

TP d'OPTIQUE

OPTIQUE
TP 1
2017_2018

Références :

- *Expériences d'optique - Agrégation de sciences physiques*, R. Duffait (Bréal 2000)
- *Montages de physique au CAPES, Optique-Méca...*, J.-P. Bellier, C. Bouloy et D. Guéant (Dunod 2007)
- *Optique expérimentale*, Sextant, Hermann, Collection Enseignement des Sciences
- *Livres de Physique Chimie du secondaire*

Sujets de MSP d'Optique

Niveau d'enseignement	Thème	Travail à effectuer
Quatrième	Physique-chimie au collège	Élaborer une séquence pédagogique sur la lumière en s'appuyant sur l'évolution des acquis de la cinquième à la quatrième.
Seconde	L'UNIVERS	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Les étoiles.
Première S	Observer – Couleurs et images	Élaborer une séquence pédagogique sur les parties du programme : Couleur, vision et image : Couleur des objets. Synthèse additive, synthèse soustractive. Absorption, diffusion, transmission. Vision des couleurs et trichromie. Daltonisme. Principe de la
Première S	Observer – Couleurs et images	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Couleur, vision et image : L'oeil, lentille mince convergente, fonctionnement comparés de l'oeil et d'un appareil photographique.
Première STL SPCL	Images photographiques - Images et information	Élaborer une séquence pédagogique associant les parties du programme : Photographie numérique, capteurs et Image numérique, traitement d'image.
Première STL SPCL	Images photographiques	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Appareil photographique numérique.
Première STL SPCL	Images photographiques	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Photographie numérique, capteurs.
Première STL SPCL	Images et information	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Image numérique, traitement d'image.
Terminale S	Observer – Caractéristiques et propriétés des ondes	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Propriétés des ondes : interférences.
Terminale S	Observer – Caractéristiques et propriétés des ondes Agir – Transmettre et stocker de l'information	Élaborer une séquence pédagogique associant les parties du programme : Propriétés des ondes : diffraction et Image numérique, stockage optique.
Terminale S	Observer – Caractéristiques et propriétés des ondes Agir – Transmettre et stocker de l'information	Élaborer une séquence pédagogique associant les parties du programme : Propriétés des ondes : interférences et Image numérique, stockage optique.
Terminale STL SPCL	Des ondes pour mesurer	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Structure d'une onde électromagnétique. Ondes polarisées ou non polarisées. Polariseur, analyseur.
Terminale STL SPCL	Des ondes pour observer et mesurer	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Observer : voir plus loin.

Le contenu du TP n°1 d'optique permet de revoir les notions suivants abordées dans le secondaire

<p>TSTL Spécialité Des ondes pour observer et mesurer ((propagation, réflexion, réfraction, diffusion, polarisation, diffraction, interférences, etc.). Des ondes pour agir .. l'information transportée par les ondes... 2^{nde} Réfraction. Lois de Snell-Descartes <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour établir un modèle à partir d'une série de mesures et pour déterminer l'indice de réfraction d'un milieu.</i></p>	<p>1 STL SPCL Spectroscopie : prisme et réseaux. Réaliser expérimentalement et décrire les spectres de différentes sources lumineuses dont une source laser. - Distinguer spectres d'émission et spectres d'absorption, spectres continus et spectres de raies. Spectres visibles. - Identifier, en utilisant une banque de données, un élément chimique à partir de son spectre d'émission ou d'absorption. - Exploiter la courbe d'intensité spectrale d'un spectre lumineux</p>
<p>1ST2S , 1S , 1ESL (+4^{ème}) Lentilles minces convergentes et divergentes : Réflexion totale ; fibroscopie</p>	<p>1 STL SPCL Lentilles minces convergentes. Association de lentilles minces</p>

I. Rappels théoriques - Lois de l'Optique Géométrique

- I.1. Cadre de l'optique géométrique
- I.2. Propagation rectiligne dans le vide
- I.3. Propagation à la traversée d'un dioptre
- I.4. Le prisme
- I.5. Lentilles minces : éléments principaux et relation de conjugaison
- I.6. Le viseur ou « œil réduit »

II. Manipulations

- II.1. Dioptrés - Approche qualitative
- II.2. Dioptrés – Lois de Snell Descartes
- II.3. Applications
- II.4. Mise en évidence des éléments principaux d'une lentille
- II.5. Lentilles minces
 - a) Réalisation d'un viseur
 - b) Vérification de la relation de conjugaison

I. Rappels Théoriques - Lois de l'Optique Géométrique

I.1. Cadre de l'optique géométrique

Bien qu'en physique la lumière soit représentée par *un champ électromagnétique* $[E(M,t), B(M,t)]$, pour des raisons historiques la dépendance du champ en fonction des variables d'espace M et de temps t est ignorée dans le cadre de l'optique géométrique : la longueur d'onde de la lumière est supposée très inférieure aux dimensions caractéristiques du système. Par contre, les manifestations de cette double dépendance sont abordés par l'optique ondulatoire : diffraction et interférences (voir TP 3).

Les lois de l'optique géométrique (propagation rectiligne, principe du retour inverse et loi de la réfraction) s'appréhendent comme des conséquences du principe de Fermat : «*Le chemin réellement suivi par la lumière pour aller de A à B est de longueur optique L stationnaire par rapport à tout chemin infiniment voisin : $dL=0$* ». La longueur optique est la longueur que parcourrait la lumière dans le vide pendant le temps qu'elle met pour aller de A à B.

I.2. Propagation rectiligne dans le vide

La lumière se propage en ligne droite dans le vide et plus généralement dans un milieu homogène isotrope, pour lequel on peut définir un indice de réfraction n constant quelle que soit la direction de propagation de l'onde.

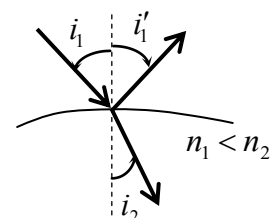
La trajectoire de la lumière est donc représentée par un trait appelé *rayon lumineux*. Un faisceau de lumière représente un ensemble de rayons indépendants.

Pour le faire dévier de sa trajectoire rectiligne, le faisceau de lumière doit rencontrer une interface séparant deux milieux différents appelé *dioptré*.

I.3. Propagation à la traversée d'un dioptre

A la traversée d'un dioptre (n_1, n_2) l'onde lumineuse incidente se divise en une onde réfléchi et en une onde transmise selon des directions parfaitement déterminées par *les lois de Snell-Descartes de la réflexion et de la réfraction*.

- *Plan d'incidence* : le rayon incident et la normale au dioptre au point d'incidence forment le plan d'incidence. Les rayons réfléchi et réfracté appartiennent à ce plan.



- Loi de la réflexion : $i'_1 = -i_1$
- Loi de la réfraction : $n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i_1$

Comment varie l'angle de réfraction par rapport à celui d'incidence dans les deux cas suivants : $n_1 < n_2$ et $n_1 > n_2$?

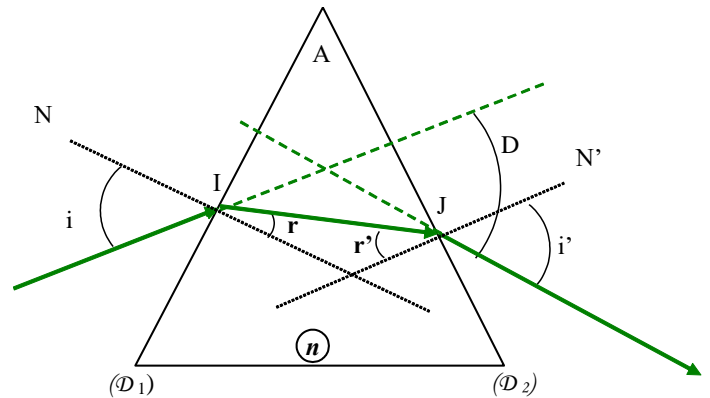
I.4. Le prisme

Un prisme est un élément optique utilisé pour réfracter la lumière, la réfléchir ou la disperser. C'est traditionnellement un prisme droit à base triangulaire, constitué d'un matériau transparent (verre ou plexiglas).

On rappelle les « formules du prisme »

$$\begin{aligned} \sin i &= n \sin r \\ \sin i' &= n \sin r' \\ A &= r + r' \\ D &= i + i' - A \end{aligned}$$

Les angles i , i' , r et r' sont repérés par rapport à la normale aux dioptries. D est appelé l'angle de déviation et A l'angle au sommet du prisme.



On peut montrer qu'il existe un angle d'incidence particulier pour lequel la déviation est minimum, on nomme ce minimum de déviation D_m .

Lorsque $D = D_m$, on a $i = i'$ et $r = r'$ d'où

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$

ce qui permet de mesurer l'indice optique du verre constituant le prisme.

Remarque : L'indice du verre dépend de la longueur d'onde de la source utilisée selon la loi de Cauchy, $n(\lambda) = A + B/\lambda^2$

I.5. Lentilles minces : éléments principaux et relation de conjugaison

Une lentille est un milieu transparent limité, au moins d'un côté, par une surface courbe, sphérique en général. La lentille est dite mince si son épaisseur sur l'axe optique est négligeable devant les rayons de courbure de ses faces. Dans ce cas, les sommets des deux dioptries sont considérés comme confondus, en un point noté S qui est aussi le centre optique.

Trois points sont utilisés pour la construction des images :

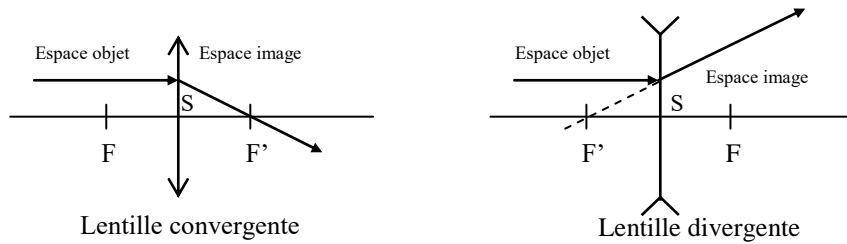
- *Le centre optique* : tout rayon passant par le centre optique n'est pas dévié ;
- *Le foyer principal image F'* : tout rayon incident parallèle à l'axe optique ressort en passant par F' ; F' est le conjugué d'un point objet à l'infini ;
- *Le foyer principal objet F* : tout rayon incident passant par F ressort parallèlement à l'axe optique ; F est le conjugué d'un point image à l'infini.

Les lentilles sont généralement caractérisées par leur *distance focale image*, $f' = \overline{OF'}$, ou par leur *vergence*, $C = \frac{1}{\overline{OF'}}$ qui s'exprime en dioptrie ($1 \text{ } \delta = 1 \text{ m}^{-1}$).

Il existe deux types de lentilles minces :

- *Les lentilles convergentes* ($C > 0$) : les foyers principaux sont réels (foyer objet dans l'espace objet, foyer image dans l'espace image) ; ces lentilles sont dites à bords minces (plus épaisses sur l'axe optique que sur les bords) ;

- Les lentilles divergentes ($C < 0$), dont les foyers principaux sont virtuels (foyers objet et image respectivement hors de l'espace objet et image) ; ces lentilles sont dites à bords épais (plus épaisses sur les bords que sur l'axe).



Les formules de conjugaison des lentilles minces sont issues des relations de conjugaison des dioptries sphériques, qui résultent des lois de Descartes de l'optique géométrique ; elles sont valables dans les conditions de Gauss :

- les rayons lumineux forment un petit angle avec l'axe optique ;
- ils coupent les dioptries au voisinage de leur sommet.

Dans ces conditions, un système centré donne d'un point objet une image ponctuelle, et une lentille mince a un fonctionnement symétrique.

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'} = C \quad \text{ou encore} \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} A \text{ objet, } A' \text{ image de } A, \\ \gamma \text{ grandissement} \end{array}$$

$$\gamma = \frac{OA'}{OA} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}$$

En pratique, et tout particulièrement en TP, l'hypothèse sur les conditions de Gauss ne sera pas forcément toujours remplie : les lentilles présenteront donc des défauts, appelés *aberrations géométriques*, liés au fait que la lentille ne sera pas rigoureusement *stigmatique* (image d'un point objet non ponctuelle).

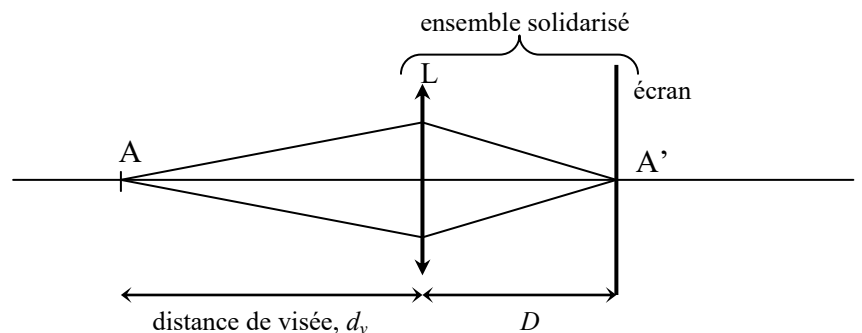
De plus, comme la vergence d'une lentille mince dépend de la vergence des dioptries qui la délimitent, elle dépend donc aussi de l'indice de réfraction du milieu qui la constitue. Ce qui implique que la vergence d'une lentille dépend de la longueur d'onde (cf. loi de Cauchy).

