

Détermination de la vitesse de la lumière dans différents milieux de propagation

Objectifs expérimentaux

- Détermination de la vitesse de la lumière dans l'eau et indice de réfraction.
- Détermination de la vitesse de la lumière dans les liquides organiques et indice de réfraction.
- Détermination de la vitesse de la lumière dans le verre et indice de réfraction.

Notions de base

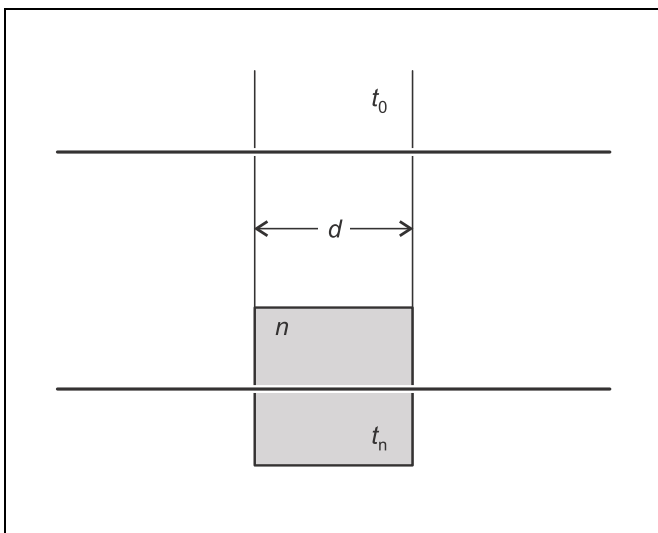


Fig. 1 La lumière se déplace plus lentement dans un milieu à indice de réfraction n que dans le vide, d'où le changement du temps de propagation t de la lumière pour une section d .

La vitesse de propagation de la lumière c_n dans un milieu matériel dépend de l'indice de réfraction n du milieu en question. Cette grandeur fonction du matériau caractérise la densité optique du milieu et indique de quelle valeur la lumière se déplace plus lentement dans le milieu considéré que dans le vide.

$$c_n = \frac{c_0}{n} \quad (I)$$

$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$: vitesse de la lumière dans le vide

Différents temps de propagation pour une section d correspondent aux diverses vitesses de propagation de la lumière. Dans un milieu matériel, la lumière se propage pendant le temps

$$t_n = \frac{d}{c_n} \quad (II),$$

alors que pour la même section de mesure dans le vide, il lui faudra le temps

$$t_0 = \frac{d}{c_0} \quad (III)$$

(voir fig. 1). Avec la définition

$$\Delta t = t_n - t_0,$$

on obtient d'après les équations (II) et (III) pour la vitesse de la lumière dans le milieu matériel l'équation déterminative

$$c_n = \frac{c_0}{1 + \frac{\Delta t}{d} \cdot c_0} \quad (IV).$$

Une comparaison avec (I) donne

$$n = 1 + \frac{\Delta t}{d} \cdot c_0 \quad (V).$$

Le changement de la vitesse de la lumière dans le milieu matériel est mesuré dans l'expérience moyennant un signal lumineux périodique de fréquence de modulation $\nu = 60$ MHz. La différence de temps de propagation Δt se traduit par un déphasage

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \nu \cdot \Delta t = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (VI)$$

T : Période

du signal. Pour mesurer le déphasage, un récepteur convertit le signal lumineux en une tension alternative

$$U = a \cdot \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t - \Delta\varphi) \quad (VII).$$

Un signal de référence qui oscille en synchronisme avec l'intensité de l'émetteur de lumière est amené par un déphasage électronique, à coïncider avec le signal de réception alors que l'émetteur et le récepteur de lumière sont distants l'un de l'autre dans l'air (indice de réfraction $n = 1,003$ dans des conditions normales de référence) d'une section s . Si on place maintenant un milieu à densité optique suffisante sur une section partielle d dans la marche des rayons, cela occasionne un changement du temps de propagation Δt du signal lumineux qu'il est possible de mesurer sous forme de déphasage $\Delta\varphi$ entre le signal de référence et le signal de réception.

