

Détermination de la vitesse de la lumière selon la méthode du miroir tournant de Foucault et Michelson

Mesure du déplacement de l'image en fonction de la vitesse de rotation du miroir

Objectifs expérimentaux

- Mesure du déplacement Δx de l'image de la source lumineuse avec le miroir tournant en rotation
- Mesure de la vitesse de rotation ν du miroir tournant en rotation
- Détermination de la vitesse de la lumière c à partir de la vitesse ν , du déplacement Δx et du chemin lumineux Δs entre le miroir tournant et le miroir final

Principes de base

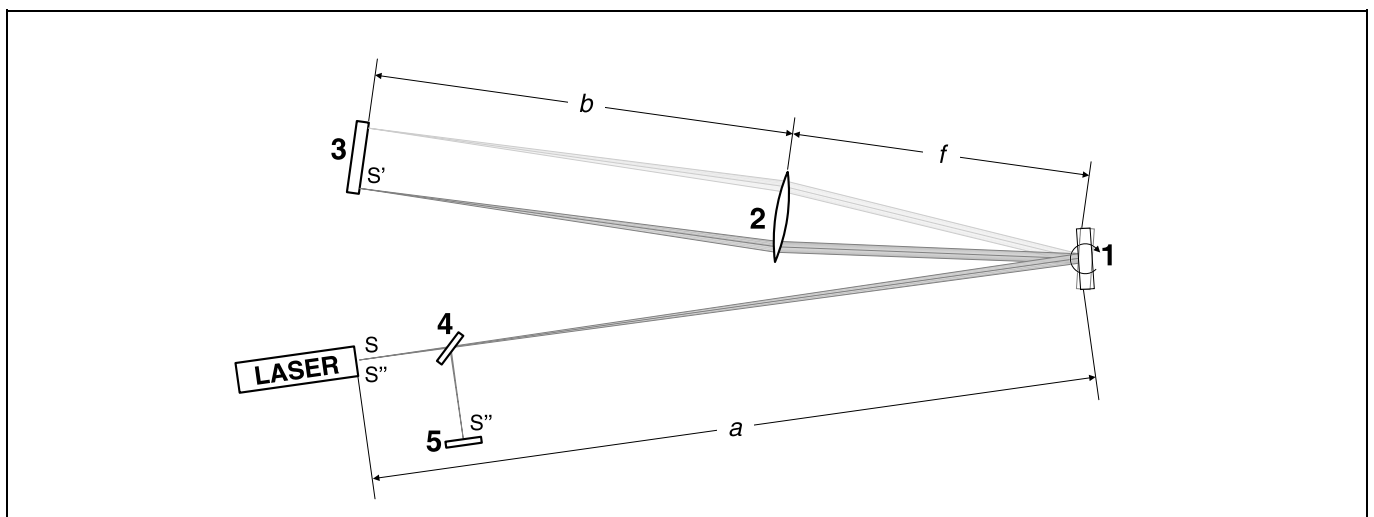
La mesure de la célérité de la lumière selon la méthode du miroir tournant reprend un procédé suggéré en 1850 par L. Foucault et optimisé en 1878 par A. Michelson: La lumière parcourt une distance connue entre deux miroirs en effectuant un aller et retour et nécessite pour cela un temps de propagation tout d'abord inconnu. Pendant ce temps, le premier miroir se tourne à une fréquence de rotation connue, très élevée. C'est donc sous un angle modifié que le faisceau lumineux qui revient va à l'encontre du miroir tournant d'où il sera également réfléchi. On relève la position de la raie de réflexion sur une échelle, position à partir de laquelle on calcule ensuite l'angle de rotation du miroir et ainsi le temps de propagation de la lumière.

La lampe autrefois utilisée comme source lumineuse est ici remplacée par un laser He-Ne (voir fig. 1). La source de lumière S est à une distance a d'un miroir tournant (1). La lumière qui y est réfléchié incide sur une lentille (2) située à une distance égale à sa distance focale f . Celle-ci génère une image S' de la source lumineuse sur un miroir final plan (3) à une distance b . Par réflexion des faisceaux lumineux sur le miroir final et une nouvelle réflexion sur le miroir tournant, il se forme à l'orifice de sortie du laser une image S'' de la première image S' .

