Chapitre 2

Phénomènes ondulatoires caractéristiques

I Lorsqu'émetteur et récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre…

1) Mise en évidence

Quelle(s) grandeur(s) d'une onde périodique et éventuellement sinusoïdale, est conservée entre l'émission et la réception lorsqu'émetteur et récepteur sont immobiles par rapport au milieu de propagation ?………………………………………..

Les fichiers sont sur le bureau dans un dossier « effet doppler ». Visualiser et écouter la vidéo «sirène_pompiers (effet Doppler) » (Source : http://www.youtube.com/watch?v=imoxDcn2Sgo&feature=player_detailpage). Puis écouter « son Doppler voiture Kangoo » et enfin « son F1 »

Qui est l'émetteur, le récepteur, le milieu de propagation ?

………..

On prendra comme référentiel « de référence » toujours celui pour lequel le milieu de propagation de l'onde est au repos quand celle-ci n'est pas émise.

Qui est en mouvement et qui est immobile dans ce référentiel sur les exemples précédents ?

………..

Que dire de la fréquence reçue par le récepteur ?

………..

Pourrait-on envisager un cas où à la fois émetteur et récepteur sont en mouvement par rapport au milieu de propagation ?

………..

C'est en 1842 que l'autrichien Christian Doppler (1803-1853) publia un article décrivant l'évolution de la fréquence d'une onde émise par une source en mouvement par rapport à un observateur. Les applications sont multiples dans des domaines aussi différents que la médecine, l'astrophysique, les radars, les sonars, etc.

2) Effet Doppler-Fizeau et décalage Doppler

a) Regarder l'image « cuve onde (source immobile) » : quelle est la forme des surfaces claires et sombres (appelées surfaces d'onde) ?

Pourrait-on mesurer la longueur d'onde sachant que la règle en bas a une longueur de 20 cm ?

………..

Visualiser la vidéo « vidéo cuve onde (déplacement) ». Le générateur d'onde se déplace de gauche à droite.

Répondre qualitativement aux questions suivantes :

Que peut-on dire de la longueur d'onde lorsque la source est en mouvement : est-elle la même que lorsque la source est immobile ? Préciser ce qui se passe en avant de la source en mouvement et en arrière de la source en mouvement.

………..
………..
………..

b) Aller sur internet sur le site de Geneviève Tulloue à la page suivante :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/son/doppler_explication.php

Ecouter et suivre le diaporama et ses animations (ne pas prendre les cas où récepteur et émetteur sont en mouvement quelconque) pour répondre aux questions suivantes :

- Le référentiel lié au milieu de propagation de l'onde au repos (quand celle-ci n'est pas émise) est la référence. Comment est notée la vitesse du son dans ce diaporama, dans ce référentiel ? …………………………………………………….
- Que représentent les cercles rouges qui se propagent à partir de l'émetteur ?

……..
- A quoi correspond/qu'est ce que symbolise la durée entre deux bips du côté du récepteur ?

……..
- Que se passe-t-il lorsque émetteur et récepteur sont immobiles (par rapport au référentiel de référence) ?

……..

- Que se passe-t-il concernant la période reçue vis-à-vis de la période émise lorsque l'émetteur se rapproche du récepteur (selon une droite passant par le récepteur) Et concernant la fréquence reçue vis-à-vis de la fréquence émise ?
……..
Recopier la formule donnant cette période en fonction de la période émise et l'encadrer.
……..
Démontrer celle donnant la fréquence reçue à partir de celle donnant la période reçue et l'encadrer (elle sera fournie en exercice)
……..
……..
……..
Montrer que cette formule donnant la fréquence est compatible avec l'observation comme quoi le son perçu est plus aigu/grave que le son émis (rayer la mention inutile) :
……..
……..
……..
……..

