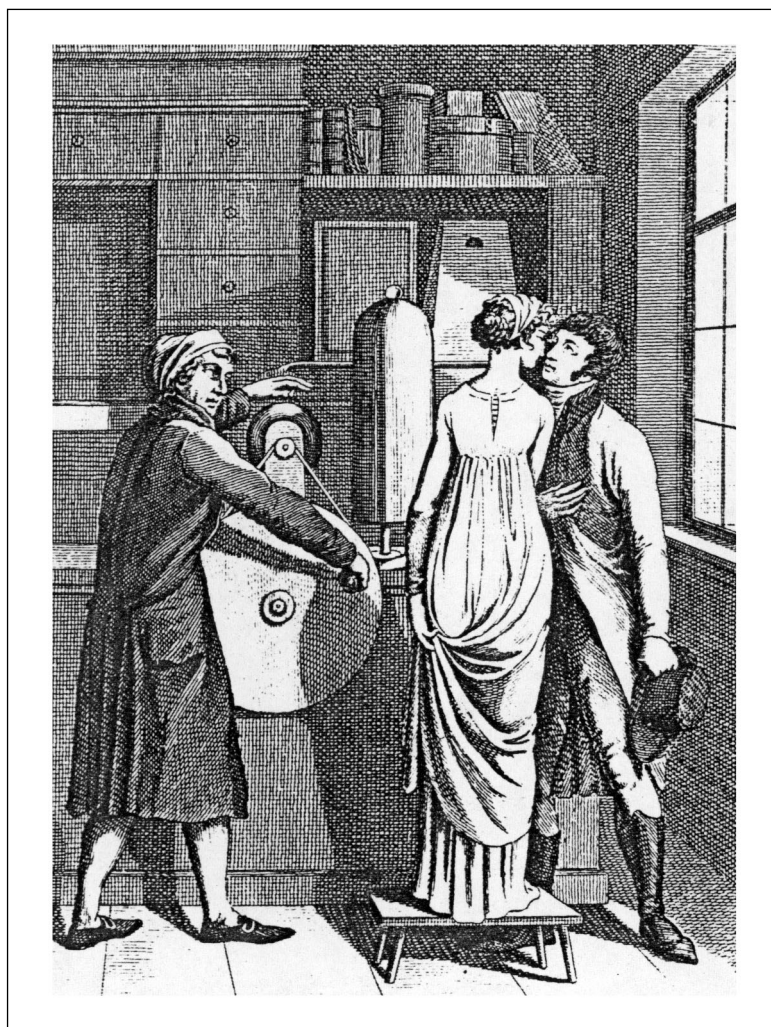


Propagation des effets d'une impulsion de tension le long d'un conducteur bifilaire

RÉFLEXIONS — CÉLÉRITÉ

Montage de démonstration

MV 5000 00001



Mode d'emploi
et
résultats expérimentaux



Centre technique et pédagogique
de l'Enseignement de la Communauté française

«[...] L'enseignement actuel de la chimie, comme d'ailleurs celui des autres disciplines scientifiques, souffre trop de l'absence d'une approche où les faits acquis aujourd'hui seraient accompagnés de notions solides sur l'histoire de l'élaboration de ces résultats.»

«[...] L'intégration de l'histoire des disciplines scientifiques dans les cursus universitaires correspondants [...] devrait absolument être développée.»

Georges BRAM

Professeur à l'Université de Paris XI
«Pour la science», septembre 1998

Dessin de la couverture: *«Der elektrische Kuß»*

Professeur BOSE, vers 1800

Propagation des effets d'une impulsion de tension le long d'un conducteur bifilaire

RÉFLEXIONS — CÉLÉRITÉ

Montage de démonstration

Avant-propos

Le montage décrit dans les pages qui vont suivre permet d'étudier, par le biais d'un oscilloscope, la propagation, le long d'un conducteur bifilaire, des effets d'une impulsion de tension créée à l'une des extrémités de ce conducteur.

Il permet, entre autres choses, de constater l'existence de réflexions, avec ou sans changement d'un signe, en certains points du conducteur en question. Aussi de faire une estimation rapide de la célérité du signal ainsi créé et transmis.

L'explication détaillée des phénomènes dont le montage proposé est le siège requiert le recours aux équations de Maxwell et à des théories qui dépassent, de très loin, le niveau de l'enseignement secondaire.