Si on tourne le miroir tournant, l'image S' traverse le miroir final. Le faisceau principal évolue entre la lentille et le miroir final parallèlement à l'axe de la lentille étant donné que le miroir tournant est dans le foyer de la lentille. Sur le miroir final, le faisceau principal se réfléchit sur soi-même et revient par le même chemin au miroir tournant et de là, à l'orifice de sortie du laser. Indépendamment de la position du miroir tournant, l'image S'' est toujours à la même place si le miroir tournant est au repos ou tourne lentement. Les images S' et S'' sont générées tant que le faisceau primaire venant du miroir tournant est situé dans l'angle d'ouverture de la lentille. Le miroir étant en rotation, la luminosité des images S' et S'' est par conséquent d'autant plus forte que la largeur utilisable de la lentille est grande.

Une lame séparatrice (4) réfléchit une partie de la lumière qui revient sur une règle en verre (5). Le chemin optique de la règle en verre au miroir tournant est également a , donc l'image S' est aussi représentée sur la règle en verre.

Fig. 1: Marche des rayons pour la détermination de la vitesse de la lumière selon la méthode du miroir tournant
1 miroir tournant 3 miroir final 5 règle en verre
2 lentille, $f = 5$ m 4 lame séparatrice



Matériel

1 miroir tournant pour la vitesse de la lumière	476 40
1 laser He-Ne, à polarisation rectiligne	471 840
1 miroir à surface métallisée, Ø 120 mm	463 20
1 lentille, $f = 5$ m	460 12
1 lame séparatrice	471 88
1 monture-support avec pinces à ressort . . .	460 22
1 règle en verre	311 09
1 transformateur variable, 0 à 250 V	521 40
1 oscilloscope bicanal 303	575 211
1 détecteur semiconducteur	559 92
1 câble HF, 1 m	501 02
1 raccord droit, BNC	501 10
1 tige, 100 cm	300 44
1 tige, 47 cm	300 42
1 tige, 25 cm	300 41
1 grand pied en V	300 01
4 petits pieds en V	300 02
1 socle	300 11
2 noix Leybold	301 01
1 noix double à pinces tournantes	301 09
1 règle en bois, 1 m	311 03

Pendant le temps Δt que la lumière met pour parcourir le chemin

$$\Delta s = 2(f + b) \quad (I)$$

du miroir tournant au miroir final et retour, le miroir tournant se tourne d'un angle mesurable

$$\Delta \alpha = 2 \pi \nu \cdot \Delta t \quad (II)$$

pour de grandes vitesses de rotation ν .

L'image S'' se déplace alors sur la règle en verre d'une distance

$$\Delta x = 2 \Delta \alpha \cdot a \quad (III)$$

On a donc

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{8\pi\nu \cdot (f + b) \cdot a}{\Delta x} \quad (IV)$$

Les distances a et b ne peuvent pas être choisies indépendamment l'une de l'autre. Comme la source lumineuse projetée sur le miroir final est très nette, la loi en vigueur est celle de la projection

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a + f} \quad (V)$$

Remarque de sécurité

Le laser He-Ne répond aux exigences techniques à satisfaire en matière de sécurité pour le matériel didactique et pédagogique «Laser: DIN 58126, 6^{ème} partie» pour les lasers de la classe 2. Si les remarques correspondantes stipulées dans le mode d'emploi sont observées, l'expérimentation avec le laser He-Ne ne présente aucun danger.

- Ne pas fixer le regard sur le faisceau direct ou réfléchi.
- Eviter de dépasser la limite d'éblouissement (c.-à-d. qu'aucun observateur ne doit avoir l'impression d'être ébloui).

Comme résultat final, on obtient par conséquent pour la vitesse de la lumière le rapport

$$c = 8\pi \cdot (f + 2a) f \cdot \frac{\nu}{\Delta x} \quad (VI)$$

Un déplacement le plus grand possible Δx exige donc une vitesse de rotation ν la plus grande possible, une distance focale f la plus grande possible et une distance a la plus grande possible: le miroir tournant pour la vitesse de la lumière (476 40) atteint une vitesse de rotation $\nu = 450$ Hz, la lentille (460 12) a la distance focale $f = 5$ m. La distance a peut en principe être choisie au gré de l'expérimentateur. Par contre, il faut s'accommoder de pertes d'intensité issues de la divergence du faisceau laser et d'un grand travail d'ajustage. Le dispositif schématisé à la fig. 1 représente un compromis pour lequel le laser et le miroir final sont côte à côte, donc avec $a = f + b$. Par application à l'équation (V), on calcule

$$b = \sqrt{2} \cdot f = 7,1 \text{ mm et}$$

$$a = (1 + \sqrt{2}) \cdot f = 12,1 \text{ m.}$$

La distance a entre le laser et le miroir tournant correspond à la longueur totale du montage.

