquoi on le choisira préférentiellement en TP pour connecter l'oscilloscope ou le GBF aux différents équipements. Il faut cependant se méfier du phénomène de réflexion qui engendre des pertes à chaque interface. C'est pour cette raison que les équipements de qualité sont adaptés en impédance avec la valeur standard de la résistance caractéristique du câble coaxial (c'est-à-dire 50Ω généralement).