Matériel

1 émetteur et récepteur de lumière	476 30
1 lentille $f = + 150$ mm	460 08
2 socles	300 11
1 oscilloscope à deux canaux 1004	575 221
1 règle métallique, 1 m	311 02

Vitesse de la lumière dans l'eau:

1 tube à 2 fenêtres	476 35
2 socles	300 11

eau distillée ou déminéralisée

Vitesse de la lumière dans des liquides organiques:

1 éthanol dénaturé, 1 l	671 972
1 glycérine, 99 %, 250 ml	672 121

1 cuve à faces parallèles en verre optique, 50×50×50 mm	477 03
1 plateau pour prisme	460 25
1 socle	300 11

Vitesse de la lumière dans le verre:

1 corps en verre acrylique	476 34
--------------------------------------	--------

Montage

Le montage expérimental est représenté sur les fig. 2 et 3.

- Installer l'émetteur de lumière à env. 1,5 m du récepteur, le brancher à la sortie (a) du récepteur à l'aide d'un câble coaxial de 6 m de long puis mettre le récepteur en route.
- Projeter le spot lumineux rouge de l'émetteur de lumière sur la plaque avant du récepteur et déplacer la pièce (e) par rapport au condenseur (d) de manière à ce que le spot lumineux rouge soit éclairé le plus uniformément possible.
- Installer la lentille dans la marche des rayons.
- Orienter l'émetteur de lumière et la lentille de manière à ce que le spot lumineux rouge incide sur l'orifice d'entrée du récepteur; si besoin est, optimiser l'orientation de l'émetteur de lumière avec les vis moletées (f).
- Brancher la sortie (c) du récepteur au canal II de l'oscilloscope.

Réglages de l'oscilloscope:

Couplage canal II:	CA
Déclenchement:	canal II
Base de temps:	2 μ s/DIV

- Observer le signal de réception sur l'oscilloscope en continuant d'optimiser l'orientation de l'émetteur de lumière et de la lentille.

Etant donné que l'oscilloscope à utiliser pour la détermination du déphasage doit être simple, les deux signaux sont combinés (multipliés) électroniquement avec un signal de fréquence $\nu' = 59,9$ MHz et la composante haute fréquence du signal combiné est supprimée. Le signal de réception a ensuite la forme suivante

$$U_1 = \frac{1}{2} a \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_1 \cdot t - \Delta\varphi) \quad (\text{VIII.})$$

avec $\nu_1 = \nu - \nu'$.

Ce signal peut être représenté avec un oscilloscope simple étant donné que la fréquence ν_1 ne vaut que 100 kHz. Le déphasage $\Delta\varphi$ n'a pas changé suite au mixage, mais il correspond maintenant à un *temps de propagation apparent* Δt_1 . Sur l'oscilloscope, on relève en supplément la période T_1 du signal combiné et on calcule

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{\Delta t_1}{T_1} \quad (\text{IX.})$$

ou

$$\Delta t = \Delta t_1 \cdot \frac{T}{T_1} = \frac{\Delta t_1}{T_1 \cdot \nu} \quad (\text{X.})$$

Par substitution dans les formulations (IV) et (V), on a pour la vitesse de la lumière dans un milieu

$$c_n = \frac{c_0}{1 + \frac{c_0}{d \cdot \nu} \cdot \frac{\Delta t_1}{T_1}} \quad (\text{XI.})$$

et pour l'indice de réfraction

$$n = 1 + \frac{c_0}{d \cdot \nu} \cdot \frac{\Delta t_1}{T_1} \quad (\text{XII.})$$

a) Vitesse de la lumière dans l'eau:

- Monter le support pour tube dans le socle, installer le tube à deux fenêtres et le fixer avec des élastiques, ainsi qu'il lustré sur la fig. 4.
- Placer un tuyau avec entonnoir au-dessus de l'olive inférieure du tube et ouvrir les deux robinets d'arrêt.
- Tenir l'entonnoir plus haut que le tube et remplir le tube avec de l'eau distillée avec le moins de bulles possible.