Montage

Il est nettement plus facile d'ajuster les éléments optiques s'il y a deux personnes pour réaliser le montage. La marche des rayons devrait évoluer le plus horizontalement possible:

sur un sol bien plat, fixer les tiges des éléments optiques au sommet d'un pied (voir fig. 2) de façon à ce qu'elles dépassent du pied d'env. 1 cm et touchent le sol (hauteur de rayonnement = 15 cm);

sur un sol nettement irrégulier, fixer les tiges dans la barre transversale d'un pied en laissant suffisamment de jeu pour corriger la hauteur;

Contrôler la hauteur de rayonnement avec la règle en bois.

Laser, lentille et miroir final:

- Marquer sur le sol la position $P_1 = 0$ m pour le miroir tournant, $P_2 = 5$ m pour la lentille et $P_3 = 12,1$ m pour le miroir final et le laser (voir fig. 1).
- Fixer le laser sur la tige et coller une feuille de papier blanc autour de l'orifice de sortie du laser pour pouvoir plus tard observer plus facilement le faisceau lumineux qui revient.
- Fixer dans un petit pied la tige du laser, celle de la lentille et celle du miroir final.
- Orienter les tiges le plus verticalement possible à l'aide des vis de réglage des pieds.
- Placer côte à côte le laser et le miroir final à P_3 , écartés de 30 à 40 cm (voir fig. 1 et 2).

Miroir tournant:

- Fixer la tige au sommet du grand pied en V de façon à ce quelle ressorte d'env. 1 cm vers le bas et qu'elle touche le sol.
- Fixer le miroir tournant pour la détermination de la vitesse de la lumière à la tige, le milieu du miroir étant à la hauteur du faisceau (voir fig. 3); vérifier la hauteur du faisceau avec la règle en bois.
- Placer le miroir tournant à la position P_1 et à l'aide des vis de réglage du pied, orienter l'axe de rotation du miroir le plus possible à la verticale; attendre pour enficher la clé de réglage.

