

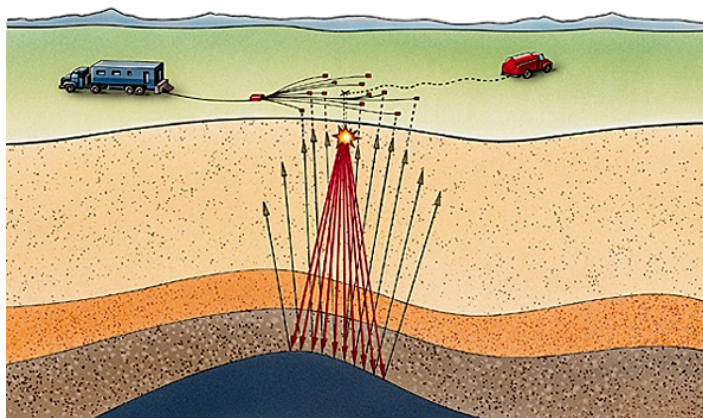
▶ Réflectométrie temporelle

La **réflectométrie** est une technique d'investigation, d'imagerie ou de contrôle non destructif :

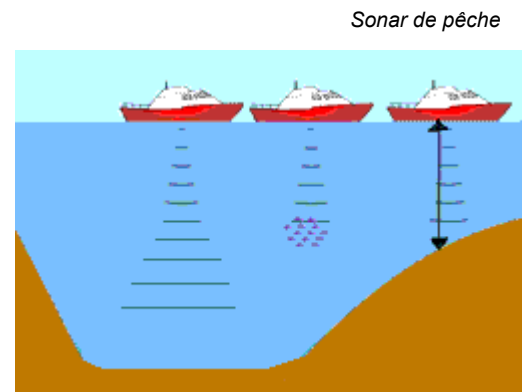
- un signal impulsionnel est envoyé dans le système ou le milieu à diagnostiquer
- ce signal se propage selon les lois de propagation du milieu
- lorsque signal rencontre un obstacle, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection
- l'analyse du signal réfléchi permet de déduire des informations sur le système ou le milieu

Les applications de cette technique sont nombreuses et variées :

| | impulsion | obstacle | information recueillie |
|----------------------|--------------------------------|--|--|
| câble | électrique | extrémité, défaut, connecteur | <ul style="list-style-type: none"> • présence d'un défaut sur le câble • défaut d'un connecteur entre 2 tronçons |
| fibre optique | lumineuse | extrémité, défaut, connecteur | <ul style="list-style-type: none"> • présence d'un défaut sur la fibre • défaut d'un connecteur entre 2 tronçons |
| sous-sol | mécanique ou électromagnétique | zones plus compactes (roches) ou moins compactes (liquides, gaz) | <ul style="list-style-type: none"> • présence d'objets enfouis, d'eau • de pétrole, de gaz etc... |
| corps humain | ultrasonore (échographie) | zones plus compactes (os) ou moins compactes (liquides, sang) | <ul style="list-style-type: none"> • imagerie médicale • détection d'hémorragies, de tumeurs |
| air | électromagnétique (radar) | cibles : personnes, voitures, bateaux, avions, nuages... | <ul style="list-style-type: none"> • détection de cibles • mesures de distance, de vitesse |
| mer, océan | ultrasonore (sonar) | fond marin, banc de poissons, sous-marin | <ul style="list-style-type: none"> • imagerie du relief du fond marin • détection de la présence de poissons |



Prospection pétrolière



Sonar de pêche

La réflectométrie est simple à mettre en œuvre et couramment utilisée pour la détermination de l'état électrique de câbles et de lignes. Elle fournit des informations pour la détection, la localisation et la caractérisation de défauts électriques.

- en trente ans, la longueur des câbles embarqués sur une automobile est passée de 200 à plus de 4000 mètres
- les longueurs de câbles dans les avions sont énormes (40 km pour le Rafale, 400 km pour l'Airbus A380)

Le test des câbles et des connexions devient donc un élément important de la fiabilité des systèmes actuels.