Il nous semble cependant que la simple présentation, que le montage permet, d'une propagation à grande vitesse dans un câble, son application aux câbles de télécommunication et surtout l'analogie qu'il présente avec le dispositif qui montre la propagation d'une impulsion de pression dans un tuyau plein de gaz (appareil MV 4000 00001 du CTP), présentent un grand intérêt pédagogique.

Sommaire

Propagation des effets d'une impulsion de tension le long d'un conducteur bifilaire

Réflexions - Célérité

1. Principe de l'étude	4
2. Description détaillée du montage	4
2.1. Matériel nécessaire au montage	4
2.2. Description des éléments principaux du montage	5
2.2.1. Le générateur d'impulsions	5
2.2.2. Le câble	6
2.2.3. L'oscilloscope	6
2.3. Schéma et détails du montage	8
2.3.1. Schéma du montage	8
2.3.2. Montage	8
3. Mise en œuvre	8
3.1. Préréglage de l'oscilloscope	8
3.2. Expérience de base	9
3.2.1. Analyse de la forme de l'oscillogramme	9
3.2.2. Estimation de la célérité v du signal	10
3.3. Expériences complémentaires	11
3.3.1. Raccourcissement de la ligne	11
3.3.2. Mise en court-circuit des conducteurs à l'extrémité du câble	11
3.3.3. Examen du signal lors de son passage à l'extrémité libre du câble	12
3.3.4. «Adaptation» de la ligne	12
3.4. Détermination plus précise de la célérité du signal	13

Propagation des effets d'une impulsion de tension le long d'un conducteur bifilaire

Réflexions - Célérité

1. Principe de l'étude

Le montage proposé comprend:

- Un tronçon de câble bifilaire de 100 mètres de longueur environ.
- Un générateur qui produit, entre ses bornes de sortie, des impulsions de tension d'environ 4 V, d'une durée de $0,2 \cdot 10^{-6}$ s environ, séparées par des intervalles de $4,4 \cdot 10^{-6}$ s environ.

L'une des extrémités du câble est raccordée à la sortie du générateur, l'autre est libre.

Un oscilloscope, raccordé à la sortie du générateur, donc au début du câble, enregistre:

- l'impulsion de tension créée au début du câble;
- l'impulsion de retour, après réflexion à la seconde extrémité du câble.

L'examen de l'oscillogramme et l'utilisation de la base de temps de l'oscilloscope permettent de tirer des conclusions quant à la célérité de la propagation des effets de la perturbation le long du câble et quant aux réflexions qui ont lieu à ses extrémités.

On remarquera l'analogie avec le montage MV 4000 00001 déjà cité.

2. Description détaillée du montage

2.1. Matériel nécessaire au montage (réf. MV 5000 00001)

1. Un générateur d'impulsions (réf. MV 5004 00001) et son bloc d'alimentation.
2. Une bobine portant un tronçon de câble bifilaire d'environ 50 mètres de long (la longueur plus précise du câble est indiquée sur une étiquette placée sur son support) (réf. MV 5001 11116).
3. Une bobine portant un tronçon de câble d'environ 50 mètres de long, presque identique au précédent (réf. MV 5001 11116).
4. Trois câbles coaxiaux de 1,2 mètre de longueur, pourvus de fiches bananes à l'une de leurs extrémités, d'une fiche BNC à l'autre (réf. ED 0401 00002).¹

¹ Ce matériel ne fait pas partie de l'ensemble MV 5000 00001.