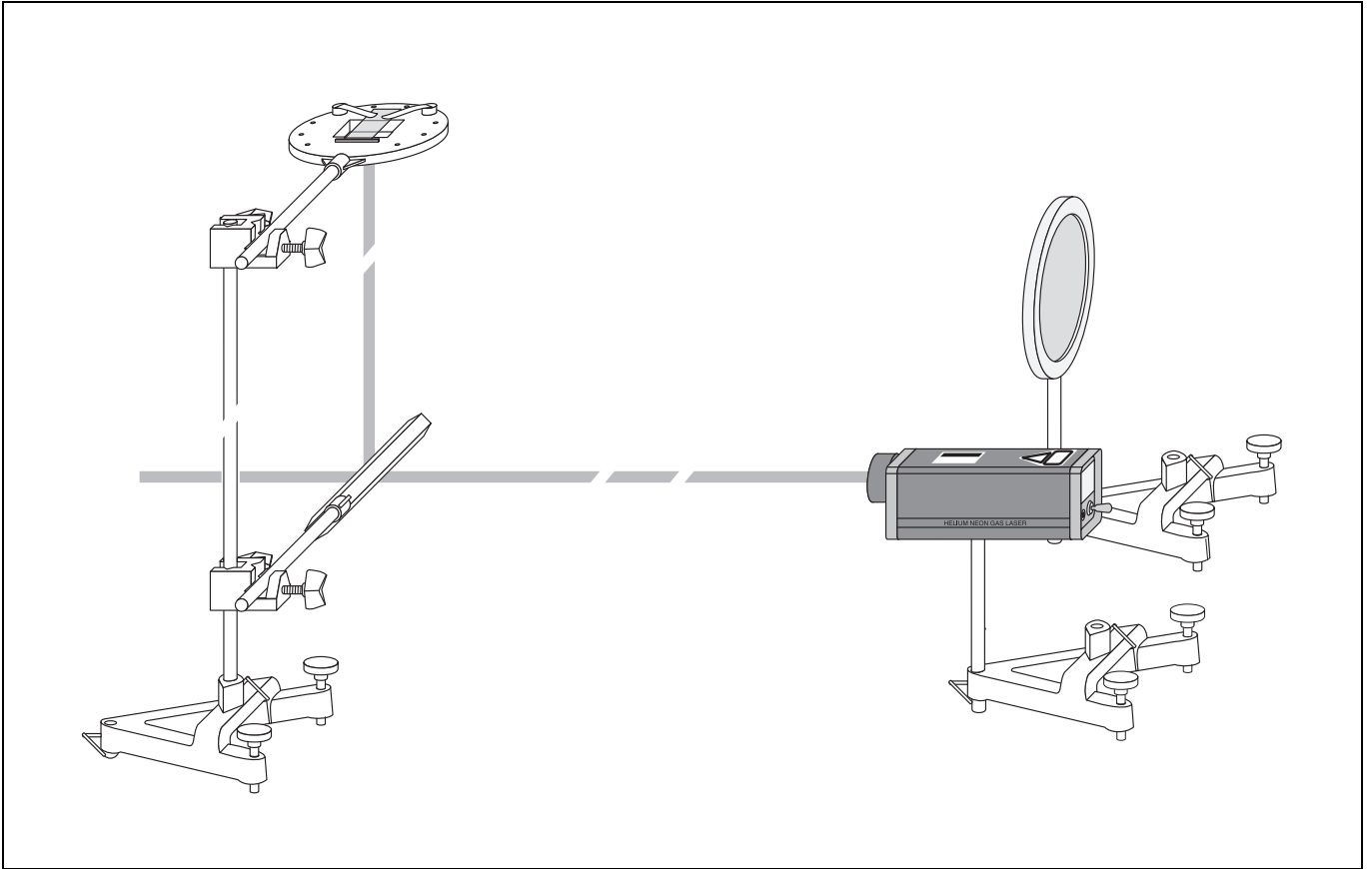
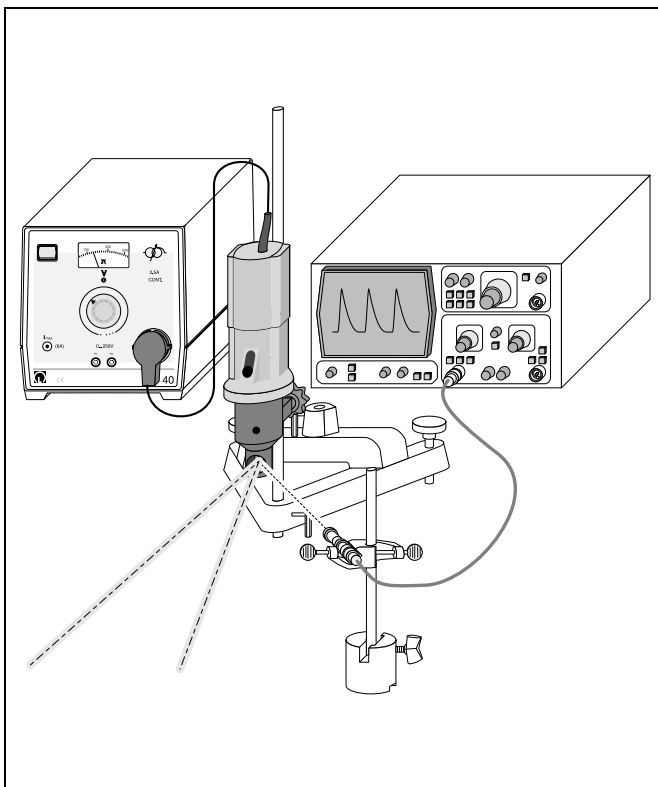


Fig. 2: Montage partiel 1 avec laser, miroir final, lame séparatrice et règle en verre; les distances ne sont pas fidèles à l'échelle

Fig. 3: Montage partiel 2 avec miroir tournant, transformateur variable et dispositif pour la mesure de la fréquence



- Brancher le moteur du miroir tournant au transformateur variable et positionner le bouton de réglage du transformateur variable sur 0 V.
- Mettre en route le moteur et le transformateur variable.
- Alourdir le pied pour l'empêcher de glisser
- Lentement augmenter la tension de sortie du transformateur variable à 240 V et vérifier que le pied du miroir tournant ne glisse pas.