Ce TP propose d'explorer les lois de la propagation d'un signal sur une ligne, puis de mettre en œuvre cette technique de réflectométrie temporelle pour effectuer quelques tests simples sur un câble.

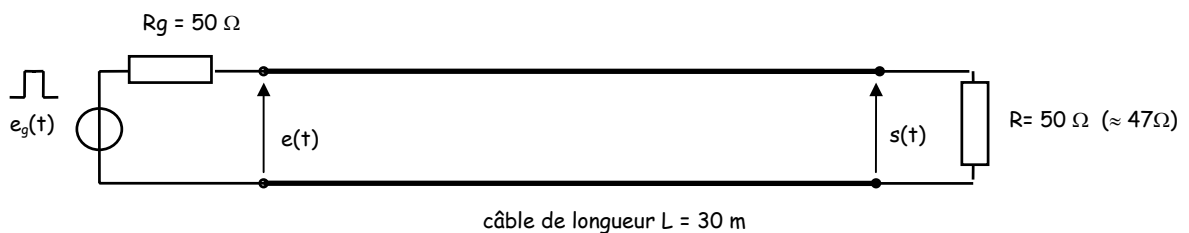
Remarque préliminaire : n'utilisez dans cette manipulation ni cordons BNC (capacité parasite de l'ordre de 100pF/m) ni boîtes à décades (inductance parasite) mais de simples cordons et des résistances montées sur support provenant des panneaux de composants

Pour faire la manip, il est utile de suivre en parallèle le diaporama « Les lignes ». Regarder les [Diapos 1 à 9] et observer les différentes structures de guidage (ligne bifilaire, câble coaxial, ligne imprimée, guide d'onde, fibre optique).

Activité 1 : retard lié à la propagation en régime impulsionnel

La ligne est un câble coaxial de type **RG174** dit « câble 50 Ω », de longueur $L = 30\text{m}$ comme sur la [Diapo 10].

On applique à l'entrée du câble des impulsions très fines (largeur 100 ns) d'amplitude 1V environ fournies par un générateur de résistance interne $R_g = 50 \Omega$. Le câble est terminé par une charge de valeur $R = 50 \Omega$ (on dit que le câble est « adapté » en sortie).



⇒ Relever les oscillogrammes de $e(t)$ et $s(t)$ et mesurer le retard τ lié à la propagation du signal sur le câble. En déduire la vitesse de propagation v du signal sur ce câble. La comparer à la vitesse de la lumière.

⇒ Mesurer les amplitudes E et S de $e(t)$ et $s(t)$. Quel défaut présente ce câble ? Comment serait la situation avec un câble idéal ?

Activité 2 : résistance d'entrée d'une ligne adaptée

⇒ Débrancher le câble du générateur pour mesurer la nouvelle amplitude E' de $e(t)$. Dessiner les schémas équivalents du montage dans les deux situations en remplaçant l'ensemble « câble/résistance terminale » par une résistance R_e . En déduire la valeur de la résistance R_e équivalente à l'ensemble « câble/résistance terminale ».

⇒ **Conclusion :** que vaut l'impédance d'entrée d'un câble « 50 Ω » terminé par une charge de 50 Ω ? Cette impédance d'entrée dépend-elle de la longueur du câble ? Retrouve-t-on le résultat annoncé sur la [Diapo 22] ?

Activité 3 : déphasage lié à la propagation en régime sinusoïdal

⇒ Remplacer le générateur d'impulsions par un générateur sinusoïdal et remettre en place le câble **RG174** de 30 m. Avec l'aide des [Diapos 11-12], prévoir le déphasage entre entrée et sortie pour un signal de 500 kHz, puis de 2 MHz, puis mesurer ces déphasages.