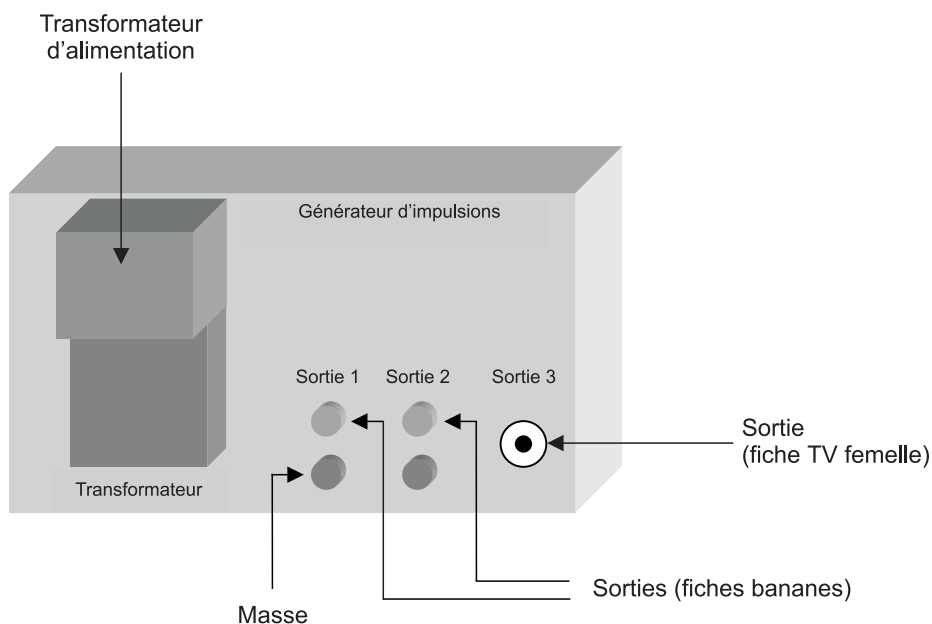
5. Une fiche mâle «descente d'antenne TV « appelée par la suite «fiche TV court-circuit» dont les bornes sont court-circuitées (par un tronçon de fil rouge) (réf. MV 5002 11006).
6. Une fiche mâle «descente d'antenne TV» dont les bornes sont réunies par un résistor de résistance variable de 100 Ω au maximum, placé en série avec un résistor de résistance fixe 50 Ω (réf. MV 5002 21006).
7. Un tronçon de câble portant une fiche mâle «descente d'antenne TV» à l'une de ses extrémités, deux fiches bananes femelles à l'autre (réf. MV 5003 11116).

Le montage requiert, en sus, un oscilloscope dont la base de temps «descende» au moins à 1 μ s/div. Cet oscilloscope n'est pas compris dans le matériel MV 5000 00001.

2.2. Description des éléments principaux du montage

2.2.1. Le générateur d'impulsions

- ◆ Alimentation: il est alimenté par un transformateur enfiché (pour le rangement) dans sa face avant. Le raccordement électrique de l'appareil se fait en enlevant le transformateur de son logement et en enfonçant ses broches dans une prise 230 V~.
- ◆ Sorties:



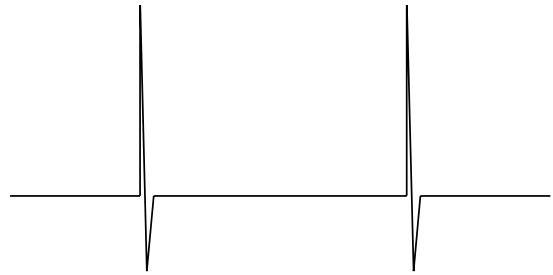
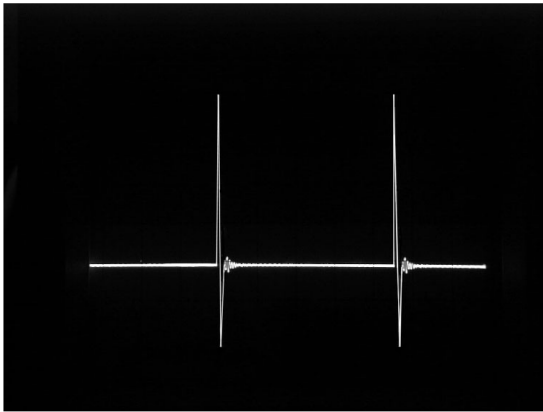
Trois sorties sont prévues sur la face avant:

- 2 sorties munies de douilles pour fiches bananes;
- 1 sortie munie d'une fiche d'antenne TV, femelle.

Le signal est disponible sur chacune de ces sorties. Le générateur étant préréglé, aucun élément variable n'a été rendu accessible.

◆ Signal produit

Le signal produit par le générateur, traduit par l'oscilloscope, présente la forme suivante:



La période de l'ensemble impulsion - intervalle est d'environ $4,6 \mu\text{s}$. Il y a donc environ $220 \cdot 10^3$ impulsions par seconde.

2.2.2. Le câble

Il s'agit d'un câble coaxial pour descente d'antenne TV, choisi de qualité supérieure.

Il serait pédagogiquement tentant de pouvoir disposer les deux tronçons de 50 mètres en un seul conducteur **rectiligne** de 100 mètres.

Pour des raisons évidentes de commodité, nous avons dû nous résigner à les présenter sur deux bobines en bois.

Chaque tronçon, sur sa bobine support, présente:

- une extrémité libre, de 0,4 mètre environ, terminée par une fiche TV mâle;
- une extrémité fixée sur le support, terminée par une fiche TV châssis femelle.