Note:

Il convient de laisser le robinet d'arrêt supérieur ouvert afin d'éviter une variation de la pression dans le tube en cas de changements de température.

b) Vitesse de la lumière dans des liquides organiques:

- Monter le plateau pour prisme sur le socle et fixer la cuve à faces parallèles en verre optique sur celui-ci à l'aide de l'attache métallique.
- Installer la cuve à faces parallèles en verre optique vide juste devant l'émetteur de lumière, dans la marche des rayons.

c) Vitesse de la lumière dans le verre:

- Monter le plateau pour prisme sur le socle et fixer sur celui-ci le corps en verre acrylique à l'aide de l'attache métallique.

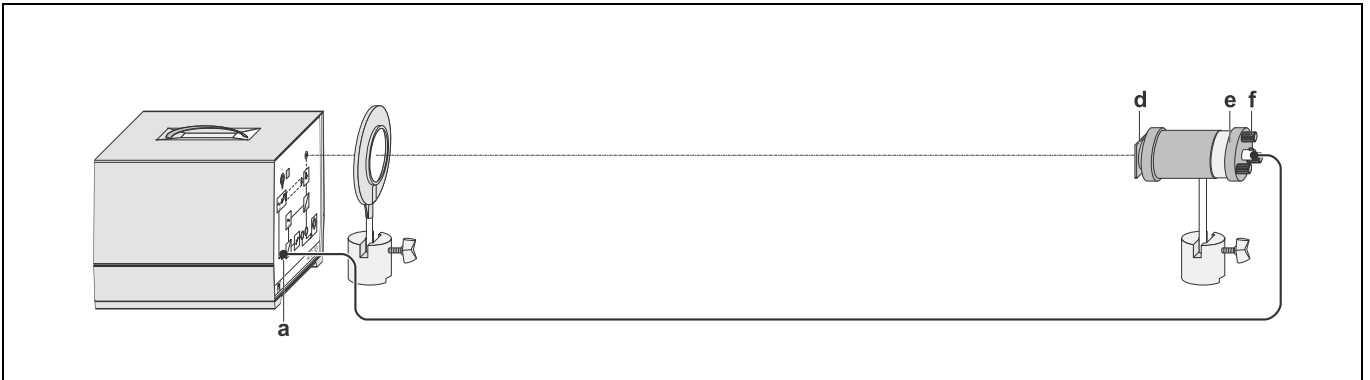


Fig. 2 Montage optique pour la détermination de la vitesse de propagation de la lumière

Réalisation

Note:

Une précision satisfaisante du résultat ne peut être obtenue qu'en cas de stabilité thermique de l'émetteur et du récepteur de lumière: ne commencer la procédure expérimentale qu'à condition que l'émetteur et le récepteur de lumière soient enclenchés depuis une demi-heure.

Comme la fréquence de modulation $\nu = 60$ MHz est cadencée par un quartz, sa mesure n'est pas nécessaire.

Ajustement de phase entre le signal de référence et le signal de réception:

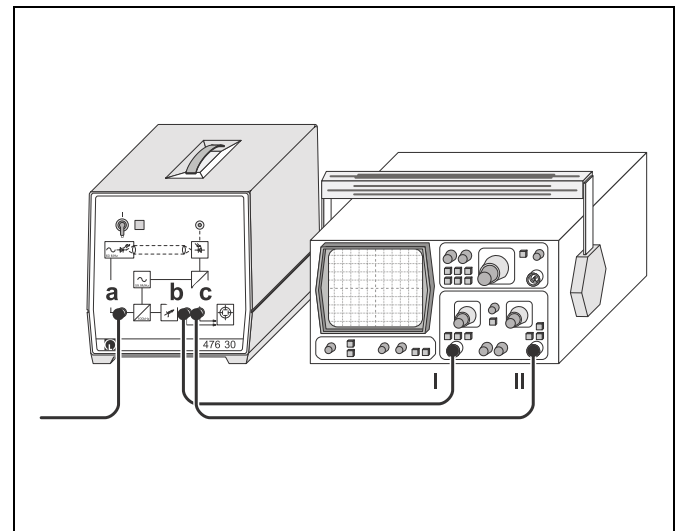
- Brancher la sortie (b) du récepteur au canal I de l'oscilloscope puis observer simultanément les canaux I (signal de référence) et II (signal de réception).