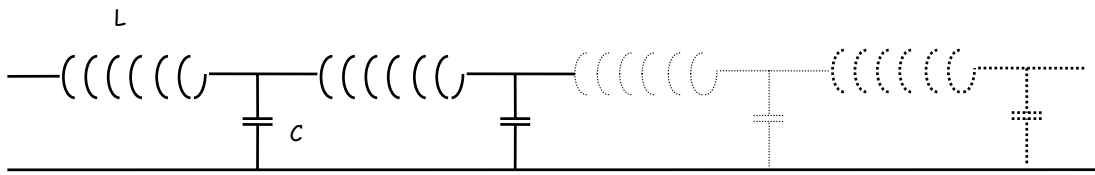
⇒ Le retard entre entrée et sortie dépend-il de la fréquence du signal ? et le déphasage ?

⇒ Mesurer les amplitudes des tensions d'entrée et de sortie à 500 kHz et à 2 MHz. En déduire l'atténuation introduite par ce câble en dB à ces deux fréquences.

⇒ **Conclusion :** quelle serait l'atténuation introduite par un câble de ce type de longueur 300 m à 2 MHz ? Que dit le fabricant du câble sur son atténuation ?

Activité 4 : constantes caractéristiques d'une ligne

Un câble peut être représenté par une succession de cellules L,C [Diapos 13-14] :



On définit pour une ligne [Diapos 16-17] :

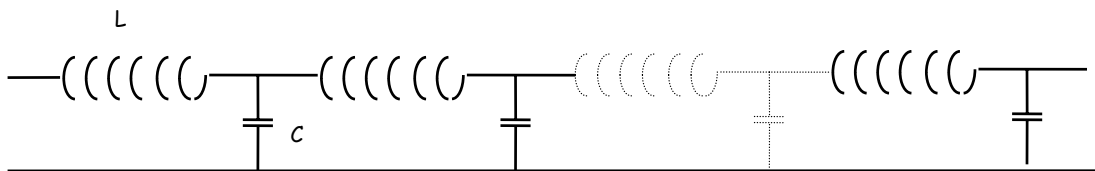
- l'inductance par unité de longueur ou **inductance linéique** L (en H/m)
- la **capacité linéique** C (en F/m)
- l'**impédance caractéristique** $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ en ohms
- la **vitesse de propagation** du signal $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ en m/s

⇒ Pour le rouleau de 30m de câble coaxial de type **RG174**, mesurer la capacité totale C_T du rouleau de câble, et en déduire sa capacité linéique $C = C_T/l$, son inductance linéique L , et la vitesse de propagation v du signal sur ce câble. Comparer aux données du constructeur.

⇒ Mêmes questions pour le rouleau de 30m de câble d'antenne TV de type **19VATC**.

Activité 5 : réflexions sur une ligne désadaptée en sortie

Afin de pouvoir visualiser plus facilement les phénomènes, on fait les mesures sur une ligne plus « lente » constituée de 16 cellules L,C caractérisées par $L = 12 \mu\text{H}$ et $C = 4,7 \text{nF}$.

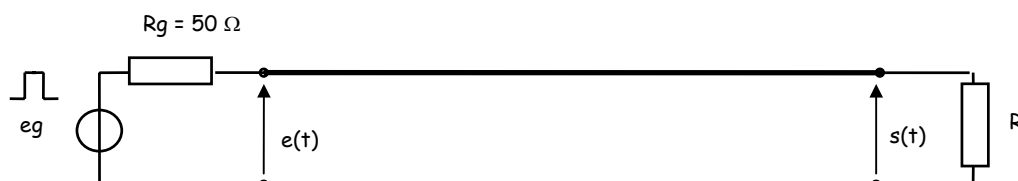


Ligne constituée de 16 cellules L,C

Un tel circuit est appelé **ligne à retard** ou **ligne à constantes localisées**.