Ajustage:

- Ramener la tension de sortie du transformateur variable à 0 V et arrêter le transformateur variable.
- A l'aide de la clé de réglage, tourner une face du miroir vers l'avant.
- Mettre le laser en route et en faisant tourner ou en déplaçant le pied ainsi qu'à l'aide des vis de réglage du pied, l'orienter de telle sorte que le rayon laser éclaire symétriquement le miroir tournant.
- A l'aide de la clé de réglage, faire tourner le miroir tournant jusqu'à ce que le rayon laser - d'abord sans lentille - soit réfléchi sur le miroir final; à l'aide des vis de réglage du pied, orienter le rayon réfléchi vers le centre du miroir final; si besoin est, prudemment tourner et déplacer le pied.
- Eventuellement réajuster le laser.
- Placer la lentille à la position P_2 perpendiculairement au faisceau dans la marche des rayons entre le miroir tournant et le miroir final (voir fig. 1); orienter la lentille de façon à ce que le faisceau lumineux passe par le centre de la lentille pour atteindre par la suite le miroir final en son centre.
- Tenir une feuille de papier dans le faisceau lumineux entre la lentille et le miroir final et contrôler si le diamètre du faisceau devient minimal au niveau du miroir final donc, si l'image S' est nette; pour cela, éventuellement enlever le miroir final.

Si l'image n'est pas nette (la figure de diffraction en forme de croix qui est à l'origine de l'image est le résultat d'une diffraction sur les bords du miroir tournant et ne peut pas être évitée):

- Remesurer les positions P_2 et P_3 et corriger le montage.
- Orienter le miroir final en faisant prudemment tourner le pied à l'aide des vis de réglage de façon à ce qu'il réfléchisse le faisceau lumineux qui traverse le centre de la lentille exactement sur le miroir tournant.
- Tourner dans les deux sens une vis de réglage du pied du miroir final de quelques fractions de rotation et vérifier si le faisceau lumineux qui revient atteint l'orifice de sortie du laser et si la figure de diffraction qui se manifeste avec l'image S'' est symétrique à l'orifice de sortie.
- Eventuellement corriger l'orientation du miroir final.

Ajustage de précision:

- Faire lentement tourner le miroir tournant avec la clé de réglage et vérifier que le faisceau réfléchi se déplace bien horizontalement par le centre de la lentille et du miroir final et que l'image S'' reste bien stable.
- Si besoin est, corriger l'orientation du miroir tournant à l'aide des vis de réglage du pied.
- Finalement, remettre le miroir tournant dans sa position initiale.
- Eventuellement réajuster la lentille et le miroir final.

Lame séparatrice et règle en verre:

- Monter la lame séparatrice (4) et le support avec pincettes à ressort (5) et placer le dispositif dans la marche des rayons entre le miroir tournant et le laser (voir fig. 1 et 2, distance entre la lame séparatrice et l'orifice de sortie du laser = distance entre la lame séparatrice et le support).
- Orienter la lame séparatrice de façon à ce qu'elle soit tournée de 45° vers le haut pour que le faisceau renvoyé par le miroir tournant soit réfléchi à la verticale, vers le haut.
- Fixer la règle en verre dans le support avec pincettes à ressort de telle sorte que le faisceau réfléchi atteigne à peu près le milieu; utiliser une feuille de papier comme aide pour l'ajustage et si besoin est, corriger l'orientation de la lame séparatrice et du support.

Si le rayon laser n'atteint plus le miroir tournant en son centre après la mise en place de la lame séparatrice:

- Corriger l'orientation du laser.

Marche d'essai et mesure de la fréquence:

- Monter le détecteur semiconducteur à la hauteur du faisceau et le brancher à l'oscilloscope par un câble HF (voir fig. 3).
- Placer le dispositif le plus près possible du miroir tournant de façon à ce que le détecteur semiconducteur soit effleuré par le faisceau lumineux alors que le miroir est en rotation mais que la marche des rayons établie ne soit pas ombragée.
- Enlever la clé de réglage du miroir tournant; mettre le transformateur variable en route et augmenter lentement la tension de sortie pour l'amener à 40–50 V.
- Représenter à l'oscilloscope le signal initial du détecteur semiconducteur (couplage = AC, Trigger-Selector = LF) et optimiser le positionnement du détecteur semiconducteur de façon à ce qu'il soit généré un signal de sortie le plus grand possible.