Il est donc possible de raccorder, sans difficulté:

- l'extrémité libre de l'une des bobines à la sortie TV du générateur;
- l'extrémité libre de la seconde bobine à la sortie fixe de la première;
- les accessoires prévus en 2.1. à la sortie de l'une ou de l'autre des bobines.

2.2.3. L'oscilloscope

Sa base de temps doit descendre, au moins, à $1 \mu\text{s}/\text{div}$.

L'oscillogramme est, en général, plus facile à stabiliser si l'on utilise le «*trigger*» extérieur, en raccordant la prise correspondante de l'oscilloscope à la sortie du générateur. Un conducteur est prévu à cet effet dans le matériel.

Ne pas oublier, alors, de placer l'interrupteur «*trigger*» de l'oscilloscope sur la position «EXT».

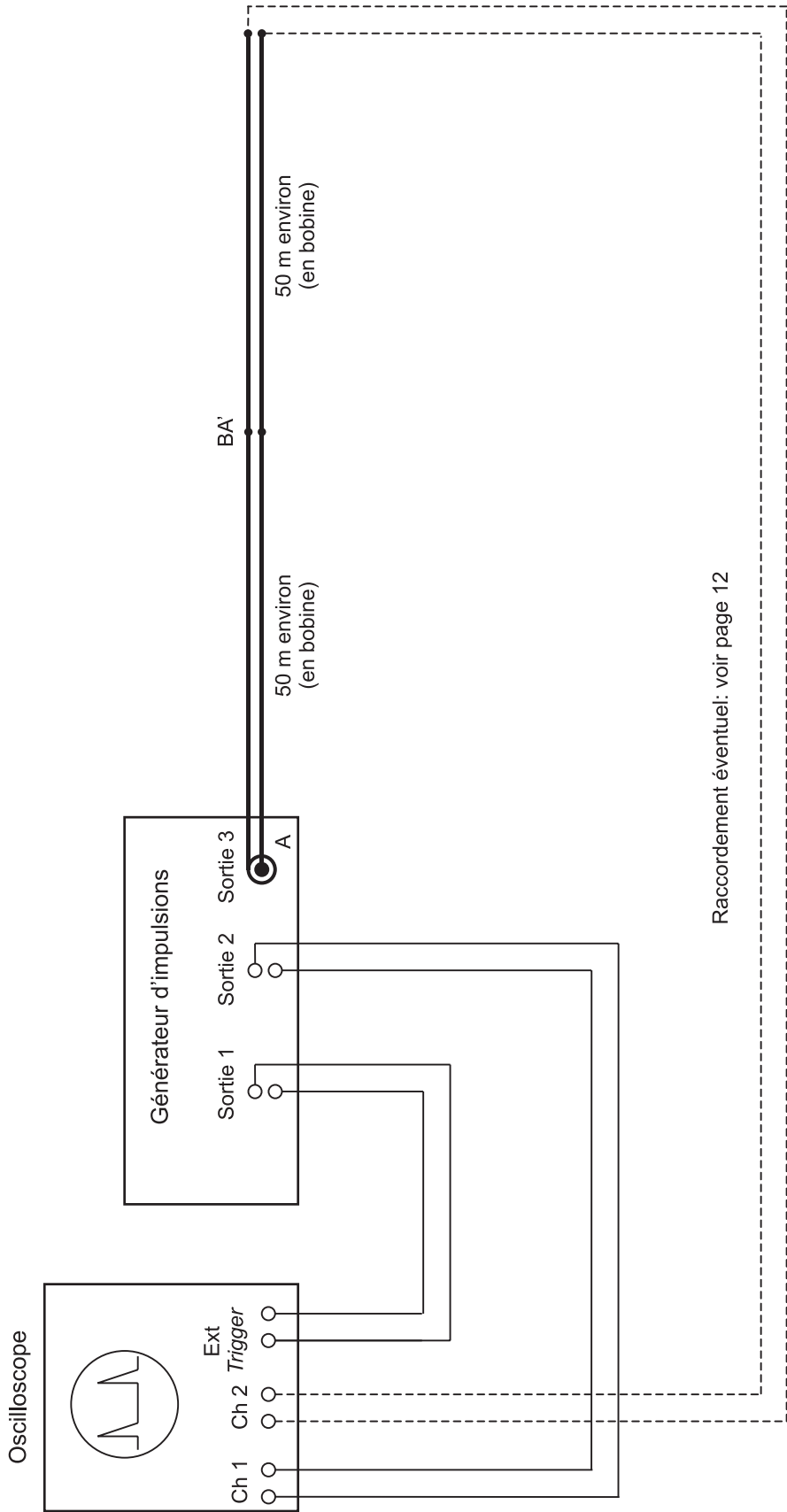


Schéma du montage

2.3. Schéma et détails du montage

2.3.1. Schéma du montage

Le schéma du montage se trouve à la page 7.