⇒ Calculer alors l'impédance caractéristique $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ et le retard introduit par cette ligne $t_0 = 16 \sqrt{LC}$

On attaque la ligne avec des impulsions de largeur égale à $1 \mu\text{s}$ issues d'un générateur d'impulsions avec une amplitude de l'ordre du volt et une période de l'ordre de $100 \mu\text{s}$ comme sur la [Diapo 15].



La ligne est terminée par une résistance de valeur $R = Z_c$ calculée précédemment (ligne **adaptée** en sortie).

⇒ Relever les oscillogrammes de $e(t)$ et $s(t)$, sans tenir compte des petites fluctuations de la ligne de base. Conclusion ? Retrouve-t-on le résultat annoncé sur la [Diapo 20] ?

Dans le cas général [Diapo 23] si la ligne est terminée par une résistance R différente de Z_c , l'impulsion d'amplitude V_i arrivant au niveau de la sortie va se réfléchir en partie et retourner vers l'entrée avec une amplitude V_r telle que :

$$\frac{V_r}{V_i} = r = \frac{R - Z_c}{R + Z_c} \quad \text{où } r \text{ est le coefficient de réflexion}$$

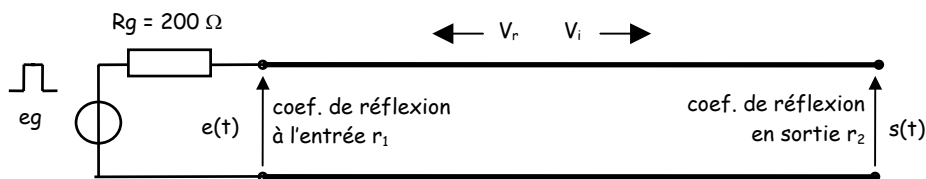
⇒ On laisse la ligne ouverte à son extrémité (**R infinie**). Relever les oscillogrammes de $e(t)$ et $s(t)$. En déduire r et le comparer au coefficient de réflexion théorique. Pourquoi l'impulsion réfléchie arrivant sur l'entrée ne se réfléchit-elle pas pour repartir vers la sortie ?

⇒ On termine la ligne par un court-circuit (**R = 0**). Relever les oscillogrammes et expliquer.

Activité 6 : réflexions multiples sur une ligne

On désadapte maintenant la ligne à l'entrée en rajoutant une résistance de 150Ω en série avec le générateur pour avoir **R_g = 200 Ω** et on laisse la sortie en circuit-ouvert (**R infinie**).

⇒ Relever les oscillogrammes de $e(t)$ et $s(t)$ qui mettent en évidence les réflexions multiples. [Diapos 25]



Que vaut le coefficient de réflexion r_1 à l'entrée ? le coefficient de réflexion r_2 à la sortie ?

Relever les amplitudes des différentes impulsions à l'entrée et à la sortie. Combien d'allers-retours le signal envoyé sur la ligne parcourt-il ? Si ce câble sert à transmettre des données binaires, quelles difficultés le phénomène de réflexion provoque-t-il ?

Activité 7 : mesure d'impédance caractéristique de câble inconnu

On remplace la ligne à constantes localisées par une **ligne torsadée** utilisée par le câblage des réseaux informatiques, d'impédance caractéristique Z_c inconnue, attaquée par des impulsions de largeur 100 ns.

⇒ Déterminer expérimentalement la résistance de charge qui donne le moins de réflexions. En déduire l'impédance caractéristique Z_c du câble.

⇒ Mesurer le retard introduit par la ligne et en déduire sa capacité linéique, son inductance linéique et la vitesse de propagation v du signal sur ce câble sachant que la longueur du rouleau est $L = 30$ m.

