

## Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air à partir de la distance parcourue et du temps de propagation d'une impulsion lumineuse courte

### Objectifs expérimentaux

- Mesure relative du temps de propagation  $t$  d'une impulsion lumineuse courte avec un oscilloscope en fonction de la position  $s$  du miroir de réflexion
- Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air à partir de la pente du graphe  $s = f(t)$
- Mesure absolue du temps de propagation  $t$  d'une impulsion lumineuse courte avec un oscilloscope pour une distance parcourue  $2s$  spécifiée par marquage du zéro avec un miroir de référence
- Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air sous la forme du quotient de la distance parcourue par le temps de propagation
- Calibrage de la mesure du temps avec un signal oscillateur commandé par quartz
- Mesure absolue du temps de propagation  $t$  d'une impulsion lumineuse courte pour une distance parcourue  $2s$  spécifiée par marquage du zéro avec un miroir de référence.
- Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air sous la forme du quotient de la distance parcourue par le temps de propagation calibré

### Principes de base

L'appareil de mesure de la vitesse de la lumière émet des impulsions lumineuses très courtes, rouges d'environ 20 ns de largeur par l'intermédiaire d'une LED haute performance. Les impulsions lumineuses sont converties en impulsions de tension après un aller-retour sur une section de mesure connue et observées avec un oscilloscope.

#### Chemin optique:

La source lumineuse, une LED allumée rouge clair ( $\lambda = 615 \text{ nm}$ ) est projetée de la lentille  $L$  à l'infini à travers la fenêtre  $F_1$  de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière. Le grand miroir triple  $T_1$  renvoie la marche des rayons sur soi-même si bien que la LED est à nouveau reprojettée sur elle-même (voir fig. 1).

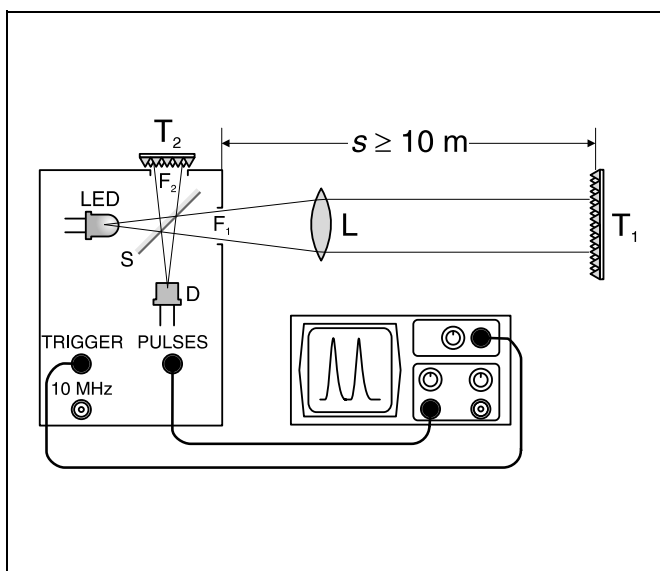
La lame séparatrice  $S$  dans l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière réfléchit la lumière renvoyée vers le bas sur la photodiode  $D$ . Elle réfléchit en même temps la moitié de la lumière émise vers le haut où elle s'échappe par la deuxième fenêtre  $F_2$ . Cette marche des rayons orientée vers le haut équivaut celle qui sort horizontalement.

Le petit miroir triple  $T_2$  placé juste au-dessus de  $F_2$  génère une impulsion de référence avec un retard négligeable du temps de propagation et n'influence pas le rayon mesuré.