Les expériences avec les lentilles minces se faisant essentiellement en lumière blanche, les lentilles présenteront donc aussi des défauts liés à la *dispersion* de la lumière, appelés *aberrations chromatiques*.

Peut-on avoir une image réelle, donc un faisceau de lumière émergent convergent, avec une lentille divergente ?

1.6. Le viseur ou « œil réduit »

Un viseur ou « œil réduit » est l'association d'une lentille convergente L (distance focale f') et d'un écran placé à une distance D fixe de la lentille. Dans la pratique, on solidarise la lentille et l'écran à l'aide d'une tige. L'œil réduit ainsi formé est donc capable de « viser » des objets à une distance d_v fixe.



L'utilisation de l'œil réduit dans les expériences sur les lentilles minces présente plusieurs intérêts :

- il permet de faire des mesures relatives, i.e. en s'affranchissant des problèmes de positionnement des objets et lentilles sur leurs supports respectifs ;
- il permet de viser et donc de positionner des images virtuelles et à l'infini.

La relation entre f' , D et d_v s'obtient par la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d_v} = \frac{1}{f'}$$

On voit donc 2 cas particuliers :

- si l'on prend $D = f'$, on obtient un « viseur à l'infini », ce qui correspond au mode de fonctionnement de l'œil humain lorsqu'il n'accommode pas, et permet d'observer des images à l'infini ;
- si l'on prend $D = 2f'$, la distance de visée est alors $d_v = 2f'$, ce qui est facile à retenir !

Cependant, toute autre combinaison vérifiant l'équation ci-dessus est possible, et l'intérêt est de fabriquer un œil réduit qui soit capable de viser dans de bonnes conditions à l'endroit où l'on veut...

Quel est le grandissement de l'œil réduit dans le cas d'un objet à distance finie et dans le cas particulier où $D = 2f'$?

II. Manipulations

II.1. Dioptries - Approche qualitative

Il y a réfraction lorsque la lumière traverse un dioptré, c'est-à-dire une surface séparant deux milieux homogènes, d'indices de réfraction différents. Ce phénomène s'accompagne en général d'une réflexion partielle, et de diffusion selon la rugosité de la surface. Les intensités lumineuses transmises et réfléchies dépendent des indices n_1 et n_2 mais également de l'angle d'incidence i_1 .

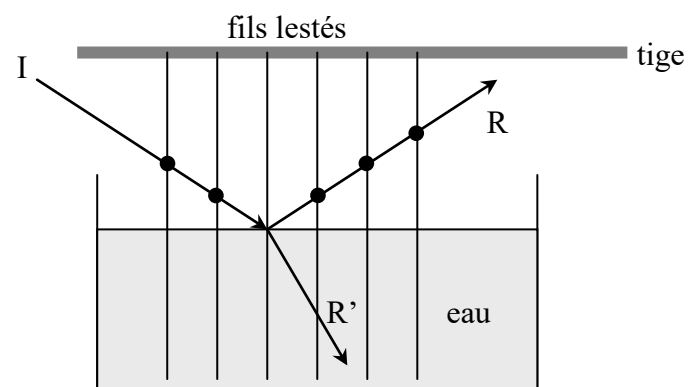
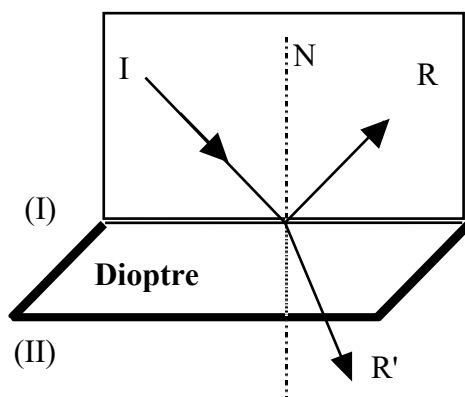
Mise en évidence

- On plonge une tige dans une cuve contenant de l'eau : elle apparaît brisée.
- On plonge un agitateur en verre (ou une bouteille de tabasco vide) dans de la glycérine : la partie immergée est invisible !

Ces deux expériences simples s'expliquent par le phénomène de réfraction dont on va maintenant étudier les lois.

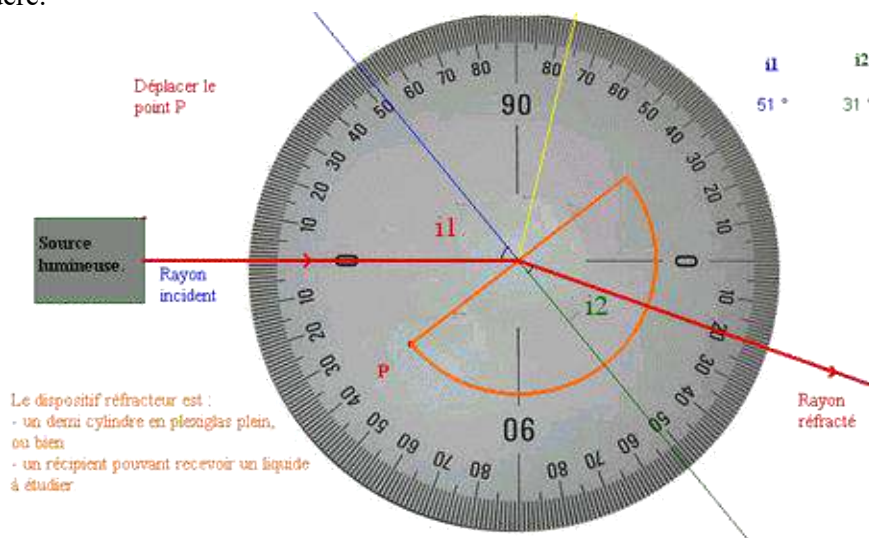
II.2. Dioptries – Lois de Snell Descartes

« Les rayons réfléchis (R) et réfractés (R') sont situés dans le plan d'incidence défini par le rayon incident I et la normale N au dioptré au point d'incidence ».



On illustre cette loi avec le dioptré plan air/eau : on utilise une cuve parallélépipédique remplie d'eau ; 6 fils lestés par des masses marquées sont attachés à une tige métallique et plongent dans le liquide. On s'arrange pour qu'un rayon laser marque les trois premiers fils avant de rencontrer la surface de l'eau ; le plan d'incidence est ainsi matérialisé par celui contenant les fils. On observe alors un rayon réfléchi et un rayon transmis, tous deux contenus dans le plan d'incidence puisque marquant les trois derniers fils, et situés de l'autre côté de la normale. On remarque que le rayon réfracté s'est rapproché de la normale au dioptré.

On utilise un montage constitué d'un demi-cylindre de plexiglas fixé sur un disque gradué et d'un laser pour vérifier les **lois de Snell-Descartes**. Les angles sont repérés par rapport à la normale au dioptre considéré.



Dans le cas des dioptres plan et sphérique, mettre en évidence les configurations pour lesquelles le rayon incident n'est pas dévié. En quoi cela sert-il dans cette expérience ?

Dioptre air / plexiglas

Réflexion : Mesurer i' (angle du rayon réfléchi) pour i_1 variant entre 0° et 50° .

Tracer la courbe $\sin i' = f(i_1)$ et vérifier la loi de la réflexion.

Réfraction : Mesurer i_2 (angle du rayon réfracté) pour i_1 variant entre 0° et 50° .

Quelle est la précision sur vos mesures angulaires ?

Tracer la courbe $\sin i_2 = f(\sin i_1)$. Exploiter ce graphe : déterminer l'indice optique n du plexiglas.

Dioptre plexiglas/air

Tourner le dispositif pour étudier le dioptre plexiglas / air. Mettre en évidence le phénomène de réflexion totale et mesurer l'angle limite. En déduire l'indice optique n du plexiglas. Evaluer la précision et comparer à la valeur trouvée précédemment.

II.3. Applications

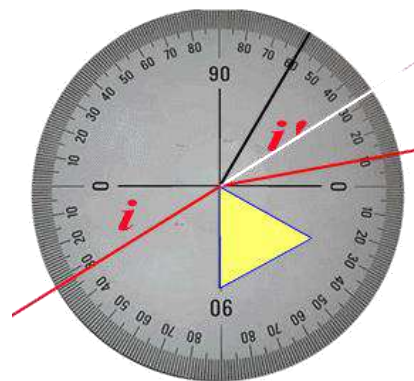
Etude du prisme

Mesure de D_m ; détermination de n

On travaille ici en lumière monochromatique avec une source LASER (rouge par exemple : $\lambda=632.8$ nm). On peut montrer que D , l'angle de déviation, passe par un minimum noté D_m .

Le dispositif expérimental est le suivant :

On utilise de préférence un laser suivi d'une lentille cylindrique (agitateur en verre par exemple) afin d'avoir un pinceau lumineux. La face d'entrée du prisme est placée suivant le diamètre 90° - 90° d'un disque gradué mobile. De cette façon, l'angle i est directement mesuré (33° dans l'exemple ci-contre). Attention pour la mesure de i' par rapport à la normale à la face de sortie.



Faire varier i de 0 à 90° et constater que D passe par un minimum D_m . Relever cette valeur D_m .

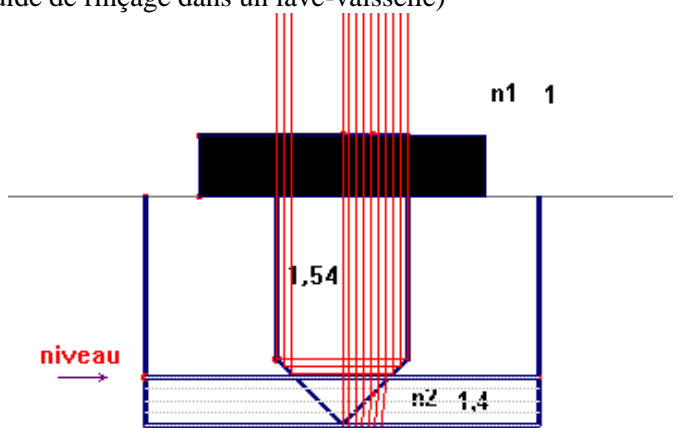
Calculer n et estimer sa précision Δn (Le calcul d'incertitude n'est pas simple mais se trouve dans la plupart des livres de physique expérimentale ; par ex :Berty T3, Bellier ...

Prisme à réflexion totale

Application au détecteur de niveau de liquide : (liquide de rinçage dans un lave-vaisselle)

Le détecteur est composé d'un cylindre de Plexiglas dont une extrémité est un cône d'angle au sommet 90° . Si le cône baigne dans le liquide, il y a transmission de la lumière et le fond paraît noir. Si le cône est dans l'air (niveau de liquide trop bas), il y a réflexion totale, le fond paraît clair.

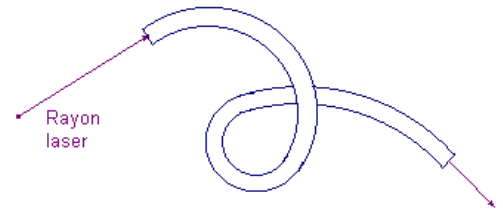
On pourra utiliser un **prisme à réflexion totale** avec une diode laser pour illustrer le principe du détecteur à niveau de liquide. Le rayon est réfléchi tant que le prisme n'est pas dans l'eau.



La fibre optique

Transmission par **fibre optique** utilisant le phénomène de réflexion totale.

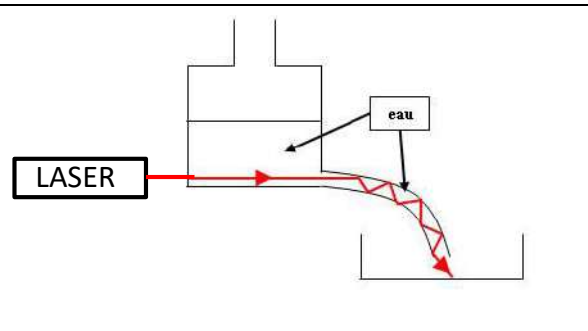
Pour que la lumière puisse être guidée dans un milieu 1, il faut que le milieu 2 entourant le milieu 1 présente un indice de réfraction plus faible. C'est une condition indispensable à l'obtention de la **réflexion totale**. La fabrication des fibres optiques tend à ce que le "cœur" de la fibre ait un indice de réfraction légèrement supérieur à celui de la "gaine" qui l'entoure. La lumière est ainsi guidée. Il existe une autre condition : les rayons doivent faire un angle important par rapport à la normale à l'interface cœur/gaine. En injectant des rayons avec des incidences quelconques, seuls ceux suffisamment inclinés seront guidés.