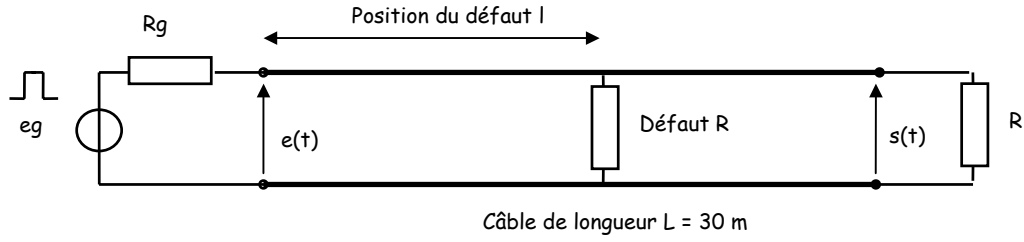
Activité 8 : mesure de la longueur d'un rouleau de câble

On dispose d'un rouleau de câble de type **19PATC** dont on ignore la longueur X . Proposer un mode opératoire pour déterminer X , sachant qu'on n'a accès qu'à une des extrémités du câble.

Mettre en œuvre la procédure et en déduire la longueur X recherchée.

Activité 9 : recherche de défaut sur un câble

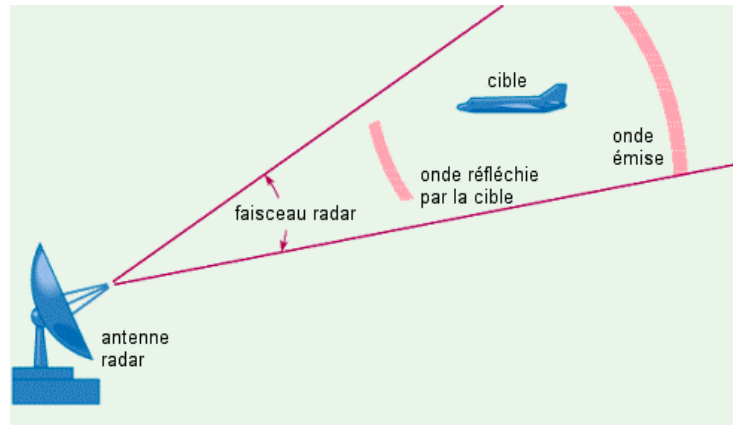
On dispose d'un rouleau de câble coaxial **RG174** qui présente un défaut (résistance parallèle faible) localisé à une distance l inconnue :



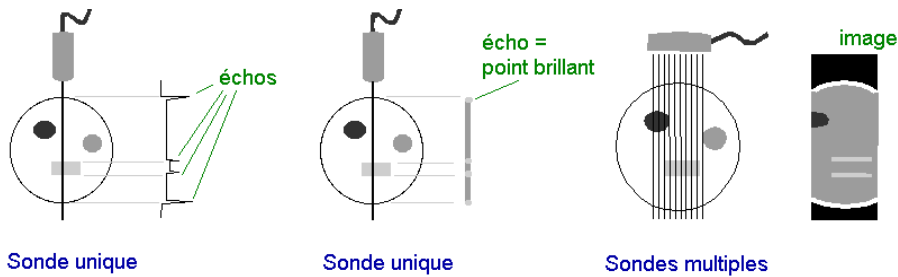
⇒ Montrer qu'on peut localiser la position l du défaut et sa nature en envoyant des impulsions sur la ligne et mettre en œuvre cette technique et déterminer la position l du défaut et sa valeur R .



Réfectométrie sur fibres optiques



Radar d'aéroport



Echographie à ultra-sons



Annexe : caractéristiques des câbles

Câble RG174

Impédance caractéristique : $50 \pm 2 \Omega$

Capacité linéique nominale : 100,7 pF/m

Facteur de vélocité : 66 %

Diamètre : conducteur intérieur / extérieur : 0,48 mm / 2,8 mm

Masse : 1,2 kg / 100 m

Atténuation pour 100 m : 9,6 dB @ 10 MHz / 20 dB @ 50 MHz / 29 dB @ 100 MHz /
42 dB @ 200 MHz / 69 dB @ 500 MHz / 106 dB @ 1 GHz

