ACCUEIL

Frédéric Elie on ResearchGate

Évaluer la longueur d'onde d'un laser avec une règle graduée ! (expérience de Arthur Shawlow)

Frédéric Élie

février 2017

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : En utilisant les conditions d'interférences constructives de rayons d'un laser diffractés par le réseau de diffraction que peut être la graduation d'une règle double-décimètre, Arthur L. Shawlow, prix Nobel de physique 1981, eut l'idée d'une expérience très simple, mais méticuleuse à mettre en œuvre, pour déduire la longueur d'onde du laser. C'est cette expérience, faite avec nos moyens du bord (une source laser, une règle graduée en millimètres, une feuille de papier collée sur une paroi) qui est proposée ici, avec ses inévitables approximations liées aux conditions très sommaires de la pratique. Mais l'ordre de grandeur obtenue reste quand même stupéfiante.

-§-

Les graduations au millimètre d'une règle double-décimètre constituent un réseau de diffraction optique : en effet, chaque strie dans le matériau transparent de la règle (généralement en plastique) est un obstacle sur lequel un rayon lumineux incident, monochromatique (tel un laser) est diffracté dans une autre direction.
Si le rayon laser rencontre plusieurs stries régulièrement espacées, celles-ci forment un échantillon de réseau de diffraction par lequel le rayon laser réfléchi et les rayons diffractés donnent une interférence. Pour cela, il faut que le rayon laser, dirigé vers l'épaisseur de la règle dans son sens longitudinal, soit suffisamment rasant ; dans le cas contraire, si son inclinaison est trop importante, le rayon ne sera intercepté que par une ou deux stries, et cela ne donnera rien.
Les stries régulièrement espacées sont les marques de la graduation au millimètre. La règle doit être suffisamment longue pour éviter les effets de bord lors de la réflexion et des diffractions : c'est pourquoi un double-décimètre est adapté pour cette expérience. L'aspect délicat et méticuleux pour cette manip réside, d'une part, dans la condition que la règle et le faisceau laser doivent être le plus alignés possible, et d'autre part, que la propagation des rayons réfléchi et diffractés du rayon laser vers l'écran où ils projettent leurs spots, soit le plus horizontal possible et sans obstacles (par exemple, le rayon réfléchi ne doit pas rencontré de nouveau une face de la règle qui serait légèrement inclinée).
La mise au point initiale est donc difficile (photo de la figure 2), d'autant qu'elle est d'autant plus délicate que l'inclinaison du laser doit être rasante.

Quant à la distance entre le point d'intersection du laser avec la règle et l'écran, elle doit être suffisamment grande pour obtenir des spots projetés lisibles et rapprochés, justifiant ainsi les calculs qui vont être présentés ci-après.
On se réfère à la figure 1 pour les aspects théoriques de la manip.

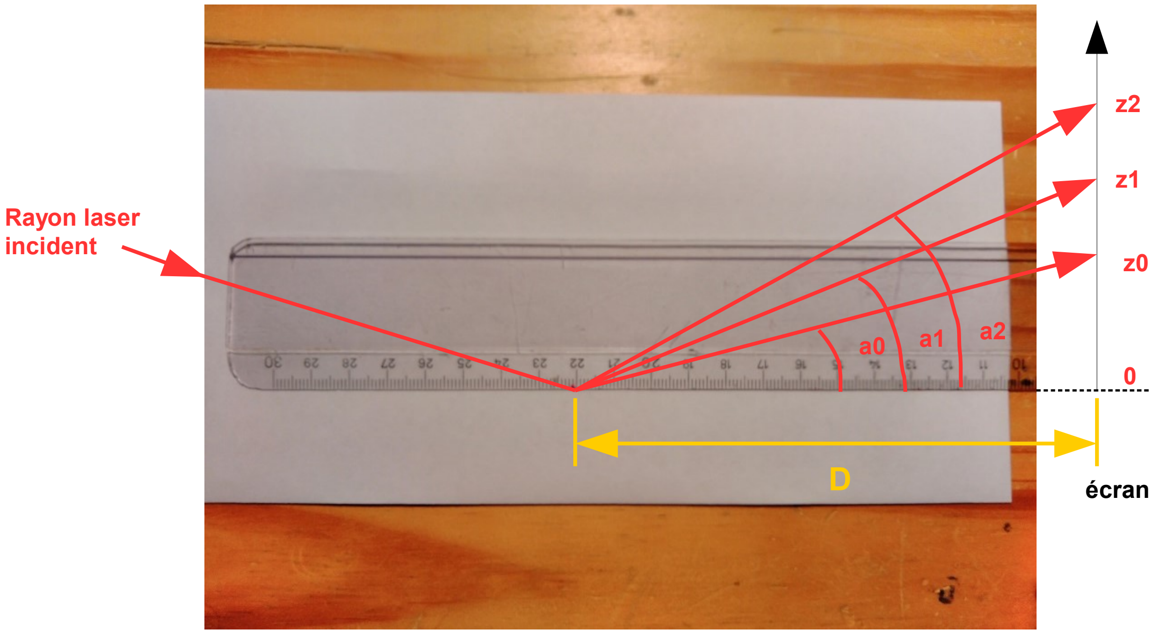

Figure 1 : diffraction d'un rayon laser par les stries régulières d'un double-décimètre (comme il est dit dans le texte, le rayon incident doit être suffisamment « rasant » pour être intercepté par quelques stries du réseau de diffraction que sont les graduations millimétriques de la règle)

La distance entre l'écran et le point d'intersection du laser avec la règle est choisie suffisamment grande (par rapport au pas du réseau de diffraction p = 1 mm), D = 2 m.
Lorsque le rayon incident rencontre plusieurs stries du réseau de diffraction, un premier rayon est réfléchi sous forme d'un spot sur l'écran à la distance z_0 par rapport à la trace que forme le prolongement de la règle sur le plan de l'écran. Mais sa rencontre avec d'autres stries entraîne la formation de rayons diffractés, également repérables sur l'écran aux distances z_1, z_2, … z_n, dont l'addition en amplitude et en phase forme des figures d'interférences constructives.
On montre, en Optique, que les conditions relatives aux franges brillantes (maximales en intensité) lors de l'interférence sont :

$$\cos a_0 - \cos a_n = n\frac{\lambda}{p} \quad (1)$$

où : λ longueur d'onde du faisceau incident, p = 1 mm pas du réseau de diffraction (correspond aux stries régulièrement espacées de 1 mm), n rang du nième rayon diffracté, a_0 angle de réflexion du faisceau.

Le problème est de relier la longueur d'onde aux distances des tâches de diffraction et réflexion obtenues sur l'écran, ainsi qu'au pas du réseau de diffraction et de la distance à l'écran.
Or on a, par de simples arguments géométriques :

$$\tan a_0 = \frac{z_0}{D} \quad \text{et} \quad \tan a_n = \frac{z_n}{D}$$

et avec par hypothèse a_0 et a_n petits (incidence rasante):

$$\cos a_0 \approx 1 - \frac{z_0^{\ 2}}{2D^2} \quad \text{et} \quad \cos a_n \approx 1 - \frac{z_n^{\ 2}}{D^2} \quad \text{avec} \quad \cos^2 a_n = \frac{1}{1+\tan^2 a_n} \quad \text{et} \quad \cos^2 a_0 = \frac{1}{1+\tan^2 a_0}$$

la relation (1) devient finalement :

$$\lambda \approx \frac{p(z_n^{\ 2} - z_0^{\ 2})}{2nD^2} \qquad (2)$$

figure 2 : une mise au point délicate : il fallait respecter deux choses : le fait que la règle soit parfaitement horizontale et perpendiculaire à l'écran, et le fait que l'incidence du rayon laser soit rasante pour intercepter un maximum de stries de graduation ; sur la photo, les lignes lumineuses sur l'écran montrent qu'il y a un problème d'horizontalité et de réflexions parasites.

Si l'on s'en tient au rayon réfléchi et à la première tache de diffraction (n = 1), la relation (2) se réduit à :

$$\boxed{\lambda \approx \frac{p(z_1^{\ 2} - z_0^{\ 2})}{2D^2}} \qquad (3)$$

de toutes façons les taches n > 2 sont très difficiles à observer !

Résultats obtenus :
Les spots correspondant au rayon réfléchi et au premier rayon diffracté sont représentés sur la photo de la figure 3.

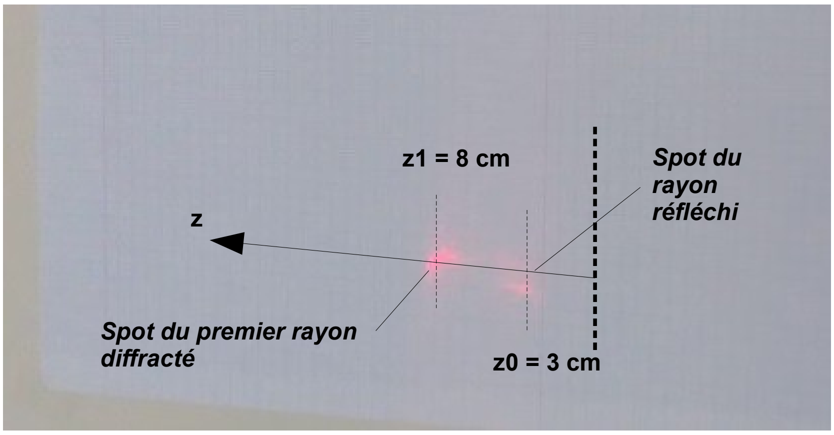

figure 3 : spots obtenus sur l'écran

on a : D = 2 m, p = 1 mm, z_0 = 3 cm, z_1 = 8 cm, n = 1 ; (3) donne alors :

$$\lambda = \frac{0{,}001 \times (0{,}08^2 - 0{,}03^2)}{2 \times 2^2} = 687\, nm$$

Résultat à comparer avec la donnée réelle sur la longueur d'onde de la source laser employée : 635 nm ! Satisfaisant, vues les conditions quelque peu sommaires de la manip !