Remarque: La distance entre deux crêtes du signal de sortie correspond à une demi-rotation du miroir étant donné qu'il y a deux miroirs opposés de fixés sur l'axe de rotation.

- Vérifier la qualité et la position de l'image S'' sur la règle en verre (S'' est d'une luminosité plus faible lorsque le miroir tournant est en rotation).
- Eventuellement coincer une mince feuille de papier entre le support et la règle en verre pour que l'image proprement dite de la source lumineuse soit la plus contrastée possible et pour permettre la visualisation des phénomènes de diffraction les plus faibles.
- Ramener la tension de sortie à 0 V; remettre le miroir tournant dans sa position initiale à l'aide de la clé de réglage et enlever la clé de réglage du miroir tournant.

Réalisation

- Relever et noter la position x_0 de l'image S'' sur la règle en verre.
- Augmenter lentement la tension de sortie du transformateur variable (jusqu'à max. 240 V).
- Relever et noter la position x de l'image S'' .
- Définir et noter le temps T pour une rotation complète du miroir tournant; pour le contrôle, calculer la fréquence de rotation ν du moteur.
- Réduire pas à pas la tension de sortie du transformateur variable et recommencer la mesure pour plusieurs tensions (voir tab. 1)

Exemple de mesure

Tab. 1: Tension du moteur U , position x de l'image S'' , temps de rotation T et vitesse de rotation ν du miroir tournant

$\frac{U}{V}$	$\frac{x}{mm}$	$\frac{T}{ms}$	$\frac{\nu}{Hz}$
0	$10,0 \pm 0,3$		0
220	$15,5 \pm 0,3$	2,4	417
200	$15,0 \pm 0,3$	2,55	392
150	$14,0 \pm 0,3$	3,2	313
115	$13,0 \pm 0,3$	4,05	247
44	$10,5 \pm 0,3$	26	38,5

Il est présenté un exemple de mesure dans le tab. 1 et à la fig. 4. Les barres d'erreur tracées dans le diagramme correspondent à une erreur de mesure de 0,3 mm pour la position x de l'image. Etant donné que la fréquence du moteur a été mesurée avec une grande précision, il est ici possible de renoncer à une indication d'erreur.

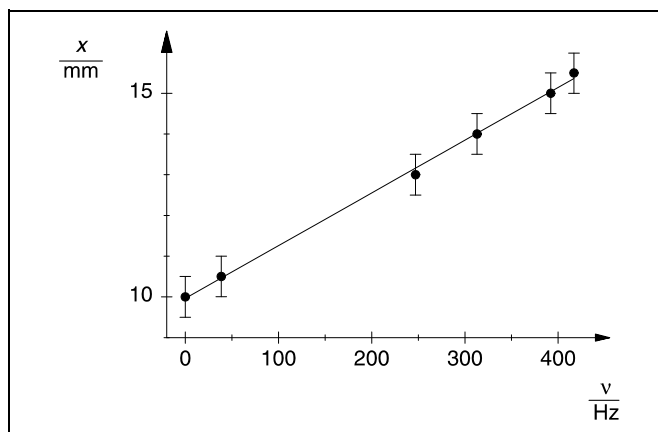


Fig. 4: Position x de l'image S'' sur la règle en verre en fonction de la fréquence ν du moteur

Exploitation

La fig. 4 montre un rapport linéaire entre la position x de l'image S'' et la fréquence ν du moteur. La pente est de

$$m = 12,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{Hz}} .$$

Elle correspond au quotient

$$\frac{\Delta x}{\nu} = \frac{x(\nu) - x(0)}{\nu}$$

dans l'équation (VI). Pour la vitesse de la lumière, on calcule à partir de la valeur obtenue la valeur

$$c = 2,84 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

Résultat

Remarque: La droite tracée dans le diagramme est le résultat d'une adaptation de droite. Pour un calcul de l'erreur pour l'adaptation de droite, il faut tenir compte du fait que la dispersion des valeurs mesurées autour de la droite est nettement moins grande que son erreur de mesure. On obtient 7 % d'erreur relative pour la pente de la droite. La vitesse de la lumière peut être indiquée avec la même erreur relative vu que les grandeurs déterminatives restantes de (VI) ont été mesurées avec plus d'exactitude.

Résultat de l'expérience:

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

Valeur littéraire:

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$