#### Procédé de mesure:

Un temps de propagation de l'impulsion lumineuse d'exactly 60 ns pour l'aller et le retour correspond à une section de mesure de 10 m. La durée de l'impulsion est adaptée avec env. 20 ns à ce temps de propagation. Pour cela, la construction spéciale de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière permet d'utiliser un oscilloscope relativement simple: Les impulsions lumineuses sont émises avec une fréquence de répé-

Fig. 1: Schéma de principe pour la mesure de la vitesse de la lumière avec des impulsions lumineuses courtes



**Matériel**

1 appareil de mesure de la vitesse de la lumière . . . . .	476 50
1 adaptateur secteur enfichable 230 V/12 V~	562 791
1 lentille dans monture, $f = 200$ mm . . . . .	460 10
1 banc d'optique à profil normalisé . par ex.	460 32
2 cavaliers d'optique, $h : 90$ mm, $l : 50$ mm .	460 352
1 oscilloscope bicanal 303 . . . . .	575 211
3 câbles HF, 1 m . . . . .	501 02
1 règle en bois, 1 m . . . . .	311 03
1 grand pied en V . . . . .	300 01
1 tige, 100 cm . . . . .	300 44
1 noix Leybold . . . . .	301 01

tion élevée de 40 kHz. Cela garantit encore une luminosité suffisante du signal sur l'écran de l'oscilloscope, même pour une utilisation de la vitesse de déviation maximale de l'oscilloscope.

Peu avant le déclenchement d'une impulsion lumineuse dans l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière, il est émis un signal de déclenchement pour le déclenchement externe de l'oscilloscope. L'impulsion de tension semble donc, même après, être encore complète sur l'écran de l'oscilloscope lorsque le temps de propagation de l'impulsion lumineuse est négligeablement bref, c.-à-d. lorsque le miroir triple est à une distance minimale avant  $F_1$  ou au-dessus de  $F_2$ . L'emploi d'un oscilloscope à ligne de retard intégrée n'est donc pas indispensable.

Si on augmente l'écartement entre le grand miroir triple et la fenêtre de sortie, l'impulsion se décale vers la droite sur l'écran de l'oscilloscope suite au temps de propagation prolongé. Le changement du temps de propagation peut être déterminé à partir de ce déplacement de l'impulsion. La vitesse de la lumière se calcule sous forme du quotient du changement de la distance parcourue par le changement du temps de propagation. En cas d'utilisation de l'impulsion de référence à travers le petit miroir triple, la définition absolue de la totalité du temps de propagation est réalisable avec l'oscilloscope. La vitesse de la lumière se calcule dans ce cas-là sous la forme du quotient de la distance parcourue par le temps de propagation.

Pour le calibrage de la mesure du temps, il est possible de représenter sur l'oscilloscope un signal oscillateur commandé par quartz simultanément avec l'impulsion de mesure. Comme le signal oscillateur peut se déplacer de plus de la durée d'une période par rapport à l'impulsion de mesure, ses flancs peuvent très bien servir de grille de mesure. La mesure du temps ne dépend alors pas de la base de temps de l'oscilloscope.

**Montage**

Le montage expérimental est représenté à la fig. 2.

**Montage mécanique et optique:**

- Installer le banc d'optique sur une table de hauteur adéquate et monter l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière sur le banc d'optique de telle sorte que la fenêtre  $F_1$  soit tournée vers la lentille (voir fig. 2)

- Monter la lentille à environ 20 cm de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière avec le centre à la hauteur de la fenêtre  $F_1$ .
- Fixer le grand miroir triple sur le matériel support (voir fig. 2) et le mettre en place à quelques mètres de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière. Orienter le centre à la hauteur de l'axe optique et la surface du miroir quasiment perpendiculairement à l'axe optique.
- Mettre en route l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière par connexion de l'adaptateur secteur enfichable.

Si en regardant de près l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière et la lentille, le miroir triple n'est pas éclairé d'une lumière rouge ou bien seulement sur les bords:

- légèrement modifier la direction du rayonnement en faisant basculer et pivoter sur le côté le banc d'optique, voire même éventuellement, en changeant la hauteur de la lentille jusqu'à ce que les rayons arrivent juste au centre du miroir triple.

**Connexion de l'oscilloscope:**

- Relier la sortie «Pulses» au canal 1 de l'oscilloscope et la sortie «Trigger» à l'entrée de déclenchement externe de l'oscilloscope par des câbles HF.