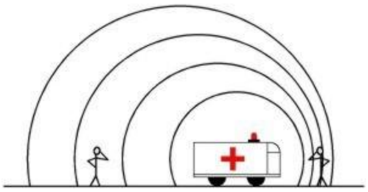
- Que se passe-t-il concernant la période reçue vis-à-vis de la période émise lorsque l'émetteur s'éloigne du récepteur (selon une droite passant par le récepteur) ? Et concernant la fréquence reçue vis-à-vis de la fréquence émise ?
……..
Recopier la formule donnant cette période en fonction de la période émise et l'encadrer.
……..
Démontrer celle donnant la fréquence reçue à partir de celle donnant la période reçue et l'encadrer (elle sera fournie en exercice)
……..
……..
……..
Montrer que cette formule donnant la fréquence est compatible avec l'observation comme quoi le son perçu est plus aigu/grave que le son émis (rayer la mention inutile) quand l'émetteur s'éloigne du récepteur fixe :
……..
……..
……..
……..

-Dans le cas où l'émetteur est fixe et où le récepteur est en mouvement, recopier les formules donnant pour chaque cas les fréquences perçues en fonction des fréquences émises (les formules seront toujours fournies en exercice) et montrer leur compatibilité vis-à-vis d'un son perçu plus grave ou plus aigu suivant le cas.
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..

Conclusion :

Lorsque l'émetteur et le récepteur se rapprochent l'un par rapport à l'autre, la fréquence perçue par le récepteur est plus …………. , le son perçu est plus …………… que le son ……………

Lorsque l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un par rapport à l'autre, la fréquence perçue par le récepteur est plus …………. , le son perçu est plus ……………que le son ……………



La valeur $\Delta f = \left| f_{\text{reçue}} - f_{\text{émise}} \right|$ est appelée ***décalage Doppler***. c désignant la célérité de l'onde dans son milieu de propagation et v désignant la vitesse relative de l'émetteur vis-à-vis du récepteur, si v est négligeable devant c, on a l'expression simple approchée suivante $\Delta f = f_{\text{émise}} \cdot \frac{v}{c}$ (formule fournie ou à retrouver à partir de celle de $f_{\text{reçue}}$ par exemple)

Savoir retrouver la compatibilité entre les formules fournies (formules non algébriques) et les différences de hauteur des sons reçus.

3) Applications

a) Mesure d'une vitesse par effet Doppler : la voiture est-elle en infraction ?

On utilise un extrait de son d'une voiture Kangoo et le logiciel **Audacity**

Ecouter l'ensemble du fichier et vérifier à l'oreille que la voiture s'approche puis s'éloigne de l'observateur, et ceci à vitesse suffisante pour qu'on puisse l'entendre facilement.

Préliminaire à l'étude :

On suppose que la vitesse de la voiture est constante dans le référentiel terrestre, notée v. On note f_{avant} la fréquence perçue avant que la voiture ne double le récepteur et $f_{après}$ la fréquence perçue après. On note c la vitesse des ondes sonores dans l'air (on prendra c = 340 m.s^{-1}). Montrer que la fréquence émise par la voiture vérifie :

$f_{avant} + f_{après} = f_{émis}\left(\frac{2c^2}{c^2-v^2}\right)$ en se servant des formules précédentes.

……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..

Que devient la parenthèse de l'expression précédente lorsque la vitesse v est négligeable par rapport à c ? En déduire une expression simple de $f_{émis}$ en fonction de f_{avant} et $f_{après}$.

……..
……..
……..
……..

Protocole

Proposer un protocole permettant de répondre au problème posé du a)

……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..
……..

Mise en place du protocole

Mettre en place le protocole et conclure en discutant

……..
……..
……..
……..
……..
……..

Remarque : ce n'est pas exactement cette méthode qui est employée dans les radars de police mais le principe est le même : le radar envoie une onde qui vient se réfléchir sur le véhicule en mouvement. L'onde réfléchie n'a alors plus la même fréquence que celle émise et elle est analysée par le radar qui en déduit la vitesse du véhicule… Et qui envoie ses conclusions à la police.