Il nous paraît pédagogiquement souhaitable, en vue d'assurer au mieux la clarté de la démonstration, de disposer (du point de vue des élèves):

- le générateur, sorties vers la droite;
- à sa droite, les deux bobines de 50 m de câble coaxial, l'une à la suite de l'autre, de manière à pouvoir les placer aisément en série;
- à sa gauche, l'oscilloscope.

Prévoir une prise de 230 V **double**, puisqu'il faudra y brancher l'oscilloscope et le transformateur du générateur d'impulsions, ainsi groupés si l'on adopte la disposition décrite ci-dessus.

2.3.2. Montage

1. Brancher l'alimentation du générateur d'impulsions ainsi que l'oscilloscope sur une prise 230 V.
2. Relier l'une des sorties pour fiches bananes du générateur au canal vertical de l'oscilloscope. Utiliser pour cela l'un des câbles blindés BNC - bananes fourni avec l'appareil (réf. ED 0401 00002).
3. Relier l'autre sortie pour fiches bananes du générateur à l'entrée «*External trigger*» de l'oscilloscope. Placer le commutateur «*Source*» de l'oscilloscope sur la position «EXT».
4. Relier la fiche TV mâle placée à l'extrémité du bout libre du câble de la première bobine à la sortie TV du générateur (sortie 3).
5. Relier la fiche TV mâle placée à l'extrémité du bout libre du câble de la seconde bobine à la fiche TV châssis femelle placée à la sortie de la première bobine.

3. Mise en œuvre

3.1. Préréglage de l'oscilloscope

La période de l'ensemble impulsion - temps mort étant d'environ 4,6 μ s, il en résulte que les traces qui correspondent, sur l'écran de l'oscilloscope, à deux impulsions successives sont «distantes» d'environ 4,6 μ s.

Il convient donc, pour obtenir un oscillogramme présentable, de régler la base de temps sur l'une des valeurs 1 μ s/div ou 0,5 μ s/div.

Parfaire le réglage en fonction de la figure obtenue.

3.2. Expérience de base — Analyse de la forme de l'oscillogramme — Estimation de la célérité du signal

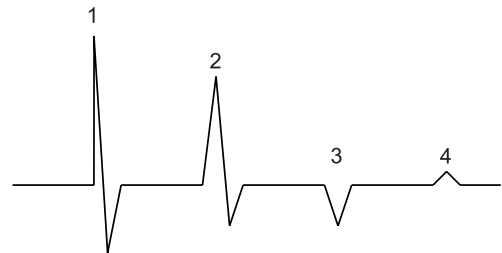
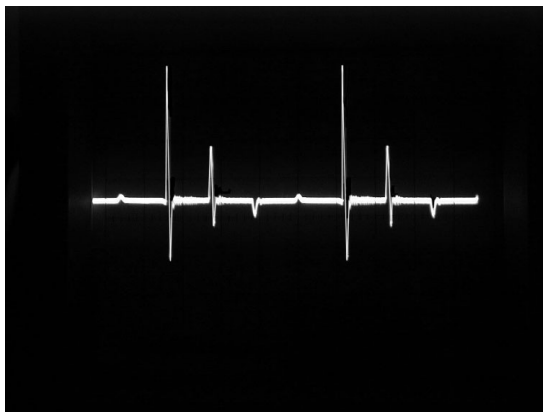
Le montage précisément décrit ici comporte:

- un conducteur AB de 54,20 mètres de longueur;
- un conducteur A'B' de 54,25 mètres de longueur.

Le conducteur utilisé dans cette première expérience a donc 108,45 mètres de longueur (en deux tronçons réunis en $B \equiv A'$)

3.2.1. Analyse de la forme de l'oscillogramme

L'oscilloscope, correctement réglé, présente l'oscillogramme suivant:



Le générateur envoie le signal 1 qui effectue le trajet $A \rightarrow B'$. L'extrémité B' étant libre, le signal ne s'inverse pas. Il revient ensuite vers A où il est détecté (signal 2).