Utiliser le dispositif adapté et un faisceau laser pour montrer que la lumière est guidée dans la fibre.

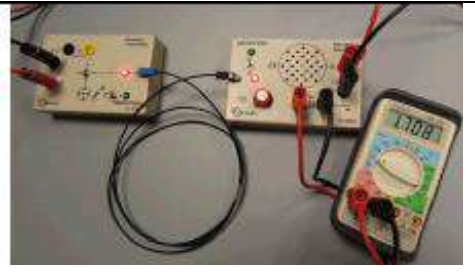
On pourra également illustrer le principe du guidage de la lumière en construisant une **fontaine lumineuse** (expérience historique de John Tyndall 1820-1893).

Attention aux réflexions parasites du laser



Application : Transmission optique d'un signal périodique. On se propose ici d'illustrer la transmission d'un signal électrique par fibre optique. On utilise un matériel spécifique : ensemble "**fibroptonic**" de Jeulin. Il s'agit d'une expérience qualitative (expérience 8 de la notice).

Alimentation des modules E et R : 12V.
 Signal fourni par le GBF (et à transmettre) : signal sinusoïdal ou rectangulaire, d'amplitude crête à crête comprise entre 50 et 300 mV, et de fréquence de 1000 à 2000 Hz. Le récepteur possède un haut-parleur qui permet de transformer le signal reçu en un son.
 Observer à l'oscillo le signal d'entrée et de sortie et montrer la transmission du signal.



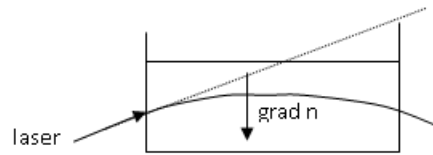
Le mirage

Pour illustrer le principe du mirage, il est nécessaire de préparer une solution présentant un gradient d'indice. Pour cela, verser de l'eau à mi-hauteur dans une petite cuve transparente. Préparer une solution saturée en sucre (ou en sel, ça colle moins !). Ajouter avec délicatesse (en utilisant un entonnoir) environ 2 cm de cette eau sucrée (ou salée). Les 2 liquides sont miscibles mais le mélange ne s'homogénéise que très lentement : on dispose d'un gradient utilisable durant plus d'1h.

Faire traverser le mélange par un rayon laser et observer la trajectoire incurvée du rayon.

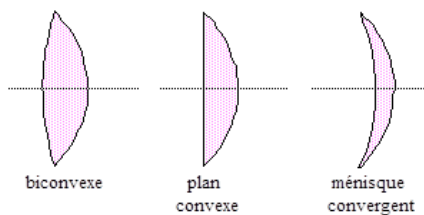
Expliquer le phénomène observé.

Expliquer pourquoi on peut voir le sommet du Canigou depuis Marseille (<http://canigou.allauch.free.fr/Sites/canigou-azimut.gif>) ou la Corse depuis la côte niçoise ou depuis la Ste Baume (<http://sites.univ-provence.fr/~laugierj/canigou/index09TM.htm>).

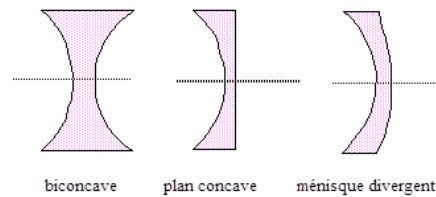


II.4. Mise en évidence des éléments principaux d'une lentille

On utilise ici des lentilles « épaisses » ; on dispose de différentes lentilles convergentes et divergentes, d'une source de lumière et d'un tableau magnétique sur lequel peuvent être fixées la source et les lentilles.



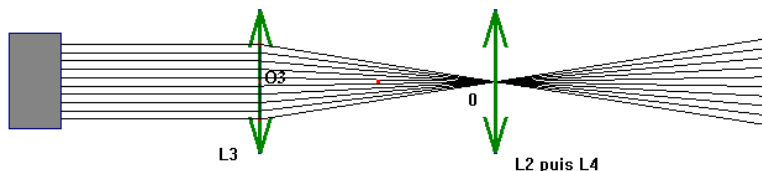
Lentilles convergentes



Lentilles divergentes

Centre optique

On travaille avec un faisceau de rayons parallèles :



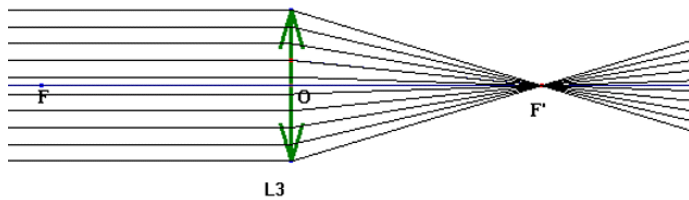
Observer que tout rayon lumineux passant par le centre O d'une lentille la traverse sans être dévié. O est le centre optique de la lentille.

Foyer objet et foyer image ; distance focale

Lentille convergente

Recherche du foyer image de L3.

Après traversée de la lentille, les rayons lumineux convergent en F'



situé sur l'axe optique de la lentille.

On note :

F' : foyer principal image

OF' : distance focale image

Mettre aussi en évidence :

- le foyer objet d'une lentille convergente en utilisant une autre lentille.

- le foyer image d'une lentille divergente

II.5. Lentilles minces

Les expériences qui utilisent des lentilles minces se font essentiellement sur banc d'optique, avec au minimum une source lumineuse, un condenseur intégré à la source ou non, un objet éclairé, une lentille et un écran (par exemple, pour les montages sur les instruments d'optiques, le nombre de lentille est au minimum de 3) : *quelle est donc la première chose à vérifier avant de commencer les manipulations ?*

a) Mesure d'une distance focale par autocollimation (pour lentille convergente)

Si un point objet P est placé dans le plan focal F d'une lentille convergente L, le faisceau qui sort de la lentille est formé de rayons parallèles. Si on reçoit ce faisceau sur un miroir plan M, le faisceau réfléchi est, lui aussi, formé de rayons parallèles. Après avoir traversé la lentille, les rayons viendront converger dans le plan focal F, pour y donner l'image P', dans le même plan que l'objet. On pointe, à l'œil réduit, l'objet en premier, puis on interpose la lentille L et le miroir M. Quand la netteté de l'image est obtenue dans le même plan que l'objet, on retire M et on pointe la monture de la lentille L, ce qui donne la distance focale objet f .

Observations : montrer que l'image ainsi obtenue est indépendante de la position du miroir.

Montrer et observer que dans ces conditions le grandissement est égal à 1.

Estimer l'incertitude Δf sur la mesure de f .

Tracer sur papier une construction correcte de cette expérience avec un objet AB linéaire

Cette expérience marche-t-elle si la lentille est divergente ? Pourquoi ?

b) Vérification de la relation de conjugaison

Pour l'ensemble des expériences, on prendra bien soin de se trouver dans les conditions de Gauss. On prendra comme objet une mire éclairée graduée (pour réaliser facilement la mesure du grandissement). Les pointages se feront de préférence avec un œil réduit. Les mesures de grandissement se feront également à l'œil réduit.

Réaliser un œil réduit visant à environ 30cm à l'aide d'une lentille convergente et d'un écran

Etudier pour commencer une lentille convergente, de distance focale comprise entre 12 et 20 cm.

A l'aide de l'objet, de la lentille et de l'œil réduit réaliser 1 mesure pour les 3 situations suivantes :

a. Objet réel / Image réelle

b. Objet réel / Image virtuelle

c. Objet virtuel / Image réelle

Pour chaque situation :

- Faire une construction correcte (sur papier) en représentant l'objet, la lentille et l'image formée à l'aide de 2 ou 3 rayons lumineux.

- Mesurer les distances algébriques p et p' , avec leurs incertitudes
- En déduire la valeur de la distance focale f' de la lentille et son incertitude.

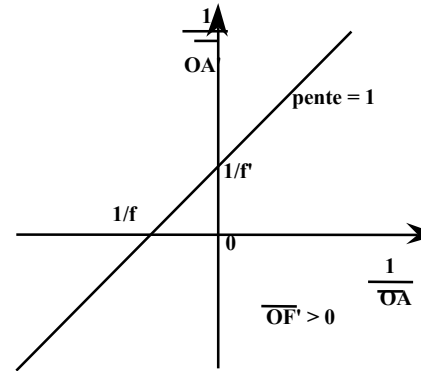
Bilan des mesures : Regrouper l'ensemble des résultats sous la forme d'un graphe.

Vous devez trouver une droite de pente 1 avec pour ordonnée à l'origine $1/f'$.

Vous pouvez également porter γ en fonction de $\overline{OA'}/\overline{OA}$ et vérifier que vous obtenez une droite passant par l'origine et de pente égale à 1.

Note : les expériences présentées ci-dessus peuvent également être réalisées avec une lentille divergente.

Tracer comment se décale la droite obtenue ?



Références :

- *Expériences d'optique*, R. Duffait (Breal 2000)
- *CAPES de Physique Chimie, Montages de Physique Optique*, J.P. Bellier, C. Bouloy, M. Guéant (Dunod)
- *Optique expérimentale*, Sextant, Hermann, Collection Enseignement des Sciences
- *Livres de Physique Term S.*

TP 2A : OPTIQUE PHYSIQUE – DIFFRACTION ET INTERFERENCES

A. Rappels théoriques

A.I. Optique Ondulatoire

A.II. Conditions générales d'obtention des interférences

B. Manipulations

B.I. Illustration des phénomènes de diffraction et d'interférences à l'aide d'une cuve à ondes

- I.1. Diffraction
- I.2. Interférences

B.II. Diffraction par une fente

- II.1. Expérience qualitative
- II.2. Expérience quantitative

B.III. Interférences

- III.1. Etude expérimentale des fentes d'Young en lumière cohérente
- III.2. Etude expérimentale des fentes d'Young en lumière blanche.

Programmes :

<p>TermS :</p> <p>Observer Ondes sismiques, ondes sonores ; absorption, propagation Détecteurs d'ondes Ondes progressives, retard Ondes prog. périodiques Analyse spectrale, hauteur, timbre Diffraction ; influence taille ouverture Interférences</p>	<p>Term STL SPCL</p> <p>Voir plus grand : objectif, oculaires, diaphrag. et diffraction, Mesurer : propagation, réfraction, réflexion, diffusion, diffraction, interférences, réseaux,</p>	
--	--	--

A. Rappels théoriques

A.I. Optique Ondulatoire

L'optique ondulatoire est l'étude des phénomènes lumineux dont la description correcte passe par une description ondulatoire de la lumière. L'onde électromagnétique est alors caractérisée par les champs (\mathbf{E}, \mathbf{B}) , vecteurs variant dans le temps et l'espace, solution des équations différentielles linéaires de Maxwell. On peut distinguer deux parties :

- la **diffraction** : l'amplitude de l'onde lumineuse dépend des conditions aux limites imposées par son extension. Un rayon lumineux qui passe par un trou de taille pas très grande comparé à la longueur d'onde, voit son amplitude modifiée.
- les **interférences** : lorsque deux ondes se superposent, ce sont leurs amplitudes complexes qui s'ajoutent et non directement l'énergie qu'elles transportent (i.e. leur intensité). Pour des ondes monochromatiques cohérentes, il en résulte une modulation spatiale de leur intensité.

Objectifs :

- savoir correctement mettre en évidence le phénomène de diffraction et d'interférences, bien distinguer les deux s'ils coexistent ;
- savoir réaliser des montages utilisant les techniques de projections qui donnent l'observation de figures avec des intensités intenses et bien contrastées.

Dans l'ensemble des manipulations la diffraction et les interférences seront observées sur un écran ou à l'aide d'un oculaire micrométrique. On veillera à ce que la distance entre les objets provoquant les interférences ou la diffraction et l'écran, notée D , soit grande devant la dimension caractéristique de cet objet de telle sorte qu'on puisse se placer dans le cadre de la **théorie de Fraunhofer** (diffraction à l'infini).

A.II. Conditions générales d'obtention des interférences

Lors de la superposition de faisceaux lumineux, pour qu'il y ait observation du phénomène d'interférences, les conditions suivantes doivent être vérifiées :

- les ondes sont **isochrones**, c'est-à-dire de même fréquence ;
- les ondes sont **cohérentes**, elles présentent un déphasage constant dans le temps et l'espace ;
- les ondes ont des composantes de E parallèles.

