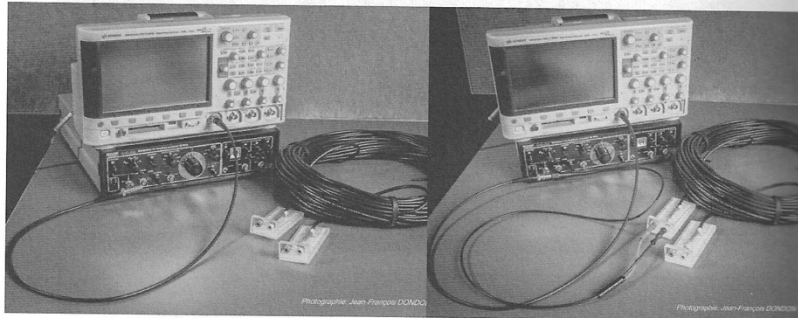


Mise en évidence expérimentale de la propagation d'ondes sur un câble coaxial : réflexion en bout de ligne

On considère le dispositif de la figure 23.13. Un générateur de tension délivre des impulsions rectangulaires courtes de l'ordre de 500 ns, séparées par une durée de l'ordre de la milliseconde.

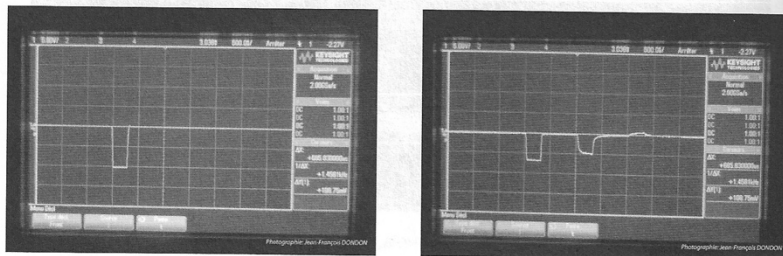


a. Long câble coaxial non branché.

b. Long câble coaxial branché.

Figure 23.13. Réflexion en bout de ligne d'un câble coaxial.

Un té placé sur l'embase bnc de ce générateur permet d'envoyer la tension d'une part sur un oscilloscope (ou une carte d'acquisition) avec un câble court (environ un mètre), et, d'autre part, vers un long câble coaxial de longueur environ 100 m. Ce long câble coaxial est branché en bout de ligne sur une boîte AOIP, dont la résistance peut varier entre zéro et une centaine d'ohms.



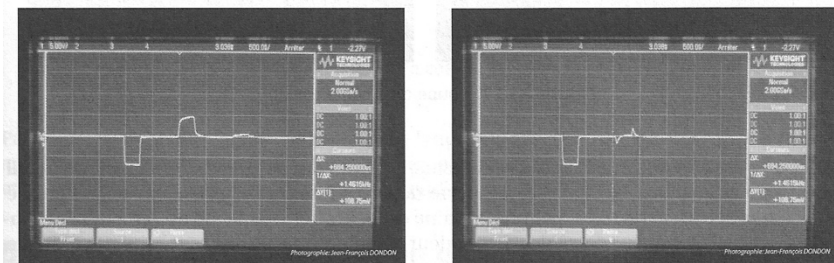
a. Long câble coaxial non branché.

b. Long câble coaxial branché.

Figure 23.14. Réflexion en bout de ligne d'un câble coaxial.

En l'absence du long câble coaxial, on observe sur l'oscilloscope le signal attendu avec le générateur d'impulsion. Cependant, lorsqu'on branche en parallèle le long câble coaxial, il apparaît sur l'oscilloscope, à droite de chaque impulsion délivrée par le générateur, une deuxième impulsion, décalée d'une durée de l'ordre de la microseconde. En réalisant l'expérience avec plusieurs longueurs de câble, on met en évidence que le retard de la deuxième impulsion par rapport à la première est proportionnel à la longueur de ce long câble. L'explication est