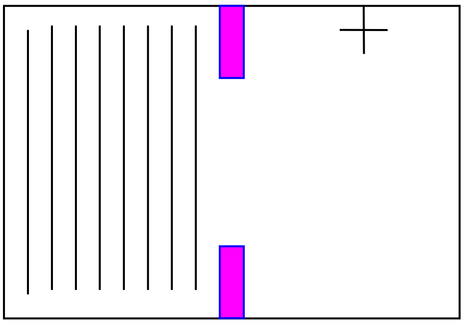
b) Autres applications rencontrées cette année ou dans les années précédentes

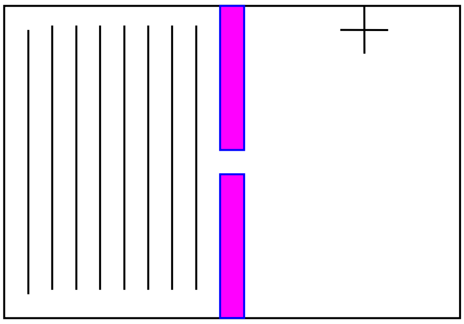
……
……
……
……
……
……
……
……

II Le phénomène de diffraction des ondes

1) Mise en évidence

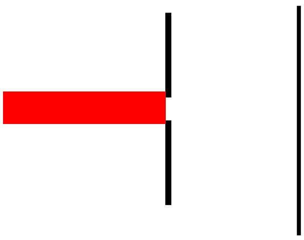
a) Avec des ondes mécaniques (cuve à onde + stroboscope)

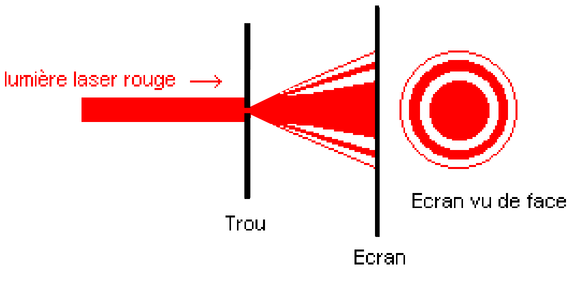




…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………

b) Avec des ondes électromagnétiques





Diffraction par une ouverture circulaire étroite

…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………
…………………………………………………………………… ……………………………………………………………………

2) Définition

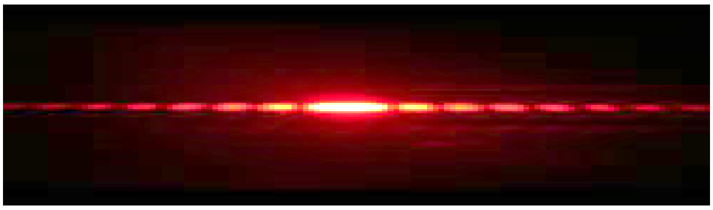
……
……
……
……

3) Cas de la diffraction de la lumière par une fente

a) Aspect qualitatif

Un laser éclaire un écran placé à quelques mètres. On interpose sur le parcours du faisceau un cache muni d'une fente verticale calibrée de largeur a. Prendre la diapositive avec les fentes et choisir la fente A de largeur 120 µm.

On a représenté sur la figure ci-dessous la figure observée sur l'écran.



Décrire parfaitement la figure observée (par cœur)

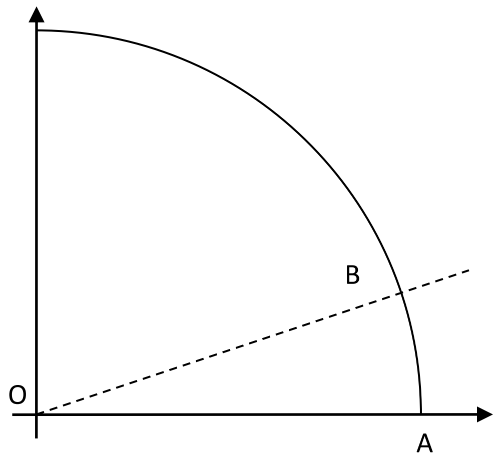
………..
………..
………..
………..