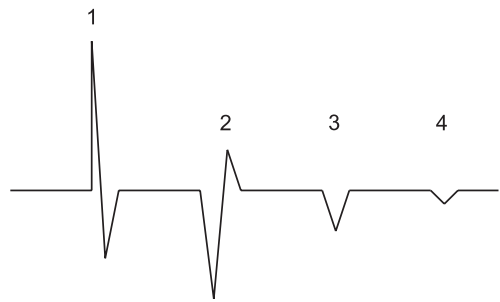
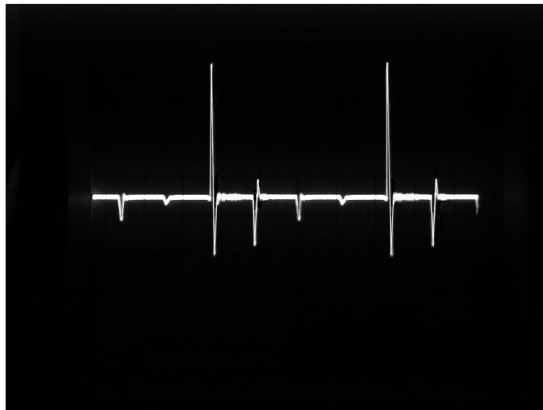
En A, il s'inverse, repart vers B' où il ne s'inverse pas puis, revient vers A où il est détecté (signal 3).

En A, il s'inverse à nouveau, repart vers B' où il ne s'inverse pas puis, revient vers A où il est détecté (signal 4).

On peut aisément vérifier que la crête (2) de l'oscillogramme, réputée «signal réfléchi», provient bien de l'extrémité B' .

Il suffit pour cela de court-circuiter les bornes de sortie du câble A'B' en utilisant la fiche TV «court-circuit» signalée au point 5 (voir § 2.1).

On constate l'inversion, entre autres, de la crête (2) de l'oscillogramme.



Le générateur envoie le signal 1 qui effectue le trajet A → B'. L'extrémité B' étant en court-circuit, le signal s'inverse. Il revient ensuite vers A où il est détecté (signal 2).

En A, il s'inverse, repart vers B' où il s'inverse à nouveau. Il revient ensuite vers A où il est détecté (signal 3).

En A, il s'inverse à nouveau, repart vers B' où il s'inverse. Il revient ensuite vers A où il est détecté (signal 4).

3.2.2. Estimation de la célérité v du signal²

$$v = \frac{L}{t}$$

L étant la longueur parcourue par le signal, soit deux fois la longueur du câble (si l'on considère la première réflexion).

t étant la durée de ce trajet

Dans le cas qui nous occupe:

$$L = 2 (54,20 + 54,25) = 216,90 \text{ mètres}$$

t correspond à un peu moins de 1,15 carré du graticule, la base de temps étant réglée sur 1 $\mu\text{s}/\text{div}$. On a donc:

$$t \approx 1,15 \mu\text{s} = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$v \approx \frac{216,90}{1,15 \cdot 10^{-6}} = 1,89 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v \approx 189 \text{ 000 km/s}$$

Ce résultat est en parfait accord avec celui des essais réalisés à la câblerie.

² Résultats obtenus en utilisant du câble 6 S(TA)V. Le câble actuellement fourni, [6 F(TA)V], dont le diélectrique est différent, donne des résultats différents. Pour ce dernier câble, $v = 240 \text{ 000 km/s}$.

Il est bien entendu que nous ne nous faisons aucune illusion:

- sur la précision de la lecture;
- sur la précision du réglage de la base de temps.

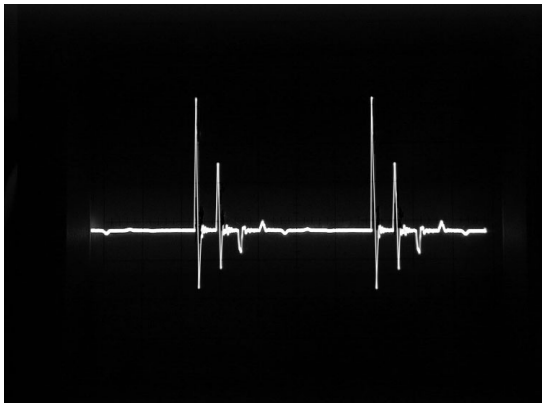
On peut, bien sûr, refaire la même mesure en considérant les trois réflexions successives que l'on peut déceler sur l'oscillogramme. On améliorera ainsi la précision, au moins de l'estimation de t .