Pour satisfaire à ces conditions, le meilleur moyen est de superposer des faisceaux provenant initialement d'une même source S ayant parcouru des chemins optiques différents. Ceci est obtenu grâce à un dispositif interférentiel :

- soit par **division du front d'onde** (fentes d'Young, bilentille de Billet, biprisme de Fresnel, miroirs de Fresnel, réseau) ;
- soit par **division d'amplitude** (interféromètre de Michelson, de Pérot-Fabry, film de savon, anneaux de Newton).

Lorsque la source S est ponctuelle, les interférences sont observées dans toute la région de superposition des ondes, elles sont non localisées, dans le cas contraire lorsque la source est étendue, les interférences sont localisées.

Intensité-Différence de marche-Interfrange

Nous rappelons ici les résultats obtenus dans le cas des fentes d'Young éclairées par une source S ponctuelle et monochromatique (figure 1)

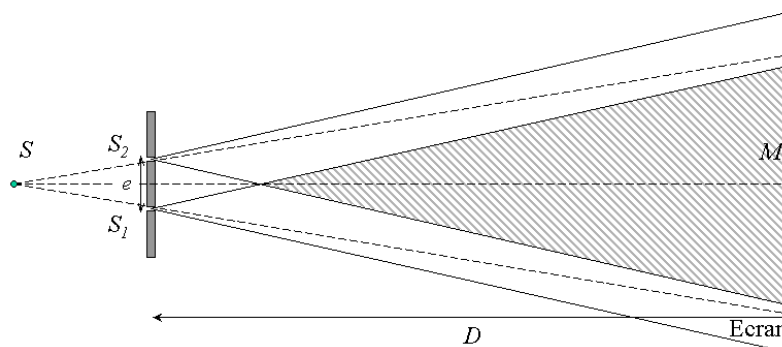


Figure 1

Considérons la superposition des ondes électromagnétiques provenant des sources cohérentes S_1 et S_2 , distantes de e , qui sont les sources secondaires formées à partir de S . Supposons que les ondes qui se superposent en un point M de l'écran correspondent à des ondes planes dont les directions de propagation sont confondues. On obtient pour l'intensité en M :

$$I(M) = 2I_0 [1 + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)] \text{ avec } \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\delta/\lambda$$

La différence de marche δ est donnée par : $\delta = [S_2M - S_1M] = ex/D$

L'intensité est constante pour x fixé, les franges sont des droites perpendiculaires à (S_1S_2) dans le plan de l'écran. L'interfrange est la périodicité de l'intensité, par exemple, la distance entre deux franges sombres consécutives :

$$i = \lambda D/e$$

B. Manipulations

B.I. Illustration des phénomènes de diffraction et d'interférences à l'aide d'une cuve à ondes

Pour avoir plus de détails on se référera au « Dictionnaire de mécanique » (L Quaranta)

On utilise la cuve à eau qui permet de visualiser la propagation d'onde à la surface de l'eau (propagation à deux dimensions). L'observation est réalisée en utilisant un projecteur éventuellement en mode stroboscopique. Les vagues à la surface de l'eau créent des lentilles convergentes (zones brillantes) pour la lumière alors que les creux réalisent des lentilles divergentes (zones sombres).

Pour toutes ces manipulations on prendra soin d'adapter la hauteur d'eau pour réaliser de « belles » observations. On place sur les bords de la cuve des éponges vertes pour éviter les réflexions. Régler l'horizontalité du dispositif à l'aide du niveau. La longueur d'onde dépend de la hauteur d'eau sur l'obstacle. Si l'horizontalité est bien réglée la hauteur d'eau est la même partout.

I.1. Diffraction

On utilise des ondes planes et l'obstacle métallique percé d'un trou. Observer la diffraction de l'onde plane. Étudier l'ouverture angulaire de la diffraction en fonction de la longueur d'onde. Évaluer l'influence de la taille de l'obstacle. Vérifier que les tendances sont identiques à celles de l'optique.



Attention, la figure de diffraction obtenue ne correspond pas aux figures de diffraction que vous avez l'habitude d'étudier en optique (diffraction à l'infini). Ce type de figure de diffraction peut être obtenu aussi en optique lorsque l'on se place proche de la fente.

I.2. Interférences

Le vibreur est utilisé avec une fourche qui crée deux systèmes d'ondes circulaires cohérentes qui interfèrent. La superposition des deux ondes fait apparaître des zones où l'amplitude de l'onde résultante est maximale (interférences constructives) ou minimale (interférences destructives).



B.II. Diffraction par une fente

II.1. Expérience qualitative

Réaliser le montage de la Figure 2, à la sortie du faisceau laser placer la fente de largeur variable et observer sur l'écran la figure de diffraction. Régler la fente dans le faisceau de telle sorte que la figure de diffraction soit la plus nette possible.

Comment cette figure est-elle orientée par rapport à la fente ?

Comment se modifie-t-elle lorsqu'on élargit ou rétrécit la fente ?

Qu'observeriez-vous si la fente était remplacée par un trou circulaire ? Comment varie la largeur de la tache centrale ? (si vous ne savez pas faites la manip !)

II.2. Expérience quantitative

A la sortie du faisceau laser placer une des fentes de la diapositive. On donne l'expression en fonction de x de l'intensité diffractée par une fente de longueur très grande devant sa largeur a .

$$I(x) = I_0 \operatorname{sinc}^2(\pi x a / \lambda D)$$

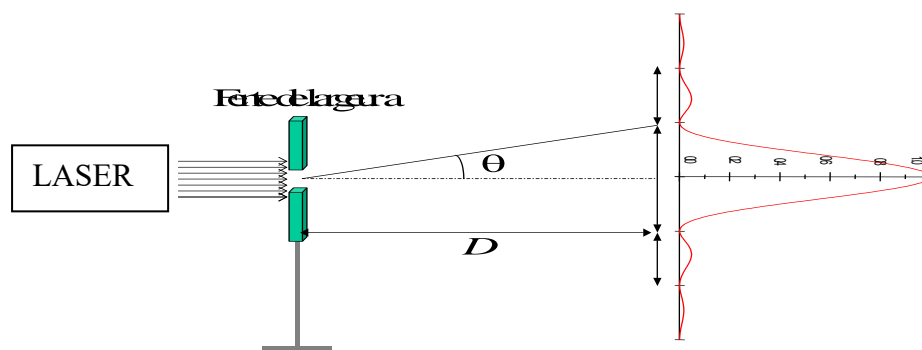


Figure 2

Que représente θ ? Donner son expression en fonction de x la position d'un point M de l'écran.

Quelles sont les positions des minima d'intensité ?

Montrer que la largeur de la tache centrale vaut $2 \lambda D/a$.

A partir de vos mesures, déduire la largeur a de la fente et évaluer l'incertitude des mesures.

La figure de diffraction d'une pupille complémentaire (ex : fil calibré, cheveu) est-elle très différente ?

Faites la mesure de l'épaisseur d'un de vos cheveux (ou celui de votre binôme !).

B.III. Interférences

III.1. Etude expérimentale des fentes d'Young en lumière cohérente (laser)

Expérience qualitative : Réaliser le montage de la Figure 2, à la sortie du faisceau laser placer une bifente et observer sur l'écran la répartition de l'intensité lumineuse.

Observer sur l'écran les franges parallèles équidistantes dans la direction parallèle à S_1S_2 .

En déplaçant l'écran vérifier que les franges ne sont pas localisées.

Montrer l'influence de la diffraction dans le profil d'intensité.

En utilisant les autres bifentes de la diapositive, montrer l'effet de la variation de distance entre fentes, notée e , sur le nombre de franges observées dans la tache centrale de diffraction.

Expérience quantitative : L'expression de l'intensité diffractée par des fentes d'Young de largeur a et distantes de e est :

$$I(x) = 2I_0 \operatorname{sinc}^2(\pi x a / \lambda D) [1 + \cos(2\pi x e / \lambda D)] = 4I_0 \operatorname{sinc}^2(\pi x a / \lambda D) \cos^2(\pi x e / \lambda D)$$

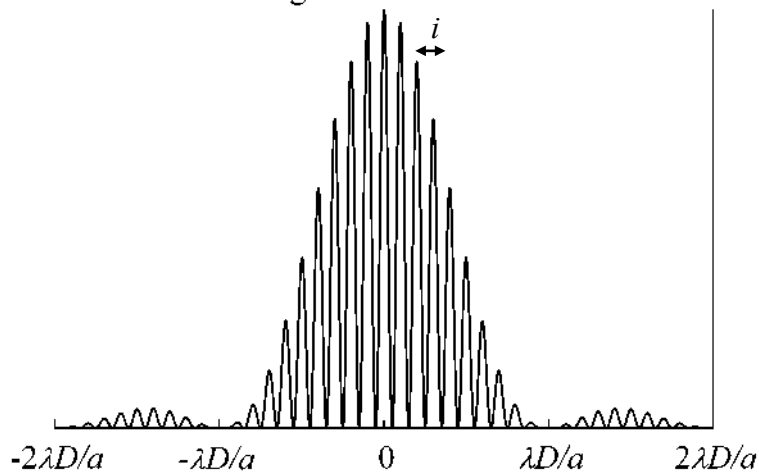
Mesurer l'interfrange et déduire la distance e entre les fentes, évaluer l'incertitude sur e .

Mesurer la largeur de la tache centrale et déduire la largeur a des fentes, évaluer l'incertitude sur a .

Placer le laser vert, déduire sa longueur d'onde à partir de la figure observée, évaluer l'incertitude sur λ .

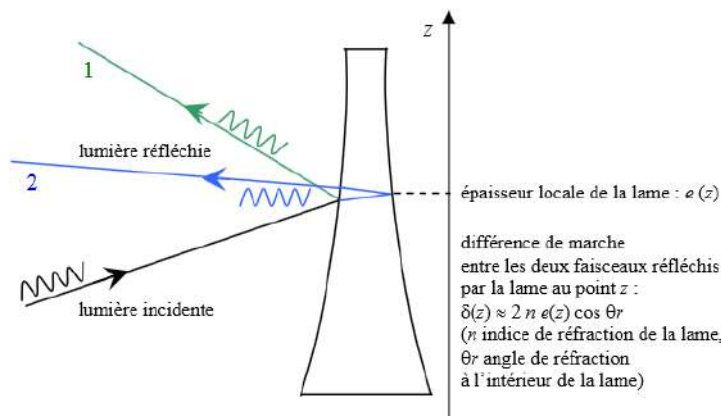
Choisir une autre bifente (d'écartement e différent et de largeur a identique). Vérifier que le nombre de franges d'interférences comptées dans la tache centrale vaut $2e/a$.

Diffraction par deux fentes infiniment longues
de largeur a et distantes de e

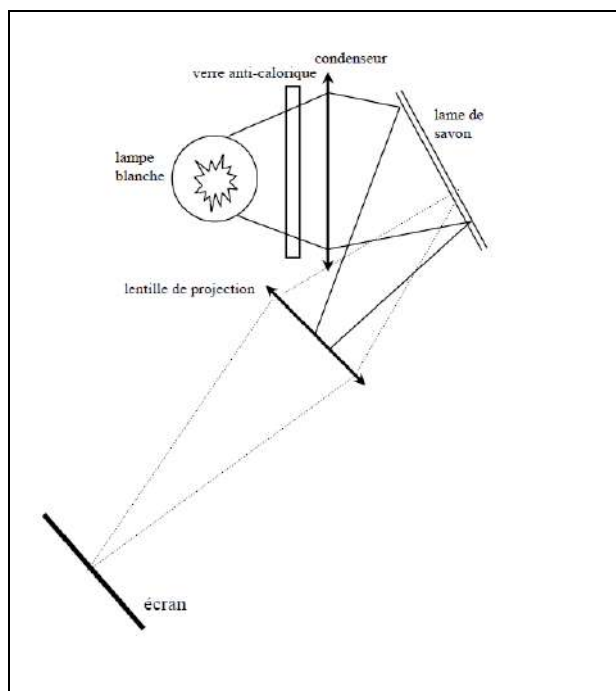


III.2. Interférences par une lame de savon

Lorsqu'on observe la lumière réfléchie sur une simple lame (ou bulle) de savon, des franges colorées apparaissent. Ceci est dû aux interférences entre les deux types de faisceaux lumineux réfléchis par la lame : le faisceau (1) réfléchi au niveau de la première interface - air / savon - et celui (2) réfléchi au niveau de la seconde interface - savon / air :



Le second faisceau parcourt une distance plus importante que le premier, car il effectue un aller-retour dans la lame. Ceci produit un déphasage par rapport au premier faisceau. L'intensité de l'onde résultante dépend à la fois de la longueur d'onde de la lumière et de l'épaisseur optique locale de la lame. Les franges observées sont dites **d'égaies épaisseurs** (car l'état d'interférences est directement lié à l'épaisseur de la lame)..