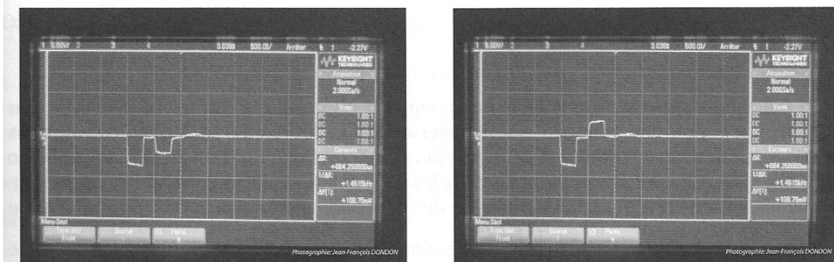
qu'avec des impulsions courtes et un câble long, on ne peut plus considérer que la tension est uniforme le long du câble à chaque instant. Il est indispensable de prendre en compte la propagation d'une onde de tension (et d'intensité) le long du câble. Cette onde subit une réflexion en bout de ligne, et se propage alors dans le sens opposé, pour finalement produire une impulsion « réfléchie », en retard sur l'impulsion obtenue avec le câble court. Cette expérience d'électronique ne peut pas s'interpréter dans le cadre de l'ARQS (approximation des régimes quasi-stationnaires) utilisée par défaut dans le cours d'électronique.



a. Câble coaxial court-circuité en bout de ligne.

b. Câble connecté sur une résistance de 75Ω.

Figure 23.15. Câble coaxial de 100 m de long.



a. Câble coaxial ouvert en bout de ligne.

b. Câble coaxial court-circuité en bout de ligne.

Figure 23.16. Câble coaxial de 50 m de long : le retard vaut la moitié du retard obtenu avec le câble de 100 m.

Câble coaxial et modèle d'impédances réparties

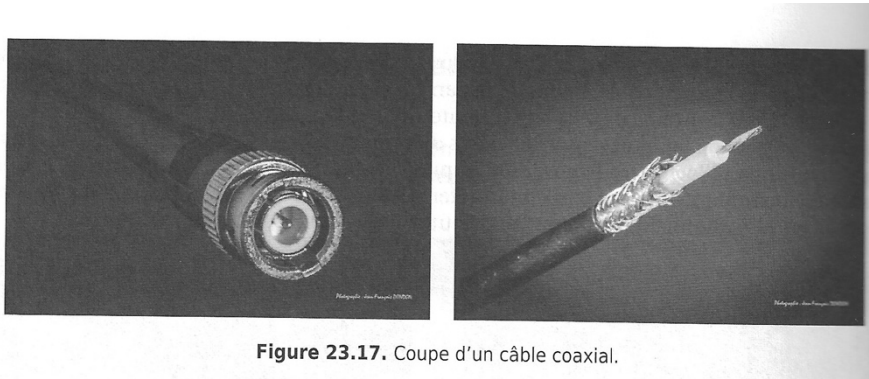


Figure 23.17. Coupe d'un câble coaxial.

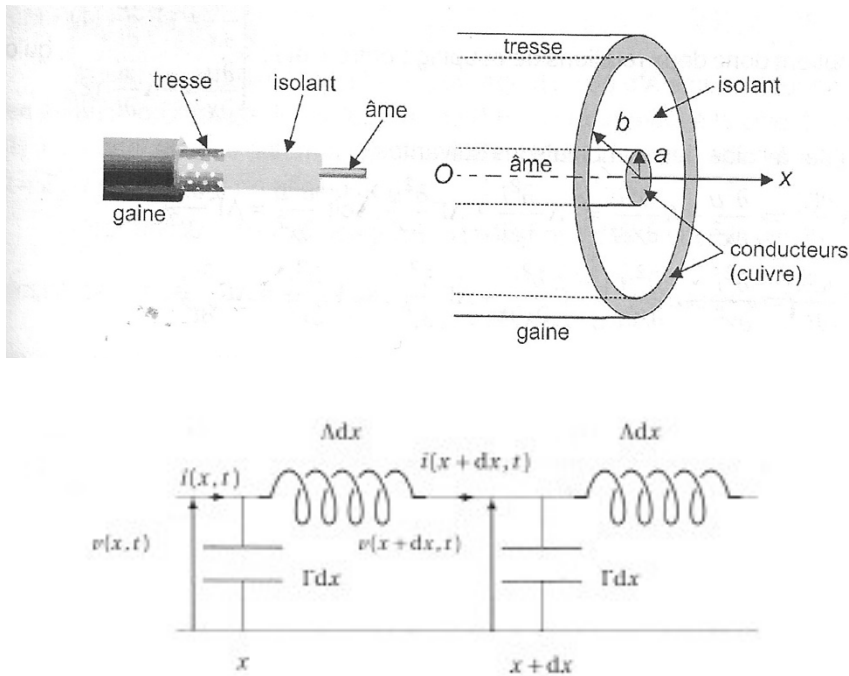
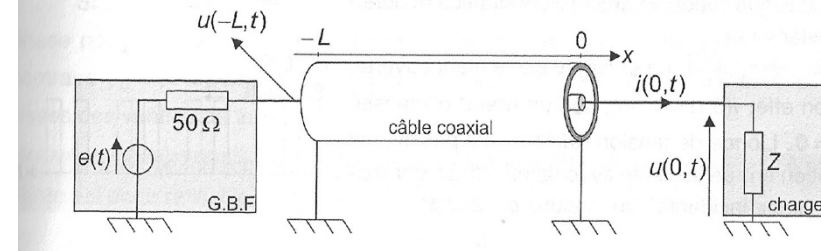


Figure 23.18. Modélisation d'un câble coaxial avec des impédances réparties.

Réflexion en en bout de ligne dans le cas d'une charge résistive

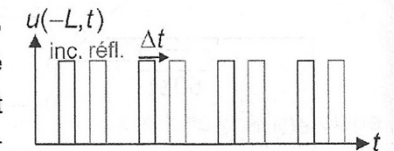
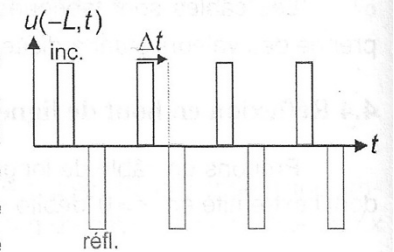
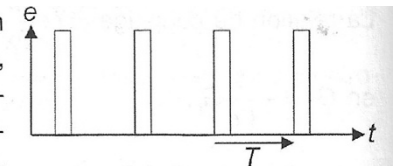
Prenons un câble de longueur L qui correspond à des abscisses négatives, et dont l'extrémité en $x=0$ débite sur une charge d'impédance $Z \in \mathbb{R}$ (résistance).



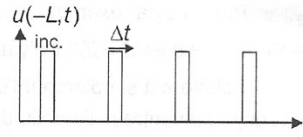
Pour étudier expérimentalement la réflexion en $x=0$, un G.B.F. placé en entrée $x=-L$ du câble, délivre un peigne d'impulsions (une impulsion positive de courte durée toutes les périodes T), et on observe la tension en entrée du câble $u(-L,t)$ à l'oscilloscope. Considérons trois cas particuliers de résistance de charge.

— $Z=0 \Rightarrow \rho_U = -1$. La sortie du câble étant court-circuitée, on a en effet $u(0,t)=0 \forall t$, soit un nœud de tension en $x=0$. L'onde de tension réfléchi est négative, et revient en entrée du câble avec un retard Δt par rapport à l'onde incidente. De la mesure de Δt on déduit la célérité $c = 2L / \Delta t$ de l'onde dans le câble, puisque l'onde a parcouru pendant cette durée une distance $2L$.

— $Z=\infty \Rightarrow \rho_U = +1$. La sortie du câble étant ouverte, on a en effet $i(0,t)=0 \forall t$, soit un nœud d'intensité en $x=0$. L'onde de tension réfléchi est positive, et revient en entrée du câble avec un retard Δt par rapport à l'onde incidente. On mesure $c = 2L / \Delta t$.