Tab. 1: Réglages de l'oscilloscope, donnés à titre d'exemple pour l'oscilloscope bicanal 303 (n° de cat. 575 211)

Mode de service:	seulement canal I
Canal I:	CC, 5–100 mV/cm
Ligne zéro:	sur le bord inférieur de l'écran
Déclenchement:	externe, CA, + (flanc ascendant)
Niveau de déclenchement:	automatique
Balayage:	0,2 $\mu$ S/cm, cal.
Déviation X:	1 $\times$
Intensité:	maximale

Chercher une impulsion de tension avec les réglages de l'oscilloscope mentionnés dans le tab. 1.

- Mettre en place le grand miroir triple à la distance maximale prévue pour l'expérience et optimiser l'amplitude des impulsions par de petites variations de l'ajustage optique, notamment en déplaçant la lentille sur le banc d'optique.
- Brancher la déviation de l'axe X de l'oscilloscope sur 10x.

**Réalisation****a) Mesure du temps de propagation en fonction de la position du miroir triple:**

- Placer le grand miroir triple à une petite distance du banc d'optique et marquer sa position.
- Amener le maximum de l'impulsion de tension sur une ligne verticale de la grille dans la moitié gauche de l'écran de l'oscilloscope par déplacement de la position X (voir fig. 3, en haut).
- Déplacer le grand miroir triple dans la marche des rayons, mesurer le déplacement  $s$  et noter la valeur relevée.
- Relever le décalage temporel  $t$  de l'impulsion de tension sur l'écran de l'oscilloscope (voir fig. 3, en bas) et la noter.
- Recommencer les mesures pour d'autres déplacements  $s$  (voir tab. 2)

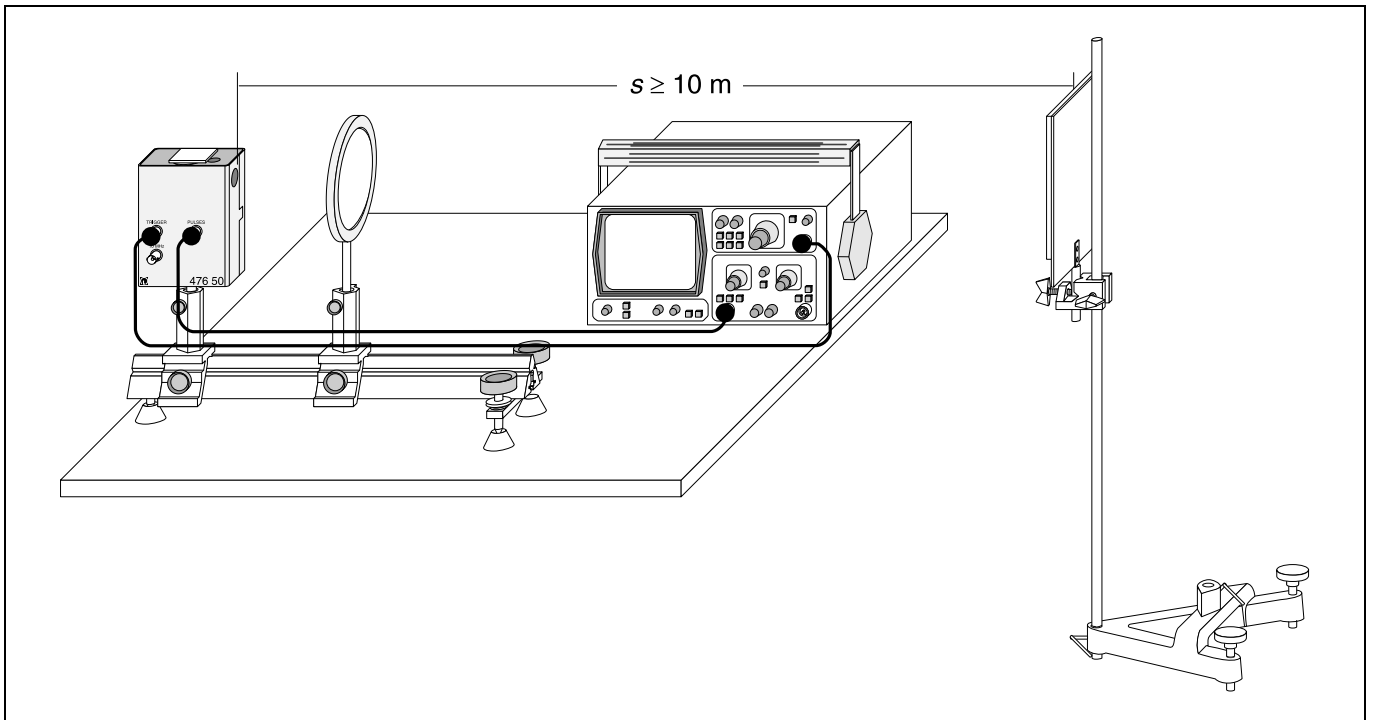


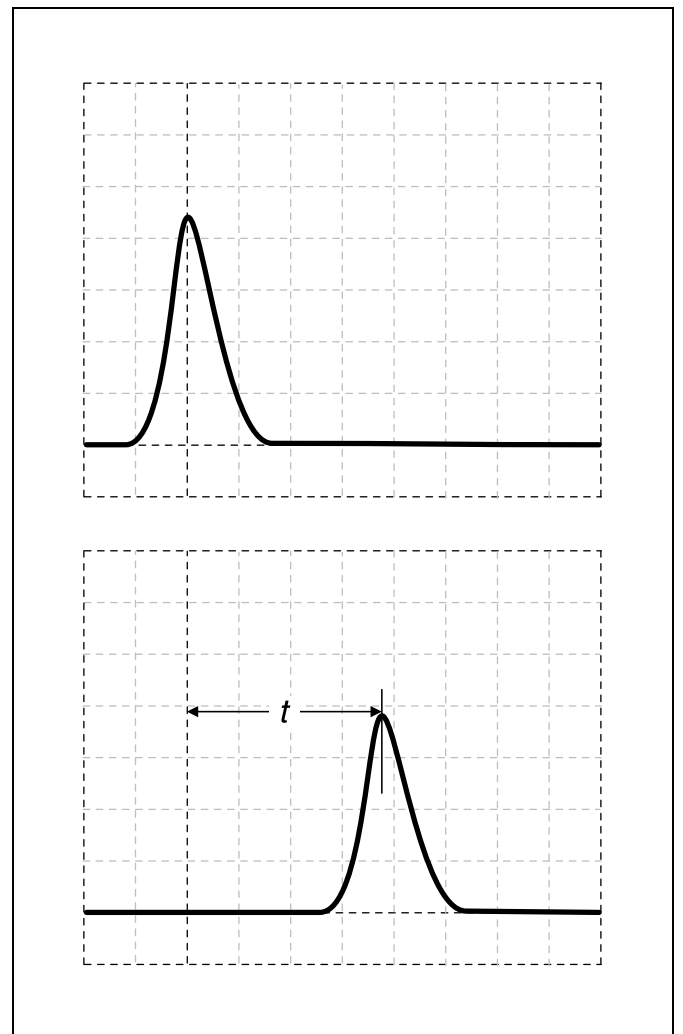
Fig. 2: Montage expérimental pour la mesure de la vitesse de la lumière

#### b) Mesure du temps de propagation avec un miroir de référence:

- Amener le montage sur le bord gauche de la table, se repérer à l'oeil nu à l'arête perpendiculaire de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière et marquer la position sur le sol (voir fig. 4).
- Tenir le petit miroir triple juste devant  $F_1$  et amener le maximum de l'impulsion de tension sur une ligne verticale de la grille dans la moitié gauche de l'écran de l'oscilloscope par déplacement de la position X.
- Pour finir, amener le petit miroir triple sur  $F_2$  et s'assurer que la position de l'impulsion de référence n'a pas changé (même chemin lumineux).
- Placer le grand miroir triple à au moins 10 m dans la marche des rayons de façon à ce qu'à une distance nette de l'impulsion de référence, l'impulsion de mesure soit visible en tant que deuxième signal sur l'écran de l'oscilloscope.
- En déplaçant le petit miroir triple sur l'ouverture de la fenêtre, régler les deux signaux sur exactement la même grandeur. Déplacer le flanc ascendant de l'impulsion de référence de façon à ce qu'il coupe la ligne du milieu au croisement avec une ligne verticale de la grille (voir fig. 5).
- Relever le temps de propagation  $t$  au point d'intersection de la deuxième impulsion avec la ligne du milieu (voir fig. 5) et le noter.

*Remarque: L'intervalle de temps entre l'impulsion de référence et l'impulsion de mesure ne coïncide avec la distance entre les deux flancs ascendants sur l'écran de l'oscilloscope que si les deux impulsions ont la même amplitude et que l'écartement est nettement plus grand que la largeur d'impulsion.*

- Marquer la position du grand miroir triple sur le sol, déterminer l'écartement  $s$  de la fenêtre  $F_1$  et le noter (voir fig. 4).

Fig. 3: Mesure relative du temps de propagation  $t$  de l'impulsion

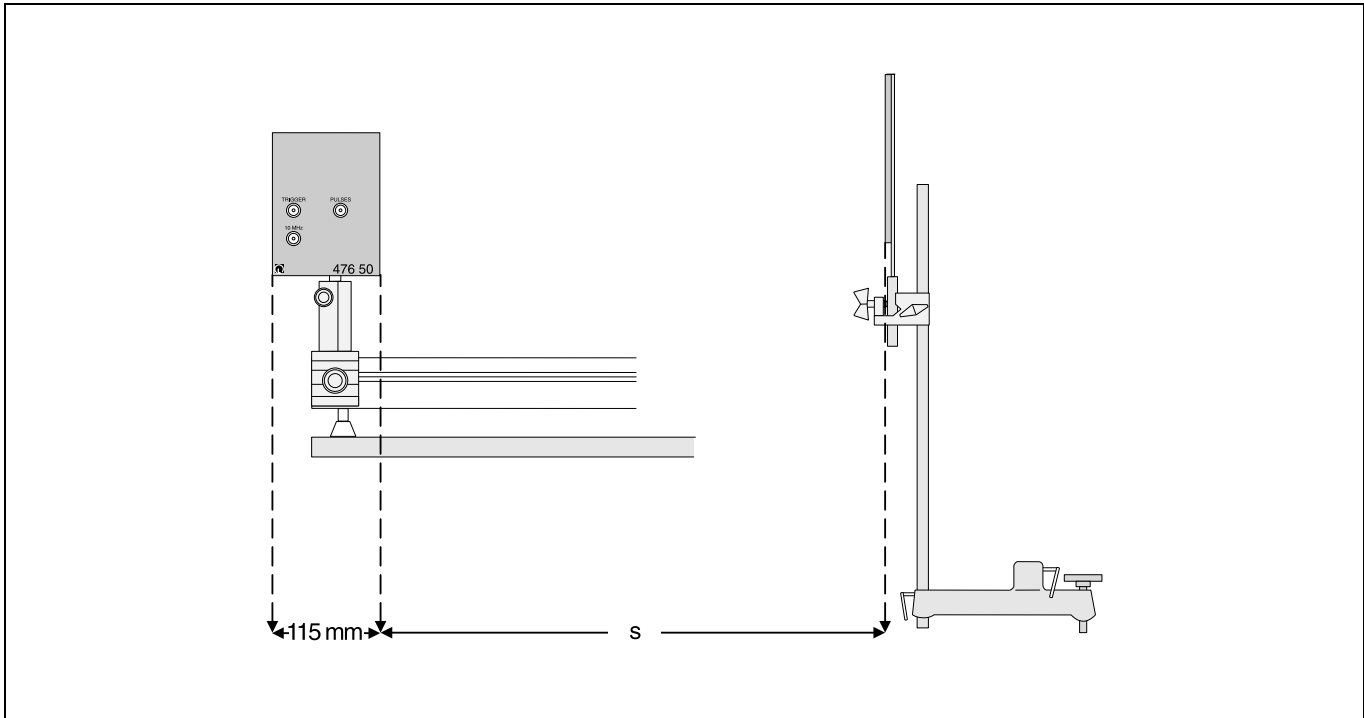


Fig. 4: Schéma pour la détermination de la position de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière et du grand miroir triple