3.3. Expériences complémentaires

Il est possible de se familiariser un peu avec les caractéristiques des phénomènes qui se passent dans le montage par quelques expériences complémentaires.

3.3.1. Raccourcissement de la ligne

Séparer la seconde bobine de la première, de manière à ne laisser en place que la partie AB du conducteur.



Les explications sont identiques à celles données pour l'ensemble des deux câbles. Les pics qui correspondent aux signaux réfléchis par les extrémités A et B sont plus rapprochés. En effet, la longueur totale du câble étant environ deux fois plus petite, la durée de la propagation de la perturbation est deux fois plus petite également.

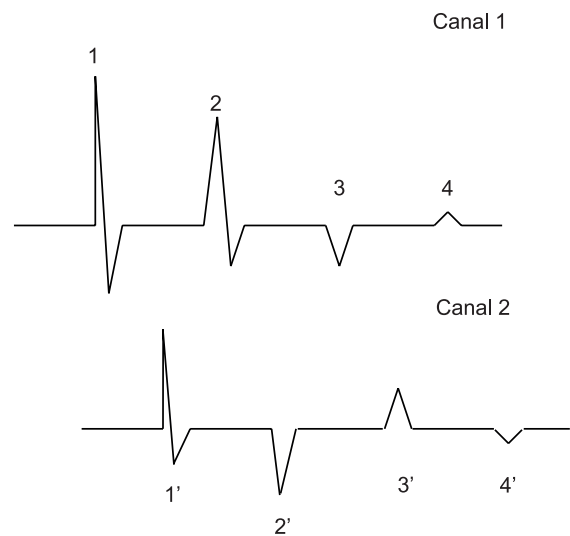
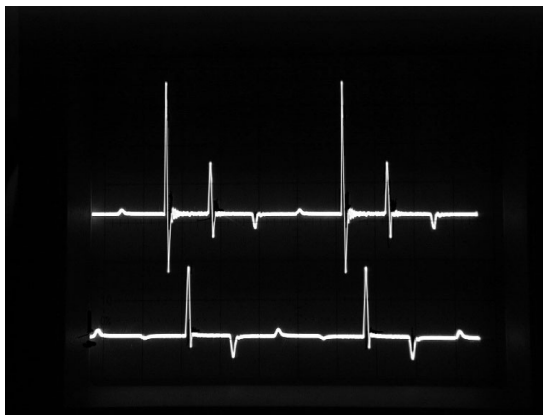
On remarquera aisément, en replaçant puis en enlevant la fiche de raccordement au second câble, qu'aucune réflexion parasite n'apparaît à la jonction BA' des deux câbles (qualité de la jonction assurée par les fiches TV).

3.2.2. Mise en court-circuit des conducteurs à l'extrémité (B ou B') du câble

Voir 3.2.1.

3.3.3. Examen du signal lors de son passage à l'extrémité libre du câble

1. Placer le générateur et les deux bobines en série.
2. Enficher, à la sortie de la seconde bobine, l'ensemble «fiche TV mâle - bananes» cité en 2.1.7.
3. En utilisant le troisième câble «BNC - bananes», raccorder la pièce précédente à l'entrée du second canal de l'oscilloscope.
Placer celui-ci en position *Dual*. Le second canal de l'oscilloscope détectera ainsi le signal lors de son passage en B'.



Le signal 1' correspond au passage de la perturbation 1 à l'extrémité B' du câble. On constate que la durée du trajet $A \rightarrow B'$ est la moitié de la durée du trajet $A \rightarrow B' \rightarrow A$.

En B', le signal ne s'inverse pas, retourne en A (signal 2). À ce moment, il s'inverse, repart vers B' où il est détecté (signal 2'). Il ne s'inverse pas, retourne vers A (signal 3), s'inverse, repart vers B' où il est détecté (signal 3'). Il retourne vers A (signal 4), s'inverse, repart vers B' où il est détecté (signal 4').

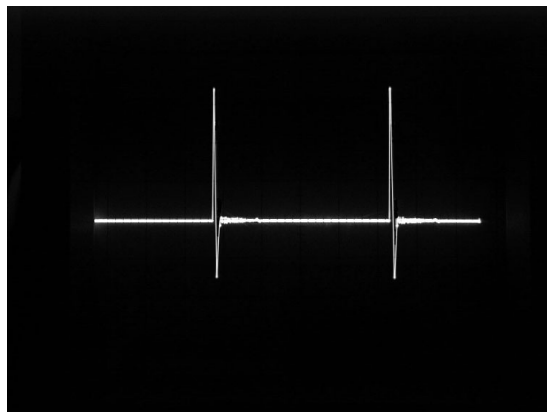
On peut, évidemment, faire un montage équivalent au moyen d'une seule bobine et détecter le signal en B.

3.3.4. «Adaptation» de la ligne

Il est possible, en réunissant les extrémités B' du câble par un résistor de résistance variable convenablement choisi, d'amener à zéro la grandeur du signal réfléchi en B'.

On utilisera pour cela la pièce mentionnée au point 6 (voir § 2.1) que l'on enfichera à la sortie B' de la seconde bobine. En ajustant le résistor de résistance variable, commandé par le bouton rouge, on peut «éteindre» le signal réfléchi.

Seul le signal envoyé par le générateur subsiste. Les réflexions du signal aux extrémités A et B du câble ont été supprimées. Cette propriété permet de supprimer les «échos» dans les lignes de télécommunication.



3.4. Détermination plus précise de la célérité du signal

Il est évidemment possible, en exploitant l'ensemble des résultats expérimentaux que l'on peut recueillir en utilisant tous les éléments du montage, d'obtenir une meilleure estimation de la célérité du signal.

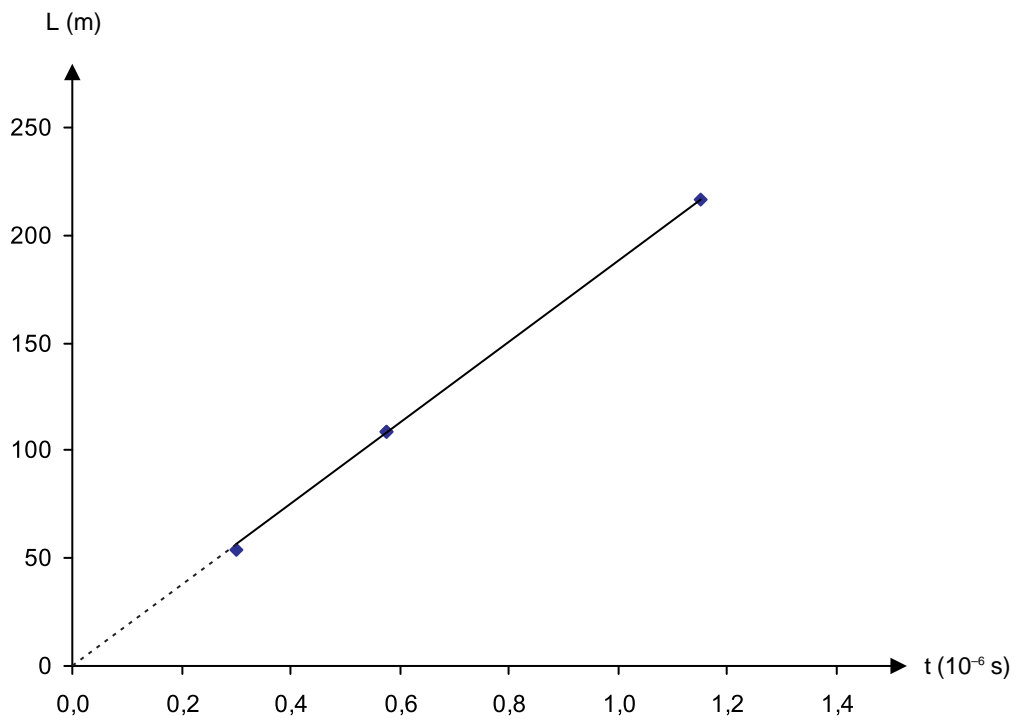
Il faut, comme au paragraphe 3.2. déterminer:

- les longueurs des conducteurs, longueurs qu'il est possible, dans une certaine mesure, de faire varier;
- les durées mises par le signal pour effectuer les différents trajets, éventuellement en modifiant le réglage de la base de temps de l'oscilloscope.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Trajet	Longueur (m)	Durée (10 ⁻⁶ s)
A → B → A	108,40	0,575
A → B	54,20	0,300
A → B' → A	216,90	1,150
A → B'	108,45	0,575

Le graphique ci-dessous traduit les résultats indiqués dans le tableau.



La pente de la droite, soit $1,88 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ donne la célérité v du signal:

$$v = 188\,000 \text{ km/s}$$