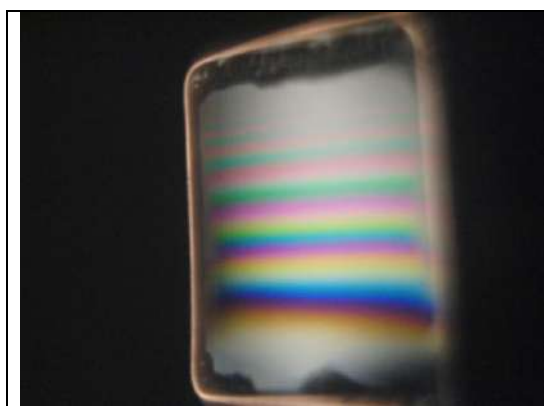


Pour former une lame de savon, on prendra un cadre réalisé en fil de fer que l'on immergera dans une solution de liquide pour bulles de savon. Si il n'y en a pas, voici la recette : 1 volume de liquide vaisselle + 1 volume de glycérine + 8 volumes d'eau.

Le phénomène d'interférences peut être observé à l'œil nu (vous avez tous déjà vu les belles irisations des bulles de savon) mais il est plus spectaculaire de les projeter sur un écran.

Faire le montage ci-contre. Procéder au réglage (netteté du cadre) avant de former la lame de savon.

Observer les franges irisées, les couleurs observées correspondent aux teintes de Newton. La frange noire correspond à une épaisseur de lame petite devant la longueur d'onde. On pourra utiliser une lampe à LED qui ne chauffe pas et remplacer le verre anticalorique par un diffuseur.



TP 2B : INTERFERENCES A ONDES MULTIPLES, SPECTRES D'EMISSION, SPECTRES D'ABSORPTION,

Interférences à ondes multiples, application au stockage de l'information

Thèmes :

Observer
Caractéristique et propriété des ondes
Interférences

Agir
Transmettre et stocker l'information
Stockage optique

Type de ressources : activité expérimentale

Notions et contenus : Interférences à ondes multiples

Compétences travaillée ou évaluées :

Pratiquer une expérience expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses

Nature des activités :

activité expérimentale 1 : Étude préliminaire d'un réseau (facultatif)
activité expérimentale 2 : Détermination du pas du sillon d'un CD et d'un DVD

Résumé :

Au cours de cette séance, l'élève va mesurer le pas du sillon d'un CD et/ou DVD. Pour cela, une étude d'interférence à ondes multiples par division du front d'onde via un réseau est proposée. Cette étude

préalable permet de vérifier la formule des réseaux. Par analogie avec cette précédente étude, l'étude d'un CD ou DVD peut être menée en démarche d'investigation. Une fois le pas du réseau déterminé, l'étude peut être prolongée par la détermination de l'ordre de grandeur de la capacité, en octet, du CD et du DVD. Ainsi, cette étude initiée dans la partie *Interférences* du thème *Observer* peut servir de passerelle vers la partie *Stockage optique* du thème *Agir*.

Mots clés :

interférence, onde monochromatique, laser

Académie où a été produite la ressource :

Académie de Paris

http://www.ac-paris.fr/portail/jcms/piapp1_59019/disciplines-physique-chimie-portail

Activité expérimentale 1 : Etude préliminaire d'un réseau

Un **réseau** est défini comme un ensemble de fentes très fines séparées d'une distance a que l'on se propose de déterminer. Lorsque l'on éclaire le réseau sous incidence normale, on peut observer des taches lumineuses sur un écran provenant des interférences des ondes issues de chaque fente éclairée.



Détermination du nb de traits/mm du réseau

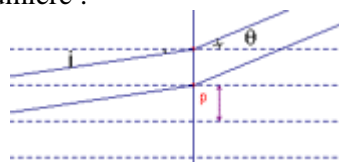
La « formule » des réseaux donne la position des maxima de lumière :

$$\sin \theta - \sin i = k \lambda / a = k n \lambda,$$

a = pas de réseau = distance entre deux traits.

n = nombre de traits par unité de longueur

k = ordre du spectre ($k = 1, 2, 3, \dots$)



Avec le laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$), on peut facilement se placer à $i = 0$ en ajustant la position du réseau de façon à ce que le faisceau réfléchi soit aligné avec le faisceau incident.

Observer la figure d'interférences sur un écran positionné à une distance D . Mesurer θ et en déduire n .

Attention : avec les réseaux, l'approximation $\sin \theta \cong \tan \theta \cong \theta$ n'est pas toujours valable, les angles sont souvent supérieurs la limite habituelle des 10° .

Alternative : on peut montrer qu'il existe un **minimum de déviation** et qu'il se produit lorsque :

$$i = -\theta, \text{ d'où : } 2 \sin \theta = k n \lambda$$

En mesurant θ , on peut déterminer n le nombre de traits par mm du réseau.

Activité expérimentale 2 : Détermination du pas du sillon d'un CD ou DVD

Le CD permet de stocker des informations numériques. Les données sont inscrites sur un sillon enroulé en spirale dont on se propose de déterminer le pas.

La piste est lue sur la face inférieure par un faisceau laser qui sera réfléchi par une fine couche d'or ou autre métal.

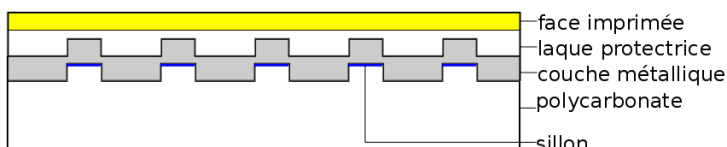


Illustration 2: coupe d'un CD selon son rayon

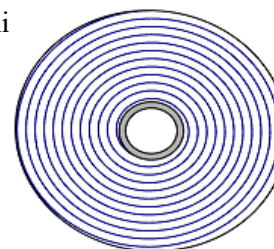
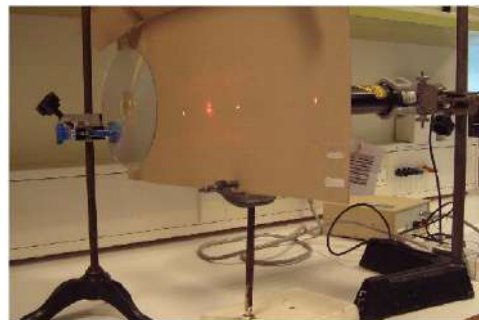
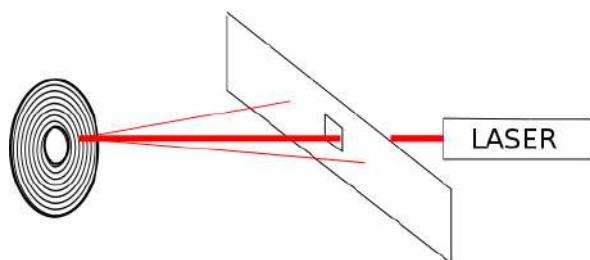
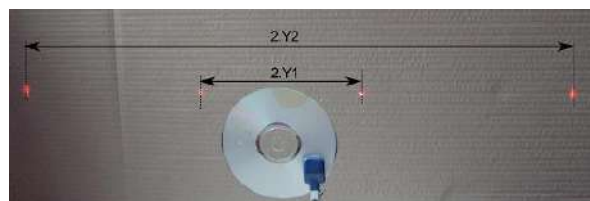


Illustration 1: sillon d'un CD : une piste en spirale

Les sillons sont les analogues aux fentes percées dans la première partie de la couche métallique. Tout se passe comme s'il s'agissait d'un réseau collé à un miroir. Le phénomène d'interférences sera alors observable par **réflexion**.



Disposer un écran percé d'un trou entre le laser et le CD (ou DVD). Ajuster $i=0$ en alignant le faisceau réfléchi sur le faisceau incident. A partir des mesures de $2Y_1$ (entre les ordres -1 et +1) ou $2Y_2$ (entre les ordres -2 et +2) et de la distance D entre le CD et l'écran, déterminer θ (à l'ordre 1 ou 2) et en déduire le pas du sillon.



On trouve typiquement pour un CD $a = 1.6\mu\text{m}$ et pour un DVD $0.74\mu\text{m}$. Le pas d'un sillon de DVD est quasiment deux fois moindre, la piste de lecture sera plus longue et par conséquent un DVD peut stocker davantage d'informations.

Spectres d'émission et d'absorption

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
<p>Seconde Les spectres d'émission et d'absorption : spectres continus d'origine thermique, spectres de raies</p>	<p>Savoir qu'un corps chaud émet un rayonnement continu, dont les propriétés dépendent de la température</p>
<p>Première Couleur des corps chauffés. Loi de Wien. (sera vu en TP en 2nd semestre) Spectre solaire.</p>	<p>Interpréter le spectre de la lumière émise par une étoile : température de surface et entités chimiques présentes dans l'atmosphère de l'étoile. Exploiter la loi de Wien, son expression étant donnée. Expliquer les caractéristiques (forme, raies) du spectre solaire</p>
<p>NOTIONS ET CONTENUS</p>	<p>Compétences exigibles</p>
<p>Terminales Rayonnements dans l'Univers Absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements dans l'Univers. Connaître des sources de rayonnement radio, infrarouge et ultraviolet.</p>

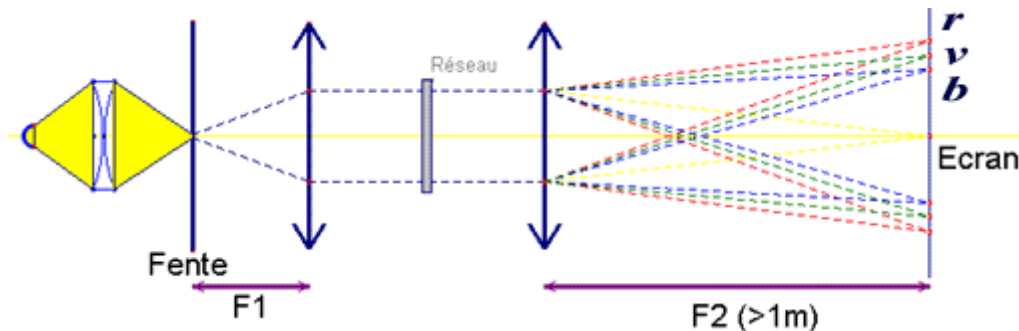
Il existe deux types de spectres :

- Les **spectres d'émission** : les radiations émises par la source sont observées directement
- Les **spectres d'absorption** : les radiations émises par la source sont absorbées par un milieu (filtre, solution colorée, gaz ...) avant l'observation.

Le montage : montage spectroscopique

Pour observer des spectres, il est nécessaire de décomposer la lumière, c'est-à-dire d'utiliser un élément dispersif : prisme ou réseaux. Le montage spectroscopique est le suivant. Il permet d'éclairer l'élément dispersif en lumière parallèle. On place :

- une fente d'entrée F située dans le plan focal d'une lentille L_1 convergente (réglage par autocollimation), donne un faisceau quasi-parallèle ;
- placer ensuite une deuxième lentille L_2 convergente et régler la position de l'écran pour avoir une image nette. Que représente dans ce cas la distance L_2 -écran ?
- placer l'élément dispersif (choisir de préférence un réseau, ce qui permet de pouvoir « rester » sur le banc d'optique) entre L_1 et L_2 , et observer le spectre.



Observer la figure obtenue ; noter l'influence de n nombre de traits par unité de longueur du réseau avec plusieurs réseaux. Observer la présence d'un minimum de déviation en tournant le réseau.

Observation des spectres d'émission

2. Obtention de spectres continu et discontinu

On prendra comme source de lumière :

- une lampe à halogène (lampe quartz-iode) : spectre continu
- une lampe à vapeur métallique Zn, Cd, Hg : spectre de raies.

Observer les divers spectres (différentes valeurs de k) et l'influence du nombre de traits en changeant de réseau.

Remarquer que le rouge est plus dévié que le violet lorsque l'élément dispersif est un réseau (c'est le contraire pour le prisme).

2. Détermination de la longueur d'onde d'une raie

On reprend le même montage avec un réseau ayant un grand nombre de traits (500/mm ou 15000/inch) et on utilise comme source la lampe spectrale Hg (haute pression, attention les yeux pour les UV) qui donne des raies assez bien réparties dans le spectre visible:

1	404,7	Violet	(Hg)	f	5	496,0	Vert "canard"	(Hg)	ff
2	407,7	Violet	(Hg)	ff	6	546,1	Vert	(Hg)	FF
3	435,8	Indigo	(Hg)	FF	7	577,0	Jaune	(Hg)	FF
4	491,6	Vert "choux"	(Hg)	f	8	579,0	Jaune	(Hg)	FF

les longueurs d'onde sont exprimées en nanomètre, FF : très intense F : intense m : moyen f : faible ff : très faible.