Qu'est-ce que met en évidence à nouveau cette expérience ?

b Diffraction par un obstacle

Interposer maintenant sur le trajet du faisceau laser un fil cylindrique vertical de même diamètre a. Il s'agit du fil le plus épais. Comparer la figure de diffraction observée et celle obtenue avec la fente verticale.

c) Aspect quantitatif



* résultat préliminaire mathématique : étude géométrique

Choisir sur la figure ci-contre un secteur angulaire de sommet O et d'angle au sommet θ (choisir θ assez faible) coupant l'arc de cercle aux points A et B.
On note B' le projeté orthogonal de B sur l'axe des abscisses.
Quelle est la définition de θ en radian, le rayon du cercle étant noté OA ?

Quelles est la définition de sin(θ) ?

Regardez votre figure et évaluer une approximation que l'on peut faire lorsque θ est faible.

En déduire que, quand θ est faible, $\theta \approx \sin(\theta)$ puis que $\theta \approx \tan(\theta)$.

* résultat préliminaire mathématique : étude numérique

Programmer la calculatrice en mode radian.
Compléter le tableau ci-contre.

θ (radians)	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	$\pi / 6$	0,60	0,70	0,80
tan(θ)										
Erreur relative en approximant tan(θ) par θ (en %)										

Conclusion : en dessous de quelle valeur de θ l'approximation est-elle valable (erreur < 10 % par exemple). Donner cette valeur en °.

III Quand deux ondes se rencontrent : le phénomène d'interférences

1) Deux sources qui émettent des ondes de même fréquence (et de même amplitude)

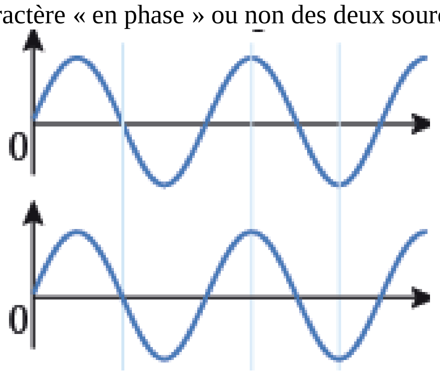
On considère deux sources distinctes émettant une onde sinusoïdale de même fréquence f.

Les signaux aux deux points sources en fonction du temps présentent en général, à un instant donné, un décalage. On dit qu'il y a un **déphasage** entre les sources. Lorsque ce déphasage est constant, on dit que les sources sont **cohérentes**. On ne considérera que des sources cohérentes dans la suite du cours.

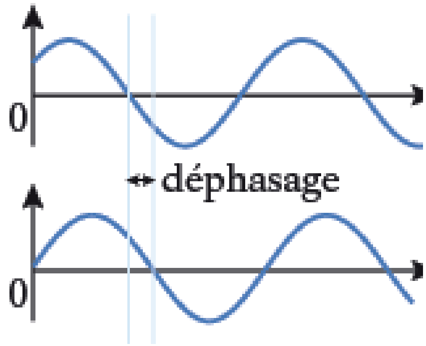
Lorsque le déphasage est nul, les deux signaux peuvent se superposer : on dit que les sources cohérentes sont **en phase**. Ce sera le cas dans la suite du cours.

Parmi les deux situations suivantes représentant, pour chacune, les signaux émis aux deux sources (source A en haut et source B en bas), indiquer

- la nature de la grandeur portée sur l'axe des abscisses (compléter ces axes)
- le caractère cohérent ou non des deux sources
- le caractère « en phase » ou non des deux sources



Situation 1



situation 2

2) Que ressent-on en un point de l'espace lorsqu'y parviennent les deux signaux sinusoïdaux de même fréquence de deux sources cohérentes en phase ?

Lorsque deus ondes sinusoïdales de même fréquence se superposent en un point M de l'espace, le signal résultant, à tout instant, est la somme des signaux des deux ondes en ce point. On dit que les deux ondes **interfèrent** en ce point M.

Remarque : on fera l'approximation, dans ce qui suit, que les amplitudes des signaux restent identiques au cours de la propagation des deux ondes provenant des deux sources (pas vrai en toute rigueur).

Se rendre sur l'animation :
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/cuve_ondes/interference_ondes_circulaires.php

On gardera un déphasage de 0° entre les deux sources (en phase et cohérentes, émettant des signaux sinusoïdaux de même fréquence notée f donc de même période T et de même longueur d'onde λ, et de même amplitude notée A).
Comment sont nommées les deux sources ?

Sur le schéma en haut à gauche, qui défile, une erreur n'est pas à commettre : le 0 représente le 0 de l'axe des ordonnées, et le 0 de l'axe des abscisses, en réalité, n'est déjà plus visible quand l'animation apparait puisqu'il se décale vers la gauche, en dehors de l'écran, pour laisser voir défiler les signaux provenant des deux sources au point M de l'espace en regardant à droite du graphique pour le temps réel.
Comment est matérialisé le point M sur le schéma ?

De quelle couleur est le signal, au point M, provenant de S_1 ?

De quelle couleur est le signal, au point M, provenant de S_2 ?

Quelle est la signification du signal bleu ?

Imposer une longueur d'onde de 6,9 mm et baisser graduellement l'écartement des sources jusqu'à ce qu'il soit nul. Les deux sources sont alors confondues.
Que se passe-t-il pour le signal bleu, en n'importe quel point, dans ce cas ?

Quelle est son amplitude ? Pourquoi ?

Reprendre un écartement de 20 mm entre les deux sources. Garder un déphasage de 0.

Pour certains points P de l'espace, les deux signaux provenant des deux sources varient de façon identique au cours du temps (ils s'annulent aux même dates et croissent et décroissent selon les mêmes intervalles ; ils sont même ici superposables). Trouver plusieurs de ces points P. Que vaut alors l'amplitude du signal résultant A_{tot} en fonction de A ?

Peut-on trouver des points où A_{tot} ait une valeur supérieure ?

Sur le grand schéma, quelle(s) couleur(s) passent alternativement sur ces points ? Qu'est ce que cela signifie ?

On dit que les deux ondes provenant des deux sources arrivent en phase au point P et qu'elles y interfèrent de façon constructive ou qu'il y a interférence constructive au point P. Justifier ces termes.

En appelant τ_1 le retard de l'onde issue de S_1, entre le point source S_1 et le point P, et τ_2 le retard de l'onde issue de S_2, entre le point source S_2 et le point P, que peut on dire de $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ afin que les ondes interfèrent de façon constructives en P ?

En appelant d_1 la distance entre le point source S_1 et le point P, et d_2 la distance entre le point source S_2 et le point P, que peut on dire de δ, **appelée différence de marche au point P** et égale à $\delta = d_2 - d_1 = MS_2 - MS_1$ afin que les ondes interfèrent de façon constructives en P ?

Pour certains points N de l'espace, les deux signaux provenant des deux sources varient de façon opposée au cours du temps (ils s'annulent aux mêmes dates et quand l'un croît, l'autre décroît, quand l'un est à son maximum, l'autre est à son minimum). Trouver plusieurs de ces points N. Que vaut alors l'amplitude du signal résultant A_{tot} ?

Sur le grand schéma, quelle(s) couleur(s) correspond(ent) à ces points ? Qu'est ce que cela signifie ?

On dit que les deux ondes provenant des deux sources arrivent en ……………… de phase au point N et qu'elles y interfèrent de façon destructive ou qu'il y a interférence …………………… au point N. Justifier ces termes.

En appelant τ_1 le retard de l'onde issue de S_1, entre le point source S_1 et le point N, et τ_2 le retard de l'onde issue de S_2, entre le point source S_2 et le point N, que peut on dire de $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ afin que les ondes interfèrent de façon destructives en N ?