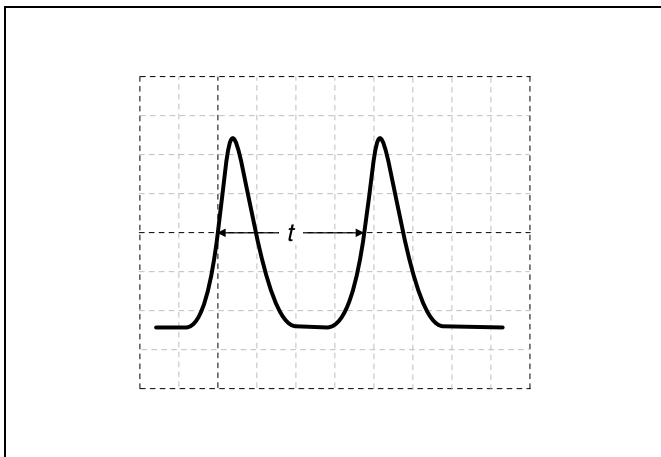


Fig. 5: Mesure absolue du temps de propagation  $t$  de l'impulsion lumineuse

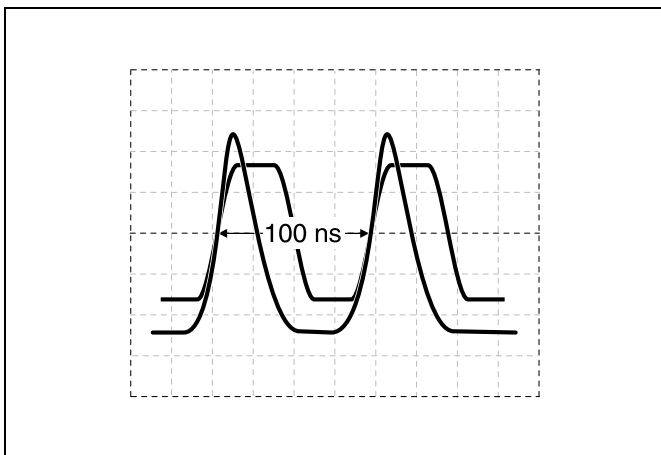


Fig. 6: Mesure absolue du temps de propagation  $t$  de l'impulsion lumineuse avec base de temps calibrée de l'extérieur

### c) Mesure du temps de propagation avec une base de temps calibrée de l'extérieur:

- Placer le petit miroir triple sur  $F_2$  et le grand miroir triple à environ 15 m dans la marche des rayons pour ainsi avoir deux impulsions de visibles sur l'écran de l'oscilloscope.
- Si besoin est, régler par variation du balayage un écartement le plus grand possible des deux impulsions sur l'écran de l'oscilloscope.
- En déplaçant le petit miroir triple sur l'ouverture de la fenêtre  $F_2$ , faire en sorte que les deux impulsions aient exactement la même taille.
- Relier la sortie 10 MHz de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière au canal II de l'oscilloscope par l'intermédiaire d'un troisième câble HF.
- Sélectionner le fonctionnement sur deux canaux (touche Dual) et connecter en plus le canal II de l'oscilloscope (CA, 0,1 V/cm) de façon à pouvoir voir simultanément les impulsions de mesure et le signal oscillateur.
- Déplacer le signal 10 MHz avec le bouton de réglage de la phase de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière de telle sorte que le flanc ascendant de la première impulsion de tension soit exactement au-dessus d'un flanc ascendant du signal 10 MHz (voir fig. 6).
- Ajuster l'écartement du grand miroir triple de façon à ce que le flanc ascendant de la deuxième impulsion de tension soit exactement au-dessus du flanc ascendant suivant du signal 10 MHz (voir fig. 6).
- Si besoin est, amener les impulsions de tension des deux miroirs triples à une taille parfaitement identique par ajustage ou désajustage optique du miroir triple puis finalement corriger la position des flancs ascendants.
- Marquer sur le sol la position de l'appareil de mesure de la vitesse de la lumière et du grand miroir triple (prendre ses repères en suivant d'un oeil les arêtes verticales du matériel), mesurer la distance  $s$  entre le grand miroir triple et la fenêtre  $F_1$  et noter la valeur relevée (voir fig. 4).