Manipulation

Repérer quelques λ caractéristiques et pointer les différentes raies sur l'écran (papier millimétré). Tracer la courbe d'étalonnage du spectrographe en traçant le graphe donnant la position x des raies en fonction de leur longueur d'onde ; on choisit l'ordre $k = 0$ comme origine des ordonnées. Pointer une raie de λ supposée inconnue que l'on détermine à partir de la courbe de d'étalonnage $x(\lambda)$. Vérifier à partir des valeurs tabulées.

Autre méthode : utiliser la « formule des réseaux » au minimum de déviation pour déterminer λ en pointant une raie. Déterminer l'incertitude de cette mesure.

Observation de spectres d'absorption

La spectrométrie d'absorption dans le domaine de l'UV-visible est une technique très utilisée en chimie analytique, notamment pour les dosages d'espèces colorées en solution. La couleur d'un corps ou solution colorée en transmission (transparence) représente sa capacité à absorber certaines longueurs d'onde. L'absorption d'une longueur d'onde λ par une espèce colorée est modélisée par la loi de **Beer-Lambert** qui s'exprime par :

$$I = I_0 10^{-\epsilon l C} \text{ ou encore } A_\lambda = -\log(I/I_0) = \epsilon l C$$

- I / I_0 est la **transmittance** de la solution (sans unité).
- A est l'**absorbance** (ou densité optique DO) à une longueur d'onde λ (sans unité).
- ϵ est le coefficient d'extinction molaire, exprimée en $l \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Il dépend de la longueur d'onde, la nature chimique de l'entité et la température.
- l est la longueur du trajet optique dans la solution (épaisseur de la cuve en cm).
- C est la concentration de la solution (en mol.l^{-1}).

Application : Utilisation du dispositif Spectra-Ovio couplé au logiciel VisualSpectra. Le dispositif est réalisé en assemblant la source lumineuse, le support d'échantillon et le détecteur.

*Appuyer sur **Start** pour activer la détection*

1. Enregistrement du "Noir" pour correction de ligne de base:

Mettre la lumière sur off et cliquer sur Noir (icône "lune" à gauche)

2. Enregistrement du "Blanc" pour courbe de référence :

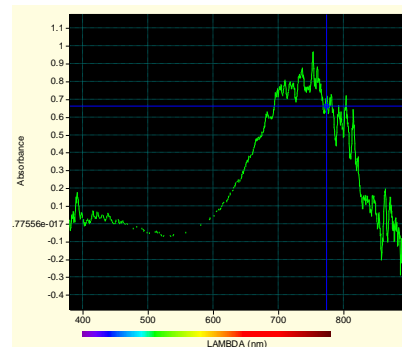
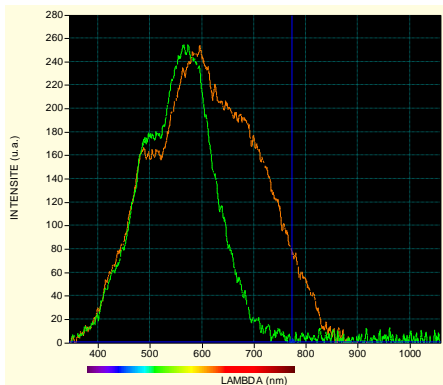
Mettre la lumière sur "on" et placer une cuve remplie d'eau dans le porte échantillon et cliquer sur "Blanc" (icône "soleil" à gauche)

3. Cliquer sur le bouton "-Noir" à droite pour supprimer la ligne de base

Spectres d'absorption de solutions colorées : solution de CuSO_4 :

On observe ci-dessous le spectre d'absorption d'une solution de sulfate de cuivre. On constate que les radiations dans le rouge sont absorbées alors que le reste du spectre est transmis. Le logiciel permet de calculer l'**absorbance** (ou densité optique) en effectuant (cliquer sur le mode Absorption) : $A(\lambda) = -\log[\{S(\lambda)-D(\lambda)\}/\{R(\lambda)-D(\lambda)\}]$

$S(\lambda)$: spectre de la solution colorée, $D(\lambda)$: spectre du "noir", $R(\lambda)$: spectre de la courbe de référence "blanc"



Gauche : spectre de référence (rouge) obtenu avec une cuve remplie d'eau et spectre d'une solution de CuSO_4 (vert). **Droite:** Absorbance de la solution de CuSO_4 .

On pourra vérifier la loi de Beer-Lambert en montrant que l'absorbance est proportionnelle à la concentration de la solution. D'autres solutions colorées pourront être étudiées (KMnO_4 , ..) ainsi que des filtres colorés.

Quelques expériences autour du thème

« Appareil photo numérique / Images numériques »

Extrait du BOEN

NOTIONS ET CONTENUS	COMPETENCES ATTENDUES
Appareil photographique : mise au point, ouverture, temps de pose Angle de champ, grandissement Profondeur de champ	- Illustrer expérimentalement le principe de mise au point automatique - Illustrer expérimentalement l'effet du diaphragme d'ouverture sur la profondeur de champ
Photographie numérique : Photo détecteurs Sensibilité de quelques capteurs à l'éclairement	- Mettre en oeuvre expérimentalement une photodiode ou un phototransistor - Expliquer le principe des capteurs photosensible CCD d'un appareil photographique numérique - Réaliser une activité expérimentale pour relier l'éclairement reçu par un capteur et la grandeur électrique mesurée.

1/ Principe de l'autofocus d'un APN :

L'autofocus est un système capable de détecter la netteté de l'image et de commander le déplacement de lentilles afin de réaliser la mise au point de façon automatique. Pour illustrer son principe, prendre 2 photos dans les mêmes conditions sauf de mise au point : une image nette et une image floue. Les images ci-dessous ont été prises avec une webcam, visualisées avec le logiciel ImageJ et sauvegardées. Sauvegarder une image nette et une image floue d'un objet présentant une variation de contraste important.



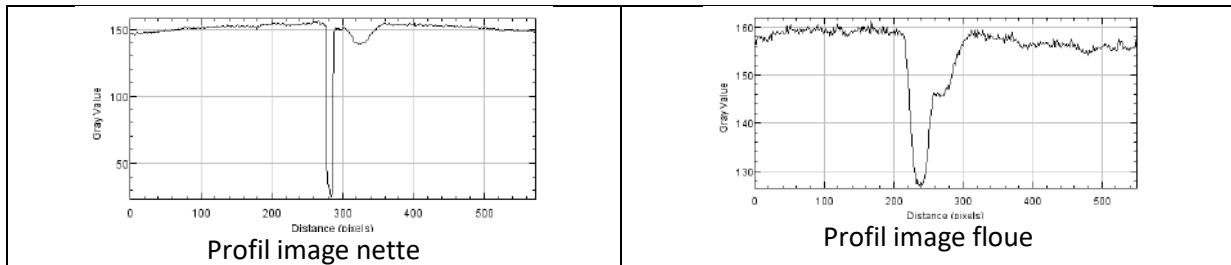
Traitement des images avec le logiciel ImageJ :

Méthode de la détection de contraste :

- Choisir un cadre rectangulaire similaire dans chaque image et aller dans **Analyse -> Measure**

	Area	Mean	Min	Max
Image1	42333	139.393	1	176
Image2	39480	149.341	85	174

Cela permet de rechercher les niveaux de gris extrêmes dans chaque cadre. Une image nette correspond à un différentiel le plus élevé entre le plus bas niveau de gris et le niveau de gris le plus élevé. En effet, les niveaux de gris seront plus nivelés pour une image floue que pour une image nette. Une autre analyse possible est liée à la variation locale de niveau de gris. Pour une photo nette les variations sont beaucoup plus grandes que pour une photo floue. Choisir un cadre autour de la tige et aller dans **Analyse -> Plot profile** pour visualiser le profil dans chaque image.



2/ Effet du diaphragme d'ouverture sur la profondeur de champ

On définit la **profondeur de champ** comme la **zone de l'espace objet** donnant des images nettes pour l'œil.

Le dispositif expérimental est le suivant. On dispose 2 objets dans des plans différents : ici l'un est directement dessiné sur un papier diffusant (Objet 1 = « tête ») et l'autre est une tige de métal (Objet 2 : « nez »). On utilise un objectif (muni d'une bague permettant de choisir l'ouverture du diaphragme) muni d'un papier calque qui permet de visualiser l'image des objets. Pour montrer les images (qui sont de petites dimensions), on utilise le vidéomicroscope connecté à l'ordinateur.

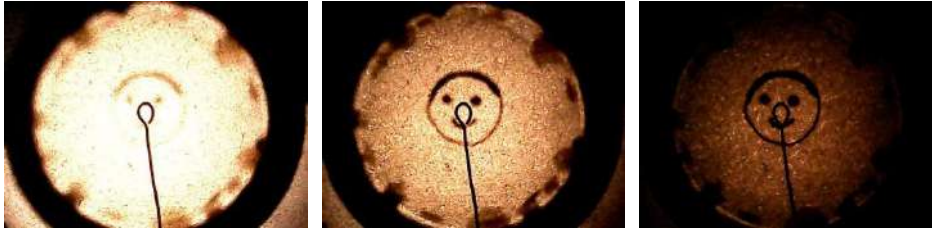
Objet 1= « tête » sur papier diffusant Objet 2= « nez » Objectif photo + support avec calque Vidéo microscope



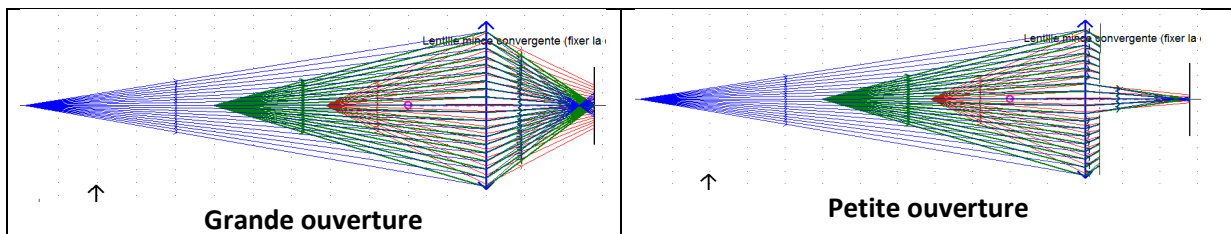
Faire la mise au point sur la « tête » avec une grande ouverture et fermer progressivement le diaphragme. Observer l'apparition progressive du « nez » qui démontre que **la profondeur de champ est d'autant plus grande que l'ouverture est petite**.



On peut évidemment réaliser la manip en commençant par une mise au point sur le « nez »



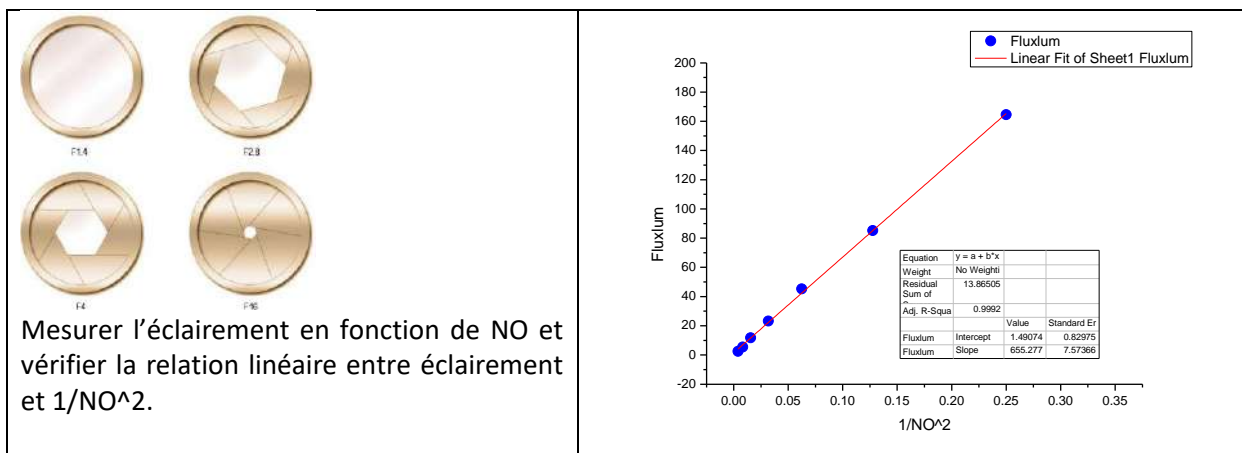
Explication : Avec une grande ouverture, si le capteur CCD est placé sur l'image de l'objet B, les images de A et C se situent respectivement devant et derrière le capteur et apparaissent floues. On a dans ce cas une faible profondeur de champ. Pour augmenter la profondeur de champ, il faut supprimer les rayons externes du faisceau de lumière diminuant le diaphragme d'ouverture. Dans ce cas les 3 objets apparaissent nets (voir illustration ci-dessous obtenue avec le logiciel « optgé ». Note : En diminuant le diamètre du diaphragme (augmentant le nombre d'ouverture NO), on devra augmenter la durée d'exposition pour capter la même quantité de lumière.