En appelant d_1 la distance entre le point source S_1 et le point N, et d_2 la distance entre le point source S_2 et le point N, que peut on dire de $\delta = d_2 - d_1 = MS_2 - MS_1$ afin que les ondes interfèrent de façon destructive en N ?

Résumons :
Deux sources S_1 et S_2 émettant des signaux sinusoïdaux de même ………………f (et donc de même ………….. T et de même ………… ………. λ), de même …………………A et en ………………… interfèrent en tout point M de l'espace.
En appelant τ_1 …………………………………………………………………….…,
τ_2 ……………………………………………………………………..
et en introduisant δ = ………………………. appelée …………………………………………… au point M,
on a les résultats suivants :

Interférences au point M	constructives	destructives
Amplitude A_{tot} au point M		
Les deux ondes, au point M sont en		
$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$		
δ		

3) Découverte et étude expérimentale

a) Vision à une dimension : le canal à vague

Que peut-on dire de l'amplitude de l'onde mécanique dans la deuxième partie du canal à vague, lorsque les deux sources sont en phase ? Est-ce ce qui était attendu ? Comment l'expliquer ?

Que se passe-t-il lorsque les deux sources sont en opposition de phase dans le canal à vague ?

b) Vision à deux dimensions : la cuve à ondes

Les résultats sont identiques à ceux vus en animation.

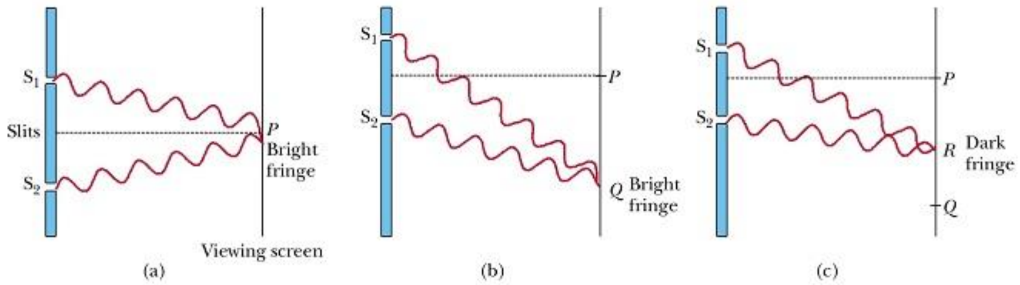
c) Le cas des deux fentes d'Young

On éclaire une double fente (appelée fentes d'Young) à l'aide d'un laser. On placera l'écran à une distance supérieure à 120 cm des fentes.

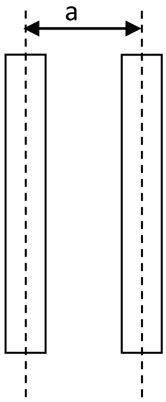
- Faire un schéma du dispositif.

- Faire un schéma de la figure observée.

- Quels sont les phénomènes qui se produisent ? Comment les expliquer ? On pourra se servir des schémas suivants :

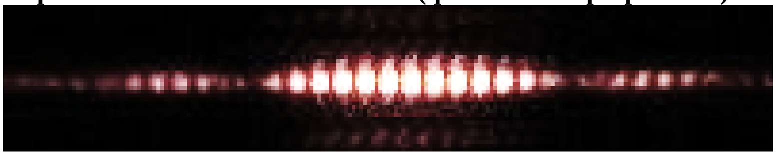


La longueur d'onde du laser donnée par le fabricant est **650 nm. Mais elle est très approximative.** Pour le vérifier, on réalisera plusieurs expériences avec des doubles fentes dont les distances a entre les centres sont connues.



On s'intéresse aux fines ***franges d'interférence***. On appelle i ***l'interfrange***, qui est la distance séparant le milieu de deux franges sombres (ou brillantes) consécutives.

ATTENTION : Ne pas confondre avec la diffraction (qui vient se superposer ici) !