— $Z = Z_c \Rightarrow \rho_U = \rho_I = 0$. Il n'y a pas d'onde réfléchie. En effet, en bout de câble, on a la même relation, $u(0,t) = Z_c \cdot i(0,t)$, que pour une O.P.P qui se propage dans le sens des x croissants le long d'un câble infini. L'O.P.P incidente *seule* est solution du problème (elle vérifie les relations de couplage et la C.A.L).



Pour $Z = Z_c$, il n'y a pas d'onde réfléchie : $\rho_U = \rho_I = 0$. On parle alors d'*adaptation d'impédance* : toute la puissance incidente est transmise à la charge.

En pratique, les G.B.F possèdent une résistance interne de 50Ω . Lorsqu'on les utilise avec un câble coaxial d'impédance caractéristique $Z_c = 50 \Omega$, on évite que les ondes que transmet le câble ne se réfléchissent sur le G.B.F et on élimine ainsi des réflexions parasites.

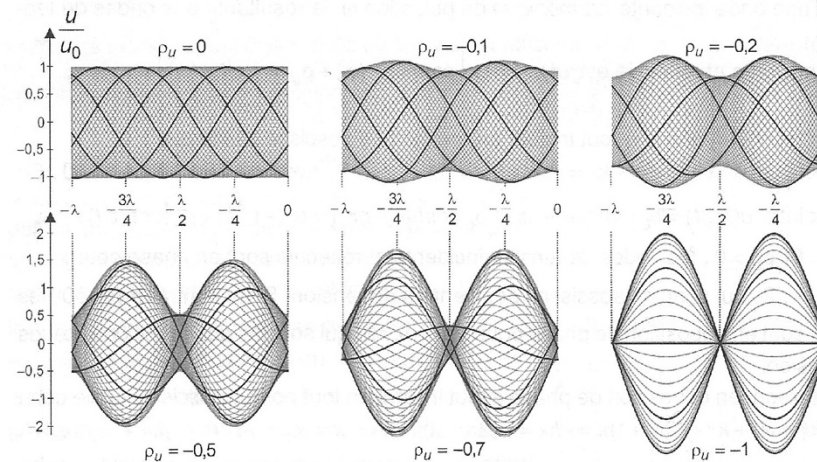
Prenons par exemple $\rho_U \leq 0$:

— Pour $\rho_U = 0 \Leftrightarrow Z = Z_c$, il n'y a pas d'onde réfléchie donc pas d'interférences. L'onde dans le câble est simplement l'onde incidente, *purement progressive*. Il n'y a pas de nœuds ni de ventres : l'amplitude de la tension vaut u_0 partout.

— Pour $-1 < \rho_U < 0 \Leftrightarrow 0 < Z < Z_c$, l'onde réfléchie interfère *destructivement* avec l'onde incidente pour $x = -n\lambda / 2$, mais son amplitude est inférieure à celle de l'onde incidente. Ces positions sont des nœuds de tension dans le sens où l'amplitude de la vibration est minimale en ces points, mais elle n'y est pas nulle. L'onde dans le câble n'est pas purement progressive, ni stationnaire.

— Pour $\rho_U = -1 \Leftrightarrow Z = 0$, l'onde réfléchie a même amplitude que l'onde incidente. On a en $x = -n\lambda / 2$ des « vrais » nœuds de tension où l'onde réfléchie annule l'onde incidente. L'onde dans le câble est alors *stationnaire*. L'amplitude des ventres de tension situés en $x = x_m = -(2m+1)\lambda / 4$ vaut $2u_0$.

Les ondes de tension sont représentées ci-dessous à différents instants pour plusieurs valeurs de $\rho_U \leq 0$.



Les ondes planes harmoniques ne sont purement progressives que si $\rho_U = 0$. Elles restent progressives lorsque $-1 < \rho_U < 0$, mais il apparaît des « nœuds » d'amplitude minimale (mais non nulle), et des ventres d'amplitude maximale. Pour $\rho_U = -1$, l'onde est stationnaire : son l'amplitude est nulle aux nœuds.