## Exemple de mesure

## a) Mesure du temps de propagation en fonction de la position du miroir triple:

Tab. 2: Déplacement  $s$  du grand miroir triple et temps de propagation  $t$  de l'impulsion lumineuse

$\frac{s}{m}$	$\frac{t}{ns}$
0,0	0
3,0	20
6,0	41
9,0	60
12,0	81
15,0	101
18,0	122

## b) Mesure du temps de propagation avec un miroir de référence:

$$s = 15,00 \text{ m}, t = 99 \text{ ns}$$

## c) Mesure du temps de propagation avec une base de temps calibrée de l'extérieur:

$$s = 15,05 \text{ m}$$

## Exploitation

## a) Mesure du temps de propagation en fonction de la position du miroir triple:

Les valeurs mesurées de la distance  $s$  sont représentées sur la fig. 6 en fonction de  $t$ . C'est à partir de la pente  $a$  de la droite passant par les points de mesure que l'on obtient la valeur suivante pour la vitesse de la lumière dans l'air:

$$c = 2 \cdot a = 2,98 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

## b) Mesure du temps de propagation avec un miroir de référence:

A partir du quotient de la distance  $s$  par le temps de propagation  $t$ , voici la valeur obtenue pour la vitesse de la lumière dans l'air:

$$c = 2 \cdot \frac{s}{t} = 3,03 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

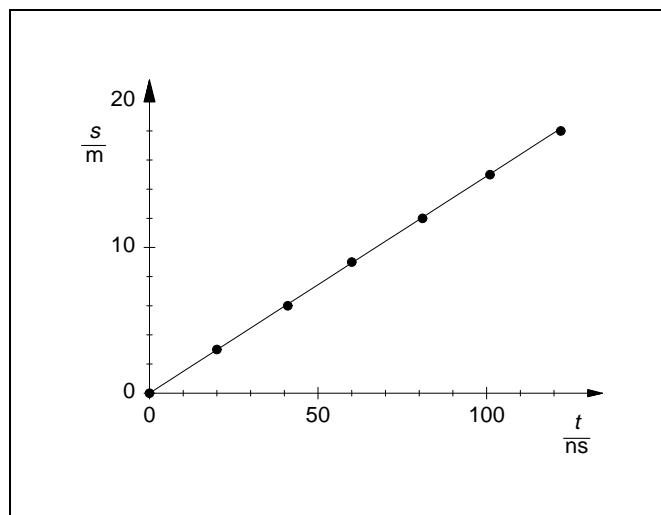


Fig. 7: Déplacement  $s$  du grand miroir triple en fonction du temps de propagation  $t$  de l'impulsion lumineuse

## c) Mesure du temps de propagation avec une base de temps calibrée de l'extérieur:

La distance  $s$  a été précisément sélectionnée de façon à ce que tout le temps de propagation  $t$  de l'impulsion lumineuse s'élevé à 100 ns.

$$c = 2 \cdot \frac{s}{100 \text{ ns}} = 3,01 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

## d) Comparaison entre les méthodes de mesure:

En plus des erreurs de lecture survenant dans toutes les mesures lors de la mesure du temps, il faut tenir compte pour les mesures des points a) et b) de la marge d'erreur des positions calibrées pour le balayage de l'oscilloscope. Elle est de 3 % avec l'oscilloscope indiqué.

## e) Valeurs littéraires:

Vitesse de la lumière dans le vide:

$$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Vitesse de la lumière dans l'air (vitesse de phase)

$$c = \frac{c_0}{n} = 2,997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

(Indice de réfraction  $n = 1,003$  dans des conditions normales)

Rigoureusement parlant, la vitesse de propagation des impulsions lumineuses courtes dans l'air correspond à la vitesse de groupe d'un paquet d'ondes. Vu la précision de mesure que l'on peut avoir, il est possible de renoncer à la distinction entre vitesse de phase et vitesse de groupe.