On propose différentes expressions pour cet interfrange :

(a) $i = \frac{\lambda * D}{a}$ (b) $i = \frac{D}{\lambda * a}$ (c) $i = \frac{\lambda * a}{D}$ (d) $i = \frac{a}{\lambda * D}$ (e) $i = \frac{D * a}{\lambda}$

- Quelles sont les expressions à éliminer par analyse dimensionnelle ?
- A l'aide de manipulations simples, trouver la seule expression qui soit correcte. L'encadrer (elle est à connaître par cœur).

……
……
……
……
……

On souhaite retrouver la valeur de la longueur d'onde du laser en utilisant le phénomène d'interférences.
Choisir D = 150 cm
Pour mesurer l'interfrange i, repérer au crayon les centres de plusieurs franges colorées consécutives **situées dans la tache centrale de diffraction.** Mesurer ensuite à la règle graduée la distance d correspondant à n franges, ou n intervalles (**d = ni**). Chaque repérage devra être fait 3 fois afin de minimiser les erreurs humaines de tracé : éliminer les valeurs aberrantes et prendre une valeur moyenne de d. En déduire l'interfrange i. **Faire aussi cette mesure pour le couple de fentes dont la distance a est inconnue (dernière ligne).** Compléter ainsi le tableau ci-dessous :

Fentes	**d = n*i (en mm)**	**n**	**i (mm)**	**a (mm)**
rapprochées				0,30
moyennes				0,40
« éloignées »				0,60
Espacées de ??				?

Proposer un protocole permettant de retrouver la longueur d'onde utilisée avec l'ensemble des 3 1ères lignes de ce tableau.
……
……
……
……
……
……
……
……
……
Mettre en place le protocole et donner la valeur de cette longueur d'onde ainsi que son incertitude avec un intervalle de confiance de 95%.
……
……
Conclure
……
……

Détermination de l'espacement inconnu entre deux fentes (4ème ligne du tableau)
Rappeler l'expression de cet espacement a_{inc} en fonction des trois autres paramètres et en déduire sa valeur.
……
……
……
……

En plus de l'incertitude sur la longueur d'onde, il faut aussi estimer les incertitudes ΔD et Δd en considérant la manière dont on les a mesurées. En utilisant les documents suivants, trouver l'incertitude sur a_{inc} avec un intervalle de confiance de 95 %. Etre méthodique.

Document A : incertitude sur une mesure obtenue avec un appareil gradué.

On détermine dans un premier temps la résolution δ de l'appareil (plus petite graduation).
Le meilleur estimateur de l'incertitude type est alors :

$$u(X) = \frac{\delta}{\sqrt{12}} = \frac{\delta}{2\sqrt{3}}$$

L'incertitude élargie vaut alors :

$$U_{95\,\%}(X) = 2 \times u(X) = \frac{\delta}{\sqrt{3}}$$

Le résultat se met sous la forme

$$X = \mathrm{x} \pm U_{95\,\%}(X) = \mathrm{x} \pm \frac{\delta}{\sqrt{3}}$$

Document B : formules de propagation des incertitudes et régressi

Y étant une grandeur calculée à partir d'autre grandeurs X_i, Le meilleur estimateur de l'incertitude type u(Y) est fourni par les équations suivantes :

Relation entre Y et les X_i	Formule de propagation
$Y = \alpha X$ où α est une constante	$u(Y) = \alpha u(X)$
$Y = \alpha X_1 \pm \beta X_2$	$u(Y) = \sqrt{\alpha^2 u^2(X_1) + \beta^2 u^2(X_2)}$ On obtiendra une formule similaire avec n termes
Si $Y = X_1 X_2$ ou $Y = \frac{X_1}{X_2}$	$\frac{u(Y)}{Y} = \sqrt{\left(\frac{u(X_1)}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{u(X_2)}{X_2}\right)^2}$ Incertitude relative = racine de la somme des carrés des incertitudes relatives On obtient une formule similaire avec n termes

L'incertitude élargie vaut alors :

$$U_{95\,\%}(Y) = 2 \times u(Y)$$

Les formules dans le tableau sont donc aussi directement exploitables avec l'incertitude élargie.
Le résultat se met sous la forme

$$Y = Y_{calc} \pm U_{95\,\%}(Y)$$

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Influence de la longueur d'onde sur l'interfrange i

RV sur http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/lumiere/interference_lumiere.html

Quelle variable semble la plus intéressante à étudier par ordinateur ? (Justifier en une phrase)

Choisir 8 valeurs de cette variable. Préparer un tableau de valeurs et *faire valider par le professeur*.

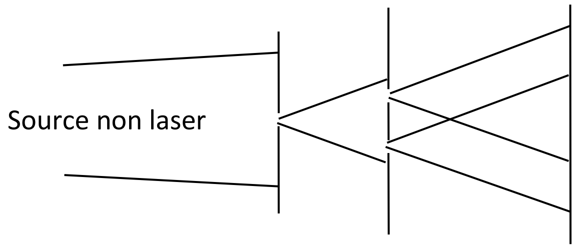
Pour les grandeurs qui ne varient pas, prendre des valeurs utilisées pendant le TP.

Noter les valeurs des interfranges correspondantes dans ce tableau. Ouvrir un nouveau fichier Regressi et tracer une courbe pertinente pour vérifier le modèle.

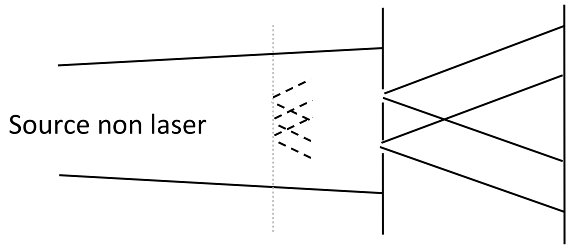
IV Merveilleux laser

Rappel : obtention d'une figure d'interférences avec des fentes d'Young

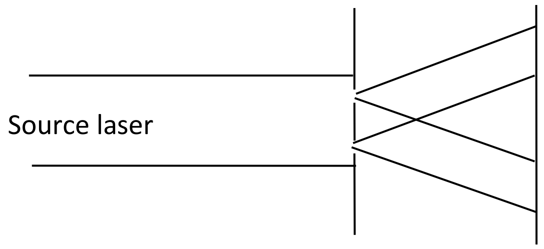
- Avec une source de lumière monochromatique quelconque, nécessité d'utiliser une première fente pour avoir un point source S à l'origine de deux sources secondaires S_1 et S_2 ………………………..

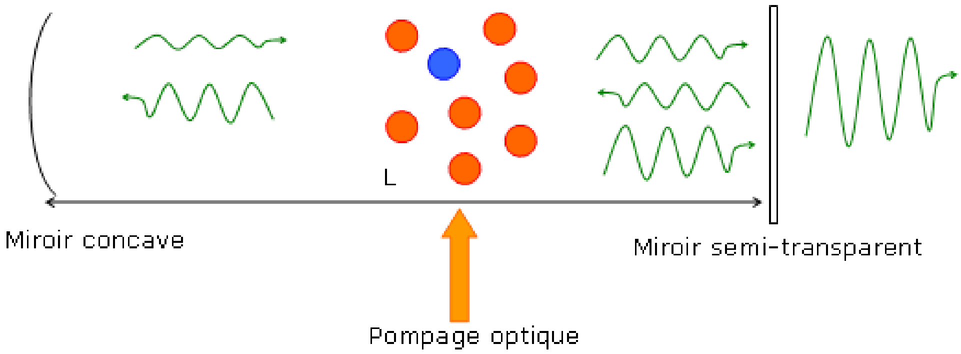


- Impossibilité d'avoir une source étendue (voir exercice corrigé n°22 p 105)



- Possibilité avec un faisceau laser





Cavité résonante du laser