Puissance maximale : 160 W

Applications : utilisation générale, transport de signal



Câble CX5S = 19VATC = 19 PATC

Impédance caractéristique : $75 \pm 3 \Omega$

Capacité linéique nominale : 55 pF/m

Facteur de vélocité : 80 %

Diamètre : conducteur intérieur / extérieur : 0,48 mm / 6,8 mm

Masse : 4,9 kg / 100 m

Atténuation pour 100 m : 4,7 dB @ 47 MHz / 13,9 dB @ 470 MHz / 19,1 dB @ 860 MHz / 28,8 dB @ 1750 MHz

Tenue aux intempéries : VATC gaine en PVC blanc pour intérieur / PATC gaine en polyéthylène noir pour extérieur

Applications : liaison antenne TV / téléviseur



Remarque : ces câbles sont désignés selon la norme européenne EN50117

19 VATC Class A 3GHz veut dire :

- 19 dB d'affaiblissement à 800MHz pour 100m
- V pour usage intérieur / P pour usage extérieur
- Class A : efficacité du blindage > 85dB jusqu'à 3GHz

Pour le satellite il est conseillé de prendre un 17 PATC Class A 3GHz, pour une antenne TV pas trop éloignée du téléviseur un câble 21 PATC Class A 3GHz peut suffire (moins cher !).



Réflexométrie temporelle : réponses

Rédacteur :

Binôme :

Date :

Activité 1 : retard lié à la propagation en régime impulsionnel

⇒ Oscillogramme : > voir courbe n°

Retard mesuré : $\tau =$

Vitesse de propagation : $v =$

Vitesse de la lumière : $c =$

Par rapport à la vitesse de la lumière, la vitesse de propagation d'un signal sur ce câble est :

très petite

un peu plus faible

égale

supérieure

Amplitudes mesurées : $E =$

$S =$

Avec un câble idéal, on aurait :

.....

Activité 2 : résistance d'entrée d'une ligne adaptée

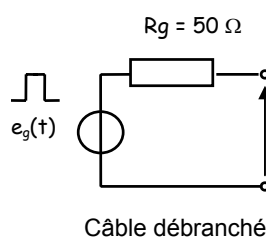
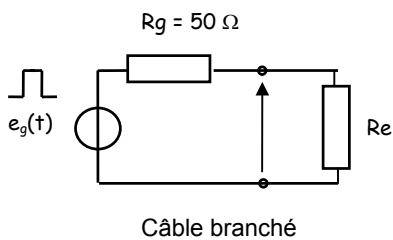
• câble branché, l'amplitude de l'impulsion $e(t)$ vaut :

$E =$

• câble débranché, la nouvelle amplitude de l'impulsion $e(t)$ vaut :

$E' =$

Les schémas équivalents dans les deux situations sont :



Calcul de R_e :

Conclusion : un câble $Z_c = 50 \Omega$ de longueur quelconque adapté en sortie a une impédance d'entrée R_e égale à

$Z_c + R$

$Z_c // R$

R

$Z_c - R$

.....

.....

Activité 3 : déphasage lié à la propagation en régime sinusoïdal

Si le câble introduit un retard τ , le signal en sortie s'écrit :

$e(t) = E \cos(\omega t)$ \Rightarrow $s(t) = \dots\dots\dots$ \Rightarrow déphasage $\varphi = \dots\dots\dots$

Le retard : dépend de la fréquence ne dépend pas de la fréquence

Le déphasage : dépend de la fréquence ne dépend pas de la fréquence

\Rightarrow à 500 kHz : $E = \dots\dots\dots$ $S = \dots\dots\dots$ $S/E = \dots\dots\dots$ $A_{dB} = \dots\dots\dots$

\Rightarrow à 2 MHz : $E = \dots\dots\dots$ $S = \dots\dots\dots$ $S/E = \dots\dots\dots$ $A_{dB} = \dots\dots\dots$

Atténuation de ce câble pour une longueur de 300m à 2 MHz : $A_{dB} = \dots\dots\dots$