Réglages de l'oscilloscope:

Couplage canal I et canal II: CA
 Déclenchement: canal I
 Base de temps: 2 μ s/DIV

- Régler les positions verticales des canaux I et II de manière à ce que les deux signaux soient aussi symétriques que possible de part et d'autre de la ligne horizontale médiane de l'écran.
- Pour la vérification, régler (utiliser le dispositif de réglage précis) les déviations verticales de manière à ce que les maxima des deux signaux soient le plus possible sur une ligne horizontale (et ce, sur la même ligne horizontale).
- Utiliser le déphaseur φ du récepteur pour faire coïncider les deux signaux le mieux possible.
- Sélectionner une position horizontale appropriée des signaux et déterminer la période T_1 .

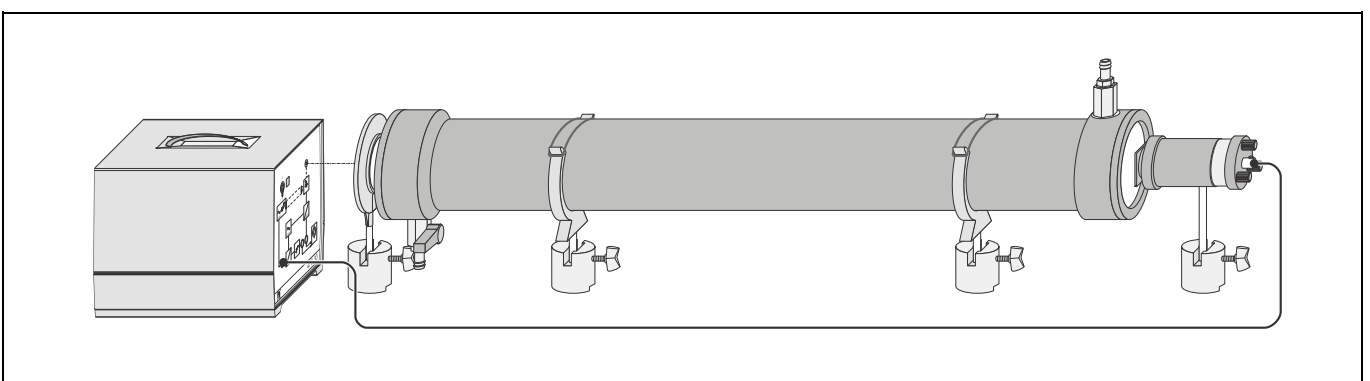
Fig. 3 Branchement de l'oscilloscope pour la mesure du déphasage du signal lumineux périodique



a) Vitesse de la lumière dans l'eau:

- Placer le tube rempli d'eau dans la marche des rayons, juste devant l'émetteur de lumière.
- Régler la base de temps 1 μ s/DIV, relever l'écartement des passages à zéro et déterminer le *changement apparent du temps de propagation* Δt_1 .
- Eventuellement recommencer la mesure plusieurs fois puis déterminer la moyenne des valeurs Δt_1 mesurées à chaque fois.