3/ Eclairage et nombre d'ouverture :

On peut utiliser le même dispositif que précédemment en remplaçant le papier calque « écran » par un luxmètre afin de mesurer l'éclairement en fonction du Nombre d'Ouverture NO. On utilise l'objet 1 (en effaçant la « tête ») qui permet d'éclairer la totalité du détecteur de façon homogène. On rappelle la définition de NO :

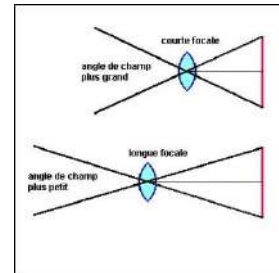
NO = f'/D où f' est la focale de l'objectif et D le diamètre d'ouverture. Les différents nombres d'ouverture possible pour un objectif donné sont gravés sur la bague de l'objectif. Par construction, ces valeurs suivent une suite géométrique de raison racine de 2 : 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22. De cette façon la surface diminue d'un facteur 2 à chaque pas.



On vérifie ainsi que l'éclairement est proportionnel à la surface du diaphragme d'ouverture.

4/ Angle de champ :

L'angle de champ est lié à la valeur de la focale utilisée et à la taille de la surface sensible (capteur ou pellicule). Une courte focale (objectif grand angle) fournira un grand angle de champ, alors qu'une longue focale (téléobjectif) donnera au contraire un angle de champ faible.



Pour illustrer et mesurer cette grandeur, rassembler les éléments suivants :

- lampe type « mandarine » qui éclaire le tableau blanc = objet (voir photo 1)
- 2 lentilles identiques de focale $f'=12.5\text{cm}$
- un écran muni d'une feuille blanche sur laquelle vous aurez préalablement dessiné un rectangle modélisant la taille du capteur (par exemple $24 \times 32 \text{ mm}$).

Faire l'image de l'objet sur l'écran en centrant celle-ci sur le rectangle dessiné (voir photo2).

Calculer l'angle de champ défini par :

$$\alpha = 2\text{arctg}\left(\frac{d}{2f'}\right)$$

d étant la dimension du capteur (horizontale ou verticale).

Vous pouvez expérimentalement observer l'effet de :

- la taille du capteur sur le champ observé (pour un même objectif). En réduisant la taille du capteur, on réduit le champ.
- la focale (pour un même capteur fictif). Accoler la deuxième lentille sur la première, on divise ainsi la focale d'un facteur 2. Observer l'augmentation du champ observé.



Photo 1 : lampe = objet

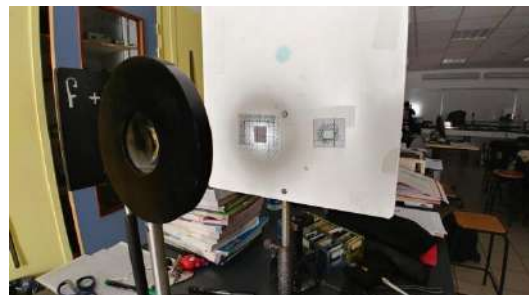
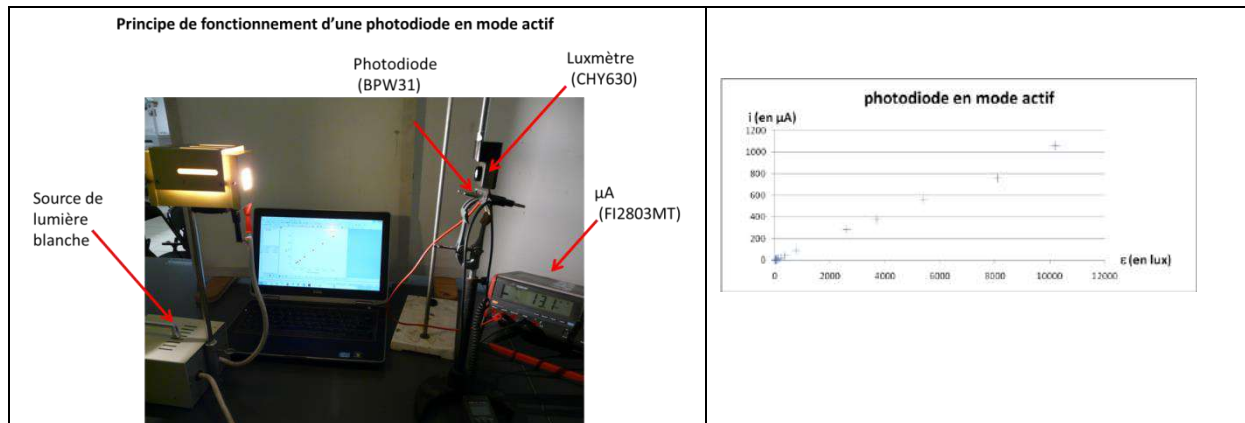


Photo 2 : image de l'objet sur un écran avec dessin de 2 capteurs de taille différente

5/ Fonctionnement d'un capteur CCD :

a/ Principe de fonctionnement d'une photodiode :

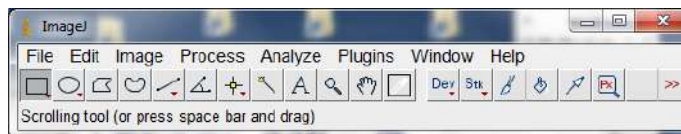
Un capteur CCD est constitué d'une matrice de photosites, chacun correspondant à une photodiode. Aussi, pour illustrer le principe de fonctionnement d'un capteur CCD, nous allons utiliser une photodiode unique en mode actif. Réaliser le montage ci-dessous en mettant dans un même plan une photodiode (BPW31) reliée à un μ ampèremètre et un luxmètre qui permet de mesurer l'éclairement lumineux. Eloigner progressivement la source lumineuse et mesurer l'éclairement et le courant de diode. Vérifier la linéarité entre ces 2 grandeurs.



a/ Linéarité du capteur d'APN (ici Nikon S1, NEF (RAW) : 12 bits) :

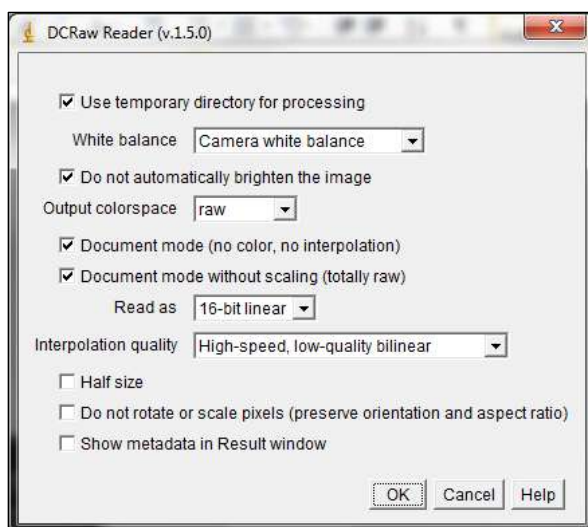
Prendre plusieurs photos d'un écran blanc éclairé le plus uniformément, avec ouverture et ISO identiques, en changeant seulement le temps d'exposition, de préférence en prenant ; 1 " , 1/2 , 1/4 , 1/5 , 1/10 , 1/20 , 1/40 , 1/80 , 1/160 , 1/320 , 1/640 , 1/1250 par exemple. Protocole : Prendre une photo (du texte noir et blanc suffit) en mode automatique, repérer les valeurs ISO, Ouverture et Temps d'exposition= T_0 . Passer en mode Manuel , fixer ISO et Ouverture, prendre les photos successivement avec les Temps $T_0/8$, $T_0/4$, $T_0/2$, T_0 , T_0*2 , T_0*4 , T_0*8 , (ou bien un T_0 voisin de T_0 qui permet les $T/2n$ et $T*2n$).

Ouvrir ImageJ (doit avoir le plugin RCRaw Reader, sinon, l'installer avant)



Plugins-> Input-Output -> DCRaw Reader

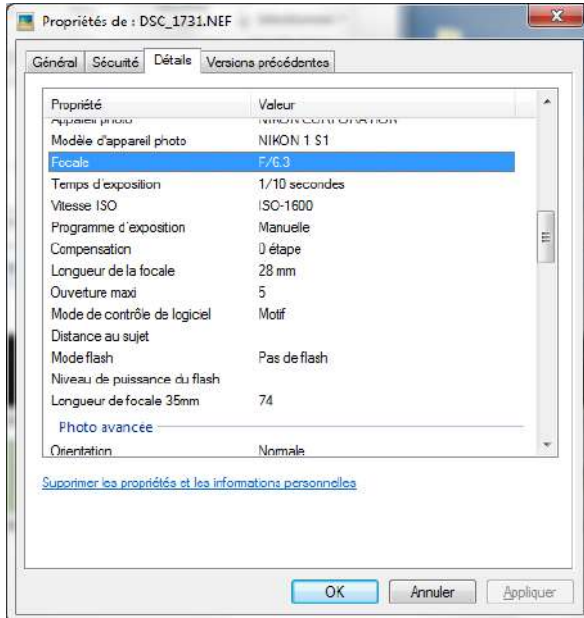
Choisir le fichier... puis valider les options



On obtient une image en niveau de gris, avec les blancs maxi (ou saturés) à 4095 (capteur 12bits)
ATTENTION IL FAUT IMPERATIVEMENT « 16-bit linear » et NON « 16-bit »

Il est préférable d'utiliser les fonctions **Process-> Filters -> Mean** (avec 8 pixels par exemple) pour avoir une moyenne de la valeur des pixels autour d'une même position du curseur sur l'image,

Lire les données EXIF avec clic droit sur le fichier dans l'explorateur et noter les valeurs des paramètres : ouverture, temps d'exposition, ISO



(Avec les erreurs de traduction : Focale pour ouverture, vitesse ISO pour Sensibilité ISO)

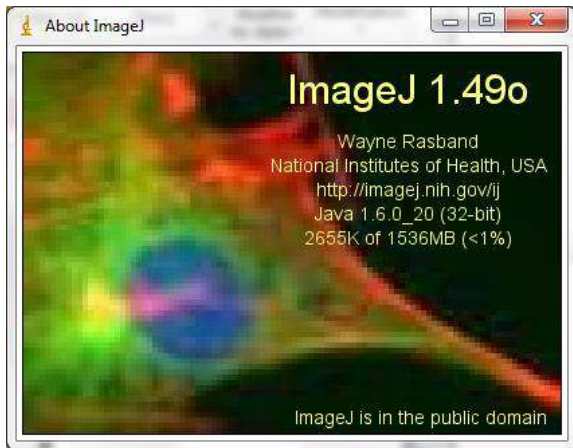
En pointant toujours le même zone uniforme d'une photo (zone écran BLANC), on note le niveau (value) affiché dans le coin gauche de l'appli ImageJ.

Recommencer pour chaque fichier..... On peut ainsi vérifier la linéarité du capteur de l'APN.

N°image	ISO	F/	T 1/	v
1737	1600	6.3	3200	
1738	1600	6.3	1600	
1739	1600	6.3	800	
1740	1600	6.3	400	
1741	1600	6.3	200	
1742	1600	6.3	100	
1743	1600	6.3	50	
1744	1600	6.3	25	
1745	1600	6.3	10	

Résultats obtenus avec et DCRaw 1.5.0

Si le fichier raw n'est pas disponible ou pas lisible (absence de DCRaw par exemple), on peut suivre le même protocole. Mais avec une imageRGB24bits (3 x8bits), la dynamique va de 1 à 255 au lieu de 1 à 4096, il sera difficile de faire 7 photos...



Références :

- Duffait R. Expériences de physique (Bréal 2008)
- Bellier J-P., Bouloy C., Guéant D. Montages de physique au CAPES (Dunod 2007)
- Livres de Physique Term. S, Term. STI2D.

Programmes du lycée :

<p>Seconde la pratique du sport et l'univers Relativité du mouvement. Référentiel. Trajectoire. Mesure d'une durée ; chronométrage. Actions mécaniques, modélisation par une force. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps : modification de la vitesse, modification de la trajectoire. Rôle de la masse du corps. Principe d'inertie. Première S comprendre Énergie d'un point matériel en mouvement dans le champ de pesanteur uniforme : énergie cinétique, énergie potentielle de pesanteur, conservation ou non conservation de l'énergie mécanique. Term. S Comprendre Temps, cinématique et dynamique newtoniennes Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs position, vitesse et accélération. Référentiel galiléen.</p>	<p>Lois de Newton : principe d'inertie, $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ et principe des actions réciproques. Première STI2D et STL transport Référentiels, trajectoires, vitesse, vitesse angulaire, accélération. Énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation. Énergie cinétique d'un solide en mouvement de rotation ; moment d'inertie d'un solide par rapport à un axe. Énergie potentielle de pesanteur. Énergie potentielle élastique. Énergie mécanique. Terminale STI2D et STL transport Actions mécaniques : forces, moment de force, couples et moment d'un couple. Transfert d'énergie par travail mécanique (force constante ; couple constant).</p>
--	--

I. Illustration des lois de Newton

- I.1. Chutes libres
- I.2. Table à mobiles autoporteur

II. Solide mobile autour d'un axe

- II.1. Rappels
- II.2. Étude statique
- II.3. Étude dynamique

I. Illustration des lois de Newton

I.1. Chutes libres

Trajectoire – Équations du mouvement

Un objet de masse m , soumis à son seul poids ($P = mg$) est lâché d'un point O avec une vitesse initiale comportant une composant horizontale (axe x) et une composante verticale (axe y). D'après la relation fondamentale de la dynamique, on obtient un mouvement dans le plan (x, y) dont les équations des projections sur les axes selon les vecteurs unitaires \vec{u}_x et \vec{u}_y , sont données par :

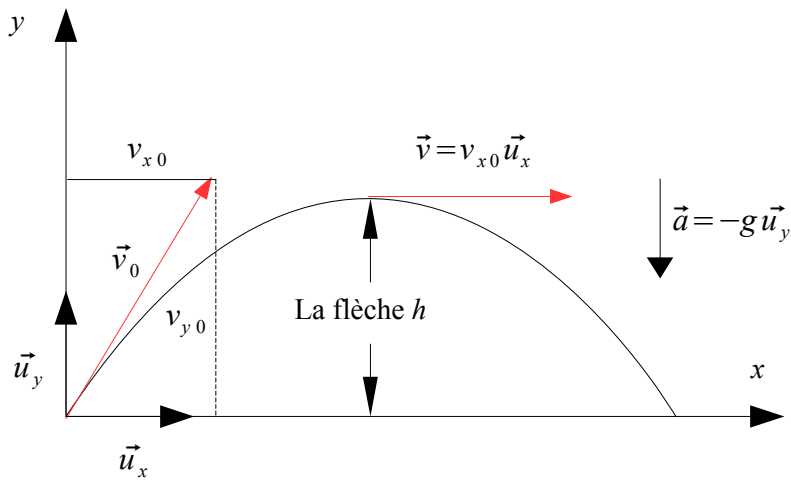
Selon l'axe vertical :

- ✓ L'accélération a_y , constante, négative :
 $a_y = dv_y/dt = -g$;
- ✓ La vitesse v_y , donnée à un instant t en intégrant l'accélération :
 $v_y = dy/dt = -g \cdot t + v_{y0}$;
- ✓ La position y , donnée à un instant t en intégrant la vitesse :
 $y = \int v_y \cdot dt = -\frac{1}{2} g \cdot t^2 + v_{y0}t + y_0$ (i)

Selon l'axe horizontal :

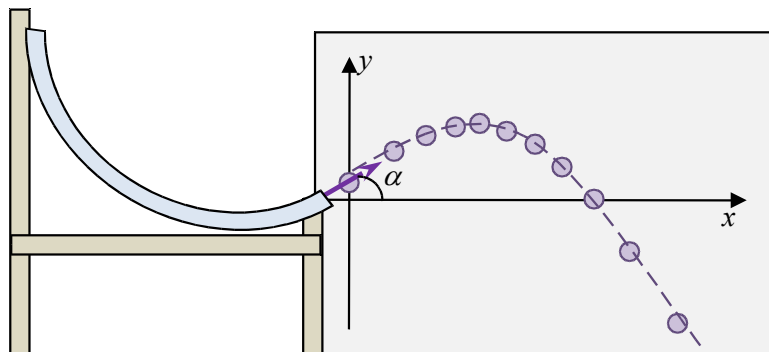
- ✓ L'accélération a_x , nulle :
 $a_x = dv_x/dt = 0$;
- ✓ La vitesse v_x , donnée à un instant t en intégrant l'accélération :
 $v_x = dx/dt = v_{x0}$;
- ✓ La position x , donnée à un instant t en intégrant la vitesse :
 $x = \int v_x \cdot dt = v_{x0}t + x_0$ (ii)

La trajectoire dans le plan (O, x, y) , obtenue à partir de (i) et (ii), est une parabole :
 $y = a x^2 + b x + c$. On note que x, y, v_x, v_y et a sont indépendantes de la masse m .



Montage

L'objet (billes de différentes matières et de divers diamètres) roule dans un tuyau monté sur un support orienté de façon à lui donner une vitesse oblique vers le haut en sortie du tube. Il suit alors une trajectoire parabolique devant un écran.



Une « webcam » est placée en face de l'écran et enregistre le mouvement. Ces enregistrements sont ensuite traités numériquement par le logiciel Atelier Scientifique (Généris). On peut également recopier les valeurs et faire les traitements (modélisation, calculs) à l'aide du logiciel Excel.

- ✓ Faire plusieurs enregistrements avec la même bille (au moins 3), en conditions identiques ;
- ✓ Après chaque mesure, effectuer la modélisation ; reporter les valeurs x , y , t mesurées et la courbe obtenue en mode modélisation, avec ses paramètres, sur l'onglet « compte-rendu » qu'on fait ensuite imprimer.
- ✓ D'après les mesures de x et t , calculer la vitesse horizontale $v_x \pm \Delta v$; est-elle constante ?
- ✓ Donner la valeur de g obtenue par ces mesures ; commenter l'incertitude et la dispersion des résultats.
- ✓ Déterminer, d'après les paramètres de modélisation, les valeurs de v_0 et α ;
- ✓ Mesurer approximativement l'angle α d'inclinaison de la rampe de lancement à sa sortie ; comparer ces 2 valeurs de α .

Influence des paramètres de l'objet

On dispose de plusieurs billes, de tailles et matières différentes.

- ✓ Faire plusieurs lancers, pour une autre bille (au moins 3 mesures) ;
- ✓ Peser les différentes billes utilisées et mesurer leur diamètre au pied à coulisse.

Porter les résultats en tableau :

- ✓ Observe-t-on une influence de la masse ? du diamètre ? est-ce logique ?

I.2, Table à mobiles autoporteur

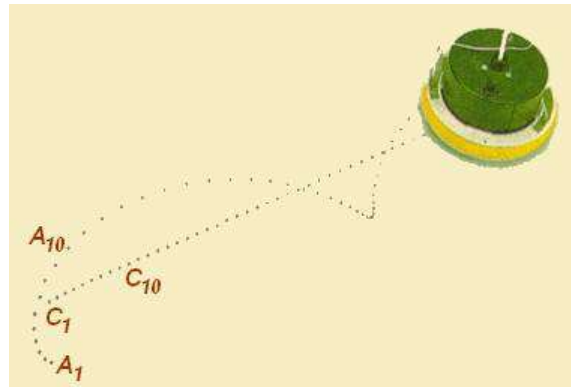


Sur la table on place un papier conducteur (« papier carbone ») et un papier blanc pour chaque expérience. Les mobiles sont reliés à un générateur qui permet d'assurer l'alimentation des souffleries et de produire les étincelles nécessaires au marquage du papier. L'intervalle constant de temps entre deux étincelles peut être fixé à 20, 40 ou 60 ms.

Mouvement du centre d'inertie et test du dispositif

Régler l'horizontalité de la table à l'aide d'un niveau à bulle. Parfaire le réglage en plaçant un mobile au centre de la table. Il doit évidemment rester immobile.

Placer sur l'un des mobiles la bague comportant une électrode. La bague doit être placée selon les encoches longues et l'électrode doit être tournée vers le papier. Brancher l'alimentation haute tension sur l'électrode centrale et l'électrode périphérique. Ceci permet de repérer la trajectoire du centre d'inertie du solide (électrode centrale) et d'un point situé sur sa périphérie (électrode périphérique). Lancer le mobile en le faisant tourner. Commenter l'enregistrement obtenu : trajectoire particulière d'un point particulier (le centre d'inertie), mouvement de l'autre point (rotation).



Faire un relevé de la vitesse de la trace du centre d'inertie au début et à la fin de l'enregistrement. En déduire une incertitude globale sur la détermination des vitesses (incertitude due à la qualité des traces, incertitude due à la présence de frottements ou autres forces parasites liées aux fils).

La détermination de la vitesse au point A_n où se trouve le centre d'inertie du mobile à l'instant t , peut se faire à partir de la formule :

$$\vec{V}_n(t) = \frac{A_{n-1} \vec{A}_{n+1}}{2 \delta t}$$

où δt est l'intervalle de temps séparant deux étincelles. On confond alors la vitesse instantanée avec la vitesse moyenne entre $t - \delta t$ et $t + \delta t$.

Collisions à deux dimensions

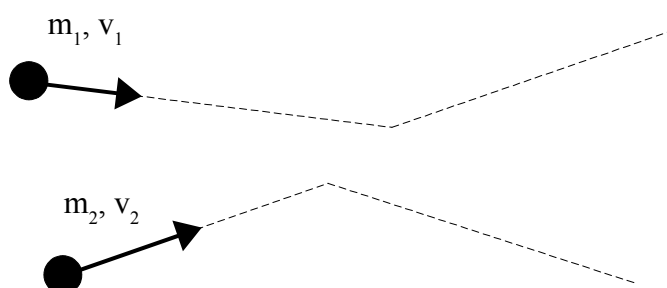
L'objectif est ici d'étudier la conservation de la quantité de mouvement totale lors d'une collision (le mot désignant aussi bien un choc avec contact qu'une interaction à distance, répulsive ou attractive).

Dans certains cas de collisions élastiques on peut aussi chercher à vérifier la conservation de l'énergie *via* la comparaison des énergies cinétiques avant et après l'interaction.

Dispositif et relevé de mesures

Le dispositif repose sur l'utilisation des deux mobiles munis de colliers permettant, suivant les cas, une répulsion magnétique (colliers à aimants), un choc élastique avec ressort (collier à ressorts) ou un accrochage (collier à bandes adhésive).

Vérifier l'horizontalité de la table et réaliser une collision en lançant les deux mobiles selon des trajectoires qui vont se recouper. On peut aussi envisager le cas où l'un des mobiles vient heurter l'autre qui est initialement immobile.



Analyse 1 : quantité de mouvement avant et après, somme des quantités de mouvement.

Repérer les points de chacun des mobiles correspondant à des dates identiques.

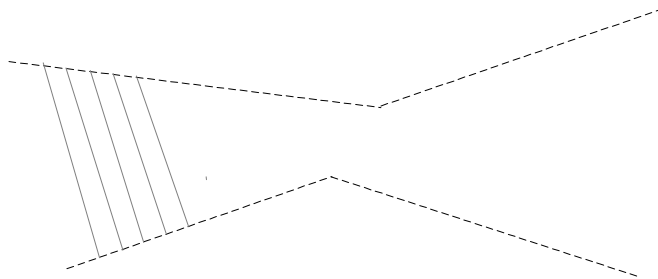
Déterminer la vitesse de chaque mobile avant le choc. Calculer et tracer le vecteur quantité de mouvement de chaque mobile avant le choc. Tracer le vecteur somme .

Utiliser la même méthode pour la détermination de la quantité de mouvement totale après le choc. Comparer les résultats.

Analyse 2 : Quantité de mouvement totale et mouvement du centre d'inertie.

Par définition du centre d'inertie, la quantité de mouvement du système n'est autre que la quantité de mouvement du centre d'inertie affecté de la masse totale. En conséquence si la quantité de mouvement totale est conservée, le mouvement du centre d'inertie doit être rectiligne uniforme.

Tracer les segments qui joignent les positions simultanées des deux mobiles. Placer le centre d'inertie (au milieu des segments si les deux mobiles ont même masse). Montrer que la trace ainsi obtenue correspond bien à un mouvement rectiligne uniforme.



Désintégration

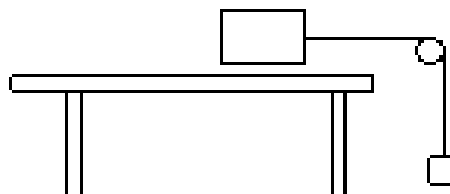
Deux mobiles munis de colliers à ressorts sont serrés l'un contre l'autre à l'aide d'un fil. On brûle le fil. Calculer la quantité de mouvement totale après la désintégration. Commentaire.

Application : Recul d'un fusil après le tir d'une balle.

Mouvement rectiligne uniformément accéléré

Dispositif et relevé de mesures

La table est horizontale. Entourer un mobile d'une cordelette passant sur une poulie fixée au bord de la table. Accrocher une masse de quelques grammes. Mettre en route le mobile autoporteur et le lