

TP noté n° 7 – Interférences et fentes d'Young

Nom : Prénom : Durée : 2 h

► Introduction

Le médecin et physicien anglais Thomas Young (1773-1829) s'intéressa particulièrement au problème de la lumière, dont il disait qu'elle pouvait nous aider à en comprendre la nature. [...] En faisant passer un faisceau lumineux à travers deux fentes taillées dans un cache placé à proximité d'un écran, il observe sur cet écran une succession de raies sombres et brillantes ; cela est le signal de l'interférence de deux ondes dont les intensités se retranchent ou s'ajoutent selon la valeur de la différence de marche. En analogie avec les phénomènes sonores, il conclut alors de ses mesures que « la largeur des ondulations qui constituent la lumière rouge doit être dans l'air de l'ordre d'un trente-six millième de pouce* ».

D'après Bernard Pire, « Expérience de Young », Encyclopædia Universalis.

* 1 pouce = 2,54 cm.

Objectif. Déterminer la longueur d'onde λ d'un laser rouge à l'aide de fentes d'Young, puis confronter la valeur obtenue à la valeur nominale annoncée par le constructeur du laser et à celle estimée par Young en 1801.

Peut-on déterminer la longueur d'onde d'un laser rouge avec des fentes d'Young, et la valeur trouvée est-elle fiable ?

✓ Évaluation – TP noté

Ce TP est **noté par compétences** : il n'y a pas de note chiffrée, le professeur positionne le niveau de maîtrise atteint pour chaque item évalué. L'évaluation porte uniquement sur deux items :

- **Réaliser** (questions 5 à 8) : exploiter la régression, déterminer λ et son incertitude-type $u(\lambda)$, puis écrire le résultat ;
- **Valider** (questions 9 et 10) : confronter la valeur obtenue à la valeur nominale du laser, puis à la valeur historique de Young.

Les autres questions ne font pas l'objet d'une évaluation notée : elles guident le montage, la mesure et l'exploitation, et restent nécessaires à la démarche. Comme le jour des ECE, appelez l'enseignant si vous êtes bloqués pour pouvoir passer à la suite.

Compétence	Maîtrise			
	 Maîtrise insuffisante	 Fragile	 Satisfaisante	 Très bonne maîtrise
Réaliser Saisir les données dans Regressi, choisir et justifier le modèle, relever le coefficient directeur et son incertitude ; exprimer puis calculer λ ; estimer $u(D)$, calculer $u(\lambda)$ et écrire le résultat avec un nombre de chiffres cohérent.				
Valider Relever la valeur nominale du laser et appliquer le critère de compatibilité ; convertir la valeur historique de Young ; comparer les ordres de grandeur et calculer un écart relatif ; porter un regard critique argumenté.				

✓ Savoirs et savoir-faire

Savoirs	Savoir-faire / capacités
• Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives et destructives. • Interfrange i d'une figure d'interférences, relation $i = \frac{\lambda D}{a}$ (relation établie dans le chapitre 5). • Incertitude-type d'une mesure, propagation des incertitudes.	• Réaliser un montage d'interférences à deux fentes et l'aligner. • Mesurer un interfrange avec la méthode du plus grand nombre d'interfranges. • Exploiter une régression linéaire pour déterminer un coefficient directeur. • Déterminer une longueur d'onde et son incertitude-type ; comparer une valeur expérimentale à une valeur de référence.

Document 1 – Précautions de sécurité

On dispose d'une source laser. Le faisceau est très directif : toute la puissance lumineuse est concentrée dans un pinceau étroit, ce qui peut altérer la rétine de manière irréversible.

Attention :

- ne jamais regarder directement le faisceau, ni directement, ni après réflexion sur un objet ;
- ne placer aucun objet réfléchissant sur le trajet du faisceau (montre, bague, règle métallique, téléphone...);
- ne jamais placer le faisceau à hauteur d'œil ni l'orienter vers la classe ;
- éteindre le laser dès qu'il n'est pas utilisé (réglages, mesures à la règle, calculs).

Document 2 – Dispositif expérimental des fentes d'Young

Une lumière monochromatique émise par un laser de longueur d'onde λ est envoyée sur le dispositif appelé « fentes d'Young », constitué de deux fentes verticales parallèles et très fines, séparées d'un écartement a . Les deux fentes, éclairées par la même source, se comportent comme deux sources secondaires ponctuelles **en phase**.

Sur un écran parallèle au plan contenant les fentes et placé à la distance D de ces dernières, on observe une figure formée de franges brillantes et sombres, réparties dans la direction perpendiculaire aux fentes.

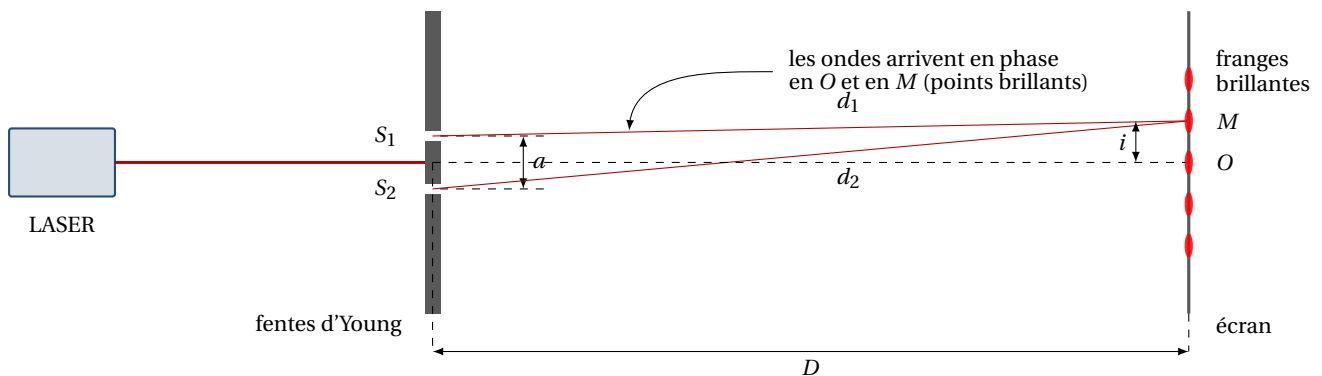


FIGURE 1 – Schéma du montage à réaliser (schéma **sans échelle** : l'écartement a est très fortement exagéré).

Document 3 – Figure d'interférences et interfrange

On appelle **interfrange** la distance entre les centres de deux franges brillantes successives, ou bien de deux franges sombres successives. On la note i . Son expression, en mètres, est :

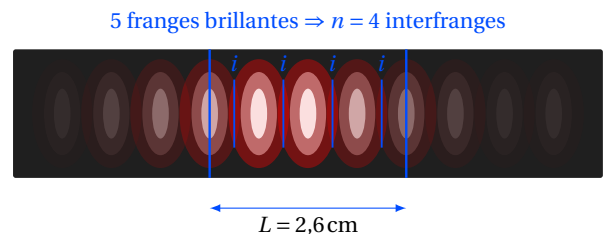
$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

avec

- λ la longueur d'onde de la radiation (en m) ;
- a l'écartement entre les fentes (en m) ;
- D la distance entre les fentes et l'écran (en m).

Méthode – mesurer un interfrange.

1. Repérer les centres d'un maximum de franges brillantes consécutives.
2. Mesurer sur l'écran la distance L entre les centres de la **première** et de la **dernière** frange repérées : ces deux repères sont **homologues**.
3. Si n_f est le nombre de franges repérées, la distance L contient $n = n_f - 1$ interfranges.



Document 4 – Matériel mis à disposition

- un laser de couleur rouge, dont la longueur d'onde nominale λ_0 est indiquée sur l'étiquette ;
- une diapositive comportant une série de trois fentes d'Young ; les écartements a_1 , a_2 et a_3 sont marqués sur la diapositive ;
- un support pour la diapositive ;

- un écran blanc;
- un mètre ruban;
- une règle en plexiglas graduée au millimètre;
- des supports élévateurs.

Partie I – Mise en place du dispositif et mesure de l'interfrange

On dispose de trois fentes d'Young d'écartements différents a_1 , a_2 et a_3 , ainsi que du matériel nécessaire pour mettre en œuvre le dispositif expérimental décrit dans le document 2. La longueur d'onde λ du laser est **inconnue** : c'est elle que l'on cherche à déterminer.

1. (a) Parmi les grandeurs λ , D et a de la relation $i = \frac{\lambda D}{a}$, quelle est celle que l'on peut **garder constante** pour pouvoir comparer les figures obtenues avec les trois fentes ? Justifier.
- (b) Quelle valeur donner à cette grandeur pour que la mesure de l'interfrange soit la **plus précise possible** ? Justifier, puis noter la valeur choisie.

✓ Correction

- (a) La longueur d'onde λ est imposée par le laser, et c'est l'écartement a que l'on fait varier puisque l'on dispose de trois fentes. La grandeur à **garder constante** est donc la distance D entre les fentes et l'écran : les trois figures ne diffèrent alors que par la valeur de a , ce qui permet de les comparer.
- (b) D'après $i = \frac{\lambda D}{a}$, l'interfrange augmente avec D . Pour un même nombre n d'interfranges repérés, la longueur $L = n i$ mesurée sur l'écran est donc plus grande et l'incertitude de lecture de la règle (de l'ordre du millimètre) devient relativement plus faible : $u(i)/i = u(L)/L$ diminue. On choisit la plus grande valeur de D compatible avec la longueur du banc et la taille de l'écran, soit :

$$D = 2,00 \text{ m}$$

✓ Mise en place du dispositif

Mettre en place le dispositif expérimental décrit dans le document 2, en respectant la valeur du paramètre choisie à la question 1. Vérifier que la figure d'interférences est bien visible et centrée sur l'écran, puis **appeler l'enseignant avant de passer à la question 2** pour valider le montage et les écartements utilisés.

2. Mesurer l'interfrange pour chacune des trois fentes, en utilisant la méthode du document 3. Décrire ci-dessous la méthode effectivement utilisée (repères choisis, nombre de franges repérées), puis compléter le tableau avec les résultats obtenus. (On veillera à convertir les longueurs en mètres.)

✓ Correction

Pour chaque fente, on repère au mieux le centre de la première et de la dernière frange brillante nettement visible, puis on mesure à la règle la distance L entre ces deux repères **homologues**. Cette distance contient $n = n_f - 1$ interfranges, d'où :

$$i = \frac{L}{n} = \frac{L}{n_f - 1}$$

Exemple de la fente 1 : $n_f = 10$ franges repérées, donc $n = 9$ interfranges, et $L = 58 \text{ mm}$, soit $i = \frac{58}{9} = 6,44 \text{ mm}$.

	Fentes 1	Fentes 2	Fentes 3
Écartement a (m)	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$
Nombre n_f de franges repérées	10	11	12
Distance mesurée L (m)	$5,8 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$
Interfrange (m)	$6,44 \times 10^{-3}$	$4,10 \times 10^{-3}$	$2,64 \times 10^{-3}$

3. La distance L a été mesurée à la règle graduée au millimètre, posée sur l'écran.

- (a) Recenser les **sources d'incertitude** sur la mesure de L , puis **estimer** $u(L)$. En déduire l'incertitude-type sur l'interfrange, $u(i) = \frac{u(L)}{n}$ (le nombre n d'interfranges est un entier exact).
- (b) En déduire pourquoi il est préférable de mesurer le plus grand nombre possible d'interfranges plutôt qu'un seul, et conclure sur la précision de la valeur de i obtenue.

✓ Correction

- (a) Sources d'incertitude sur L : résolution de la règle (0,5 mm), repérage du centre des franges brillantes (la largeur des franges n'est pas nulle), parallaxe entre la règle et l'écran, écran non exactement perpendiculaire au faisceau. Au total, on estime :

$$u(L) \approx 1 \text{ mm}$$

D'où, pour les trois fentes :

$$u(i_1) = \frac{1}{9} = 0,11 \text{ mm}; \quad u(i_2) = \frac{1}{10} = 0,10 \text{ mm}; \quad u(i_3) = \frac{1}{11} = 0,09 \text{ mm}$$

- (b) $u(L)$ ne dépend pratiquement pas de la fente, alors que $u(i) = \frac{u(L)}{n}$ diminue quand n augmente. Avec un seul interfrange ($n = 1$), on aurait $u(i) = u(L) = 1 \text{ mm}$, soit 15 % à 38 % de la valeur de i selon la fente; en repérant $n = 9, 10$ ou 11 interfranges, l'incertitude relative tombe à $u(i)/i = u(L)/L$, c'est-à-dire environ 2 à 3 %. Mesurer le plus grand nombre possible d'interfranges améliore donc très nettement la précision de i .

Partie II – Détermination de la longueur d'onde et de son incertitude

Les questions 5 à 8 constituent l'item **Réaliser** évalué et noté.

4. Dans le tableur-grapheur « Regressi », saisir les valeurs de a et de i obtenues. Créer ensuite la grandeur « inva » égale à $\frac{1}{a}$, puis afficher le graphique $i = f\left(\frac{1}{a}\right)$ et le modéliser à l'aide des modèles prédéfinis. Quel modèle avez-vous choisi? Justifier à l'aide de la relation $i = \frac{\lambda D}{a}$.

✓ Correction

La relation théorique s'écrit $i = \frac{\lambda D}{a} = \lambda D \times \frac{1}{a}$: la grandeur i est proportionnelle à $\frac{1}{a}$, sans terme constant. On choisit donc le modèle **proportionnel**, c'est-à-dire une droite passant par l'origine, dont le coefficient directeur vaut $m = \lambda D$. Les trois points sont bien alignés sur une droite passant par l'origine : le modèle choisi est validé.

5. Relever **directement dans Regressi** la valeur du coefficient directeur du modèle, que l'on notera m pour ne pas la confondre avec l'écartement a , ainsi que l'incertitude $u(m)$ affichée par le logiciel.

Regressi estime $u(m)$ à partir de la dispersion des points autour du modèle : aucune incertitude n'est à saisir sur a ni sur i .

✓ Correction

Pour le modèle proportionnel, Regressi affiche :

$$m = (1,28 \pm 0,02) \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

L'incertitude relative sur le coefficient directeur est donc $u(m)/m = 1,6 \%$.

(N'oubliez pas de cliquer sur « ajuster » après avoir choisi le modèle.)

(RÉALISER)

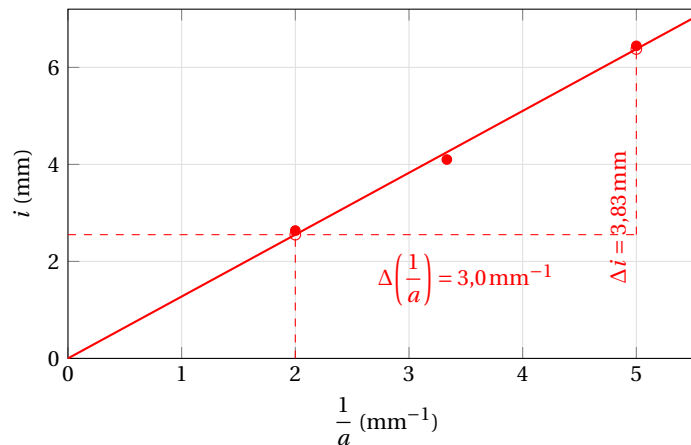


FIGURE 2 – Graphique $i = f\left(\frac{1}{a}\right)$ obtenu avec Regressi : les trois points de mesure et le modèle proportionnel ajusté.

Le coefficient directeur du modèle se lit sur ce graphique à l'aide du triangle tracé en pointillés :

$$m = \frac{\Delta i}{\Delta\left(\frac{1}{a}\right)} = \frac{3,83 \text{ mm}}{3,0 \text{ mm}^{-1}} = 1,28 \text{ mm}^2 = 1,28 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

6. Par identification avec la relation $i = \frac{\lambda D}{a}$ et le modèle linéaire choisi, exprimer m en fonction de λ et de D , puis en déduire la valeur de la longueur d'onde λ du laser. **(RÉALISER)**

✓ **Correction**

Le modèle choisi s'écrit $i = m \times \frac{1}{a}$ et la relation théorique $i = \frac{\lambda D}{a}$, d'où par identification :

$$m = \lambda D$$

soit

$$\lambda = \frac{m}{D} = \frac{1,28 \times 10^{-6}}{2,00} = 6,38 \times 10^{-7} \text{ m} = 638 \text{ nm}$$

7. L'incertitude $u(m)$ fournie par Regressi traduit la dispersion des points autour du modèle. Il reste à déterminer l'incertitude sur D : la distance fentes-écran a été mesurée au mètre ruban. Sans faire de calcul, estimer globalement l'incertitude-type $u(D)$ (penser au positionnement de la diapositive et de l'écran, pas seulement à la lecture du ruban). **(RÉALISER)**

✓ **Correction**

Sources d'incertitude sur D : lecture du mètre ruban (résolution de l'ordre du millimètre), position exacte du plan des fentes (la diapositive et son support ne repèrent pas précisément ce plan), position de l'écran, ruban non tendu ou non parallèle à l'axe du montage. Le positionnement de la diapositive et de l'écran domine largement la simple lecture du ruban, d'où :

$$u(D) \approx 5 \text{ mm} \quad \text{soit} \quad \frac{u(D)}{D} = 2,5 \times 10^{-3}$$

8. Déterminer l'incertitude-type $u(\lambda)$ à l'aide de la relation ci-dessous, l'arrondir par excès en ne conservant que **deux chiffres significatifs**, puis écrire le résultat de la mesure sous la forme $\lambda = (\lambda_{\text{exp}} \pm u(\lambda))$ en accordant le nombre de chiffres de λ_{exp} sur celui de $u(\lambda)$.

$$u(\lambda) = \lambda \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

✓ **Correction**

$$u(\lambda) = 638 \times \sqrt{\left(\frac{0,02}{1,28}\right)^2 + \left(\frac{5}{2,00 \times 10^3}\right)^2} = 638 \times \sqrt{(1,6 \times 10^{-2})^2 + (2,5 \times 10^{-3})^2} = 11 \text{ nm}$$

La valeur $u(\lambda) = 10,5 \text{ nm}$ est arrondie par excès à deux chiffres significatifs, et λ_{exp} est accordée au même rang :

$$\lambda = (638 \pm 11) \text{ nm}$$

(RÉALISER)

Partie III – Validation

Les questions 9 et 10 constituent l'item **Valider** évalué et noté.

9. Confrontation à la valeur nominale du laser.

On note λ_0 la longueur d'onde nominale inscrite sur l'étiquette du laser. On considérera que la valeur expérimentale λ_{exp} et la valeur nominale λ_0 sont **compatibles** si $|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_0| \leq 2 u(\lambda)$.

- Relever la valeur de λ_0 sur le laser, puis calculer l'écart $|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_0|$.
- Le critère de compatibilité est-il vérifié? Conclure sur la validité de la mesure.

(VALIDER)

✓ **Correction**

- L'étiquette du laser indique $\lambda_0 = 635 \text{ nm}$, d'où :

$$|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_0| = |638 - 635| = 3 \text{ nm}$$

- L'écart entre les deux valeurs se mesure à l'aide du **z-score** (écart normalisé), qui l'exprime en nombre d'incertitudes-types :

$$z = \frac{|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_0|}{u(\lambda)} = \frac{|638 - 635|}{11} = \frac{3}{11} = 0,27$$

Deux valeurs sont compatibles si $z \leq 2$: c'est exactement le critère $|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_0| \leq 2 u(\lambda)$ de l'énoncé (l'incertitude sur la valeur nominale du laser est négligée devant $u(\lambda)$). Ici $z = 0,27 \ll 2$: l'écart observé ne représente que 0,27 incertitude-type, il n'est donc pas significatif. Le critère de compatibilité est vérifié et la mesure est validée.

10. Confrontation à la valeur historique de Young.

- (a) Young estime que la « largeur des ondulations » de la lumière rouge vaut un trente-six millième de pouce. Convertir cette valeur en nanomètres (1 pouce = 2,54 cm).
- (b) La valeur que vous avez déterminée est-elle du **même ordre de grandeur**? Calculer l'écart relatif $\frac{|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_{\text{Young}}|}{\lambda_{\text{Young}}}$, exprimé en pourcentage.
- (c) Argumenter en apportant un regard critique : que peut-on conclure sur la mesure historique de Young, puis sur la vôtre?

(VALIDER)

✓ Correction

(a) $\lambda_{\text{Young}} = \frac{2,54 \times 10^{-2}}{36000} = 7,06 \times 10^{-7} \text{ m} = 706 \text{ nm}.$

- (b) 638 nm et 706 nm sont tous deux de l'ordre de 10^{-7} m : les deux valeurs sont du **même ordre de grandeur**. Écart relatif :

$$\frac{|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_{\text{Young}}|}{\lambda_{\text{Young}}} = \frac{|638 - 706|}{706} = 0,096 = 9,6 \%$$

- (c) En 1801, Young ne disposait ni de laser monochromatique ni de détecteur : sa valeur, estimée à partir de mesures faites à l'œil, ne s'écarte que de 9,6 % de celle d'un laser rouge moderne. C'est une estimation remarquable pour l'époque, et elle confirme la pertinence de son interprétation ondulatoire de la lumière. Notre mesure donne $\lambda = (638 \pm 11) \text{ nm}$, soit une incertitude relative de 1,7 % : elle est beaucoup plus précise et compatible avec la longueur d'onde nominale du laser, mais elle n'en est pas exactement égale, en raison des incertitudes de mesure (positionnement de l'écran, repérage des franges, dispersion des points autour du modèle).

Pour aller plus loin

11. On donne la différence de chemin optique entre les deux ondes au point d'abscisse x de l'écran : $\delta = \frac{ax}{D}$ (x est compté à partir de O).
- (a) Justifier que le point O est le centre d'une frange brillante.
- (b) Établir l'expression des abscisses x_k des franges sombres en fonction de k , λ , D et a , puis retrouver l'expression de l'interfrange i .

✓ Correction

- (a) En O , $x = 0$, donc $\delta = \frac{a \times 0}{D} = 0$: la différence de chemin optique est nulle, les deux ondes arrivent **en phase**. Les interférences sont constructives ($\delta = 0 = k\lambda$ avec $k = 0$) : O est bien le centre d'une frange brillante, la frange centrale.

- (b) Une frange sombre correspond à des interférences destructives, soit $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$:

$$\frac{ax_k}{D} = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \Rightarrow \quad x_k = \left(k + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{a}$$

L'interfrange est la distance entre deux franges sombres consécutives :

$$i = x_{k+1} - x_k = \left[\left(k + 1 + \frac{1}{2}\right) - \left(k + \frac{1}{2}\right)\right]\frac{\lambda D}{a} = \frac{\lambda D}{a}$$

12. Les deux fentes sont éclairées par **une seule** source. Expliquer pourquoi cette condition est indispensable pour observer des interférences stables, et ce que l'on observerait avec deux lampes indépendantes placées derrière chaque fente.

✓ **Correction**

Les deux fentes sont éclairées par la même onde : elles se comportent comme deux sources secondaires qui émettent avec un déphasage constant au cours du temps, c'est-à-dire **cohérentes**. La figure d'interférences est alors stable et peut être observée.

Avec deux lampes indépendantes, les ondes émises n'ont aucun lien de phase : leur déphasage varie de façon aléatoire et très rapidement. La figure d'interférences se décale sans cesse et, en moyenne, les franges disparaissent : l'écran est uniformément éclairé.