Fig. 4 Détermination de la vitesse de la lumière dans l'eau



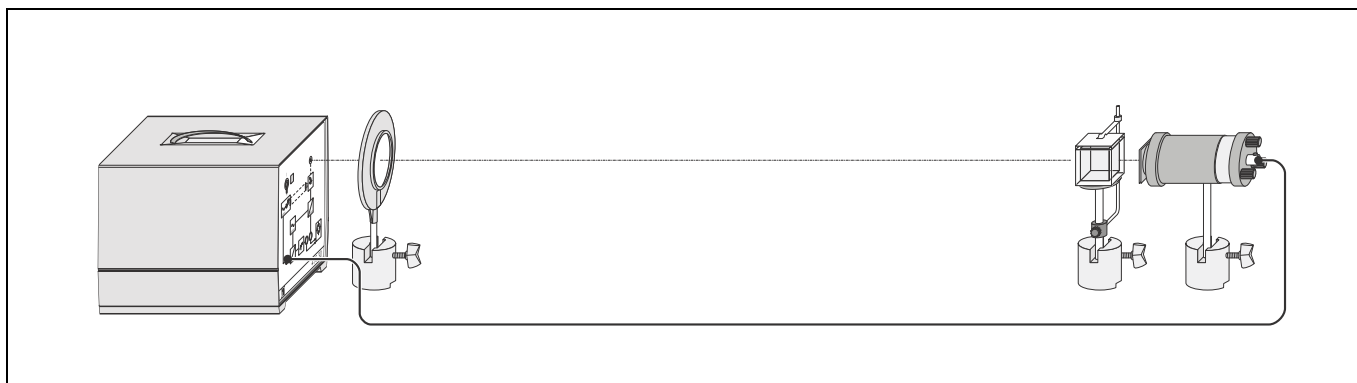


Fig. 5 Détermination de la vitesse de la lumière dans des liquides organiques

b) Vitesse de la lumière dans des liquides organiques:

- Pour une meilleure représentation du déphasage, sélectionner un agrandissement du domaine pour les deux signaux.

Réglages de l'oscilloscope:

Couplage canal I et canal II: CA

Déclenchement: canal I

Réglage automatique

du seuil de déclenchement: arrêt

Base de temps: 0,1 μ s/DIV

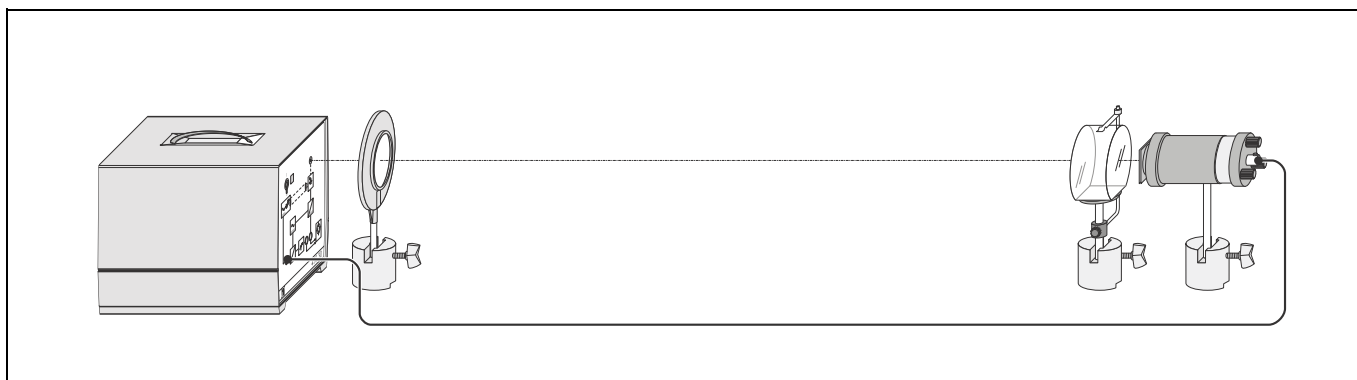
Amplitude: 0,1 mV/DIV

- Sélectionner la position horizontale appropriée des signaux (par ex. régler le passage à zéro au centre de l'écran).
- Remplir la cuve à faces parallèles en verre optique avec de l'éthanol puis observer le décalage des signaux.
- Relever l'écartement des passages à zéro et déterminer le *temps de propagation apparent* Δt_1 .
- Vider la cuve à faces parallèles en verre optique et utiliser le déphaseur φ pour faire à nouveau coïncider les signaux.
- Remplir la cuve à faces parallèles en verre optique avec de la glycérine puis recommencer la mesure.

c) Vitesse de la lumière dans le verre:

- Réaliser la mesure du déphasage ainsi que décrit au point b) – mais avec le corps en verre acrylique à la place de la cuve à faces parallèles en verre optique.

Fig. 6 Détermination de la vitesse de la lumière dans le verre



Exemple de mesure**a) Vitesse de la lumière dans l'eau:**

$$d = (100 \pm 1) \text{ cm}$$

$$\Delta t_1 = (0,70 \pm 0,05) \text{ DIV} \cdot 1 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (0,70 \pm 0,05) \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_1 = (4,90 \pm 0,05) \text{ DIV} \cdot 2 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (9,8 \pm 0,1) \text{ } \mu\text{s}$$

b) Vitesse de la lumière dans les liquides organiques:

Le signal de référence et le signal de réception pour l'éthanol et la glycérine sont à peu près ainsi que représentés sur la fig. 8.