Activité 4 : constantes caractéristiques d'une ligne

\Rightarrow pour le rouleau de câble coaxial noir ($Z_c = 50 \Omega$) :

$C_T = \dots\dots\dots$ $C = C_T/l = \dots\dots\dots$ $L = \dots\dots\dots$ $v = \dots\dots\dots$

\Rightarrow pour du câble d'antenne TV blanc ($Z_c = 75 \Omega$) :

$C_T = \dots\dots\dots$ $C = C_T/l = \dots\dots\dots$ $L = \dots\dots\dots$ $v = \dots\dots\dots$

Activité 5 : réflexions sur une ligne désadaptée en sortie

Pour la ligne à constantes localisées, on a : $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \dots\dots\dots$ retard $t_0 = 16 \sqrt{LC} = \dots\dots\dots$

\Rightarrow **Ligne adaptée** : > voir courbe n° : $\dots\dots\dots$ $r_{th} = \dots\dots\dots$

Commentaires : $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$

\Rightarrow **Ligne ouverte** : > voir courbe n° : $\dots\dots\dots$ $r_{th} = \dots\dots\dots$

Commentaires : $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$

\Rightarrow **Ligne en court-circuit** : > voir courbe n° : $\dots\dots\dots$ $r_{th} = \dots\dots\dots$

Commentaires : $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$

Activité 6 : réflexions multiples sur une ligne

⇒ **Ligne désadaptée à l'entrée et à la sortie** : > voir courbe n° :

coefficient de réflexion à l'entrée $r_1 = \dots\dots\dots$ coefficient de réflexion à la sortie $r_2 = \dots\dots\dots$

| | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Entrée | E_1 | E_2 | E_3 | E_4 | E_5 | E_6 | E_7 | E_8 |
| valeurs relevées | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Sortie | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 |
| valeurs relevées | | | | | | | | |

L'impulsion parcourt allers-retours.

Commentaires :

Activité 7 : mesure de l'impédance caractéristique d'un câble inconnu

⇒ **câble n°1**

Le minimum de réflexion est obtenu pour une charge $R = \dots\dots\dots$

L'impédance caractéristique du câble vaut : $Z_c = \dots\dots\dots$

Le retard introduit par le câble vaut : $\tau = \dots\dots\dots$

On en déduit :

$C = \dots\dots\dots$ $L = \dots\dots\dots$

$v = \dots\dots\dots$

Par rapport à la vitesse de la lumière, la vitesse de propagation d'un signal sur ce câble est :

- très petite un peu plus faible égale supérieure

Activité 8 : mesure de la longueur d'un rouleau de câble

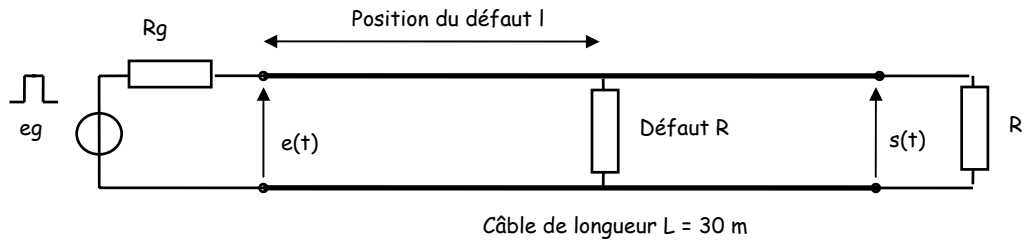
Méthode proposée :

⇒ **Oscillogramme** : > voir courbe n°

Calcul de la longueur X du câble :

Résultat : le câble a une longueur $X = \dots\dots\dots$

Activité 9 : recherche de défaut sur un câble



Mode opératoire :

.....

.....

.....

⇒ **Oscillogramme :** > voir courbe n°

Calcul de la position du défaut :

Résultat : le défaut se trouve à $l = \dots\dots\dots$ d'une extrémité du câble.