Ethanol:

$$d = (5,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$\Delta t_1 = (0,3 \pm 0,1) \text{ DIV} \cdot 0,1 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (0,03 \pm 0,01) \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_1 = (4,90 \pm 0,05) \text{ DIV} \cdot 2 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (9,8 \pm 0,1) \text{ } \mu\text{s}$$

Glycérine:

$$d = (5,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$\Delta t_1 = (0,4 \pm 0,1) \text{ DIV} \cdot 0,1 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (0,04 \pm 0,01) \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_1 = (4,90 \pm 0,05) \text{ DIV} \cdot 2 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (9,8 \pm 0,1) \text{ } \mu\text{s}$$

c) Vitesse de la lumière dans le verre acrylique:

$$d = (5,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$\Delta t_1 = (0,6 \pm 0,1) \text{ DIV} \cdot 0,1 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (0,06 \pm 0,01) \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_1 = (4,90 \pm 0,05) \text{ DIV} \cdot 2 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV} = (9,8 \pm 0,1) \text{ } \mu\text{s}$$

Exploitation**a) Vitesse de la lumière dans l'eau:**

L'équation (XII) permet de déterminer l'indice de réfraction n pour l'eau:

$$n = 1,36 \pm 0,03$$

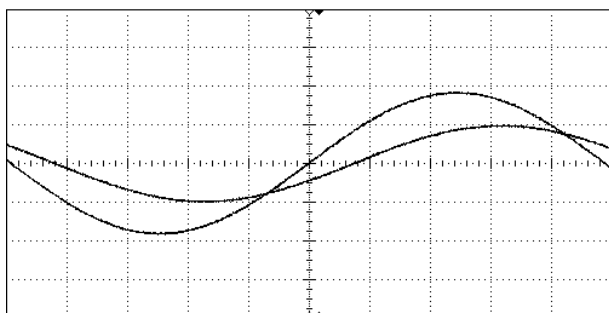
Pour la vitesse de la lumière dans l'eau, on obtient d'après l'indice de réfraction

$$c = (2,20 \pm 0,05) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Valeur littéraire:

Indice de réfraction de l'eau: $n = 1,333$

Fig. 7 Signal de référence et signal de réception pour l'eau, $d = 100 \text{ cm}$, déviation horizontale $1 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV}$

**b) Vitesse de la lumière dans les liquides organiques:**

L'équation (XII) permet de déterminer les indices de réfraction n pour l'éthanol et la glycérine.

$$\text{Ethanol: } n = 1,3 \pm 0,1$$

$$\text{Glycérine: } n = 1,4 \pm 0,1$$

Pour la vitesse de la lumière dans l'éthanol et dans la glycérine, on obtient d'après les indices de réfraction

$$\text{Ethanol: } c = (2,29 \pm 0,16) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Glycérine: } c = (2,13 \pm 0,14) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Valeurs littéraires:

Indice de réfraction de l'éthanol $n = 1,36$

Indice de réfraction de la glycérine $n = 1,47$

c) Vitesse de la lumière dans le verre acrylique:

L'équation (XII) permet de déterminer l'indice de réfraction n pour l'eau:

$$n = 1,6 \pm 0,1$$

Pour la vitesse de la lumière dans le verre acrylique, on obtient d'après l'indice de réfraction

$$c = (1,86 \pm 0,14) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Valeur littéraire:

Indice de réfraction du verre acrylique $n = 1,5$

Résultat

Si on place un milieu optiquement dense dans le faisceau lumineux, le temps de propagation de la lumière change. Pour un signal lumineux périodique, le changement du temps de propagation se traduit par un déphasage. L'indice de réfraction du milieu peut être déterminé d'après le déphasage.

Fig. 8 Signal de référence et signal de réception pour le verre acrylique, $d = 5 \text{ cm}$, déviation horizontale $0,1 \text{ } \mu\text{s}/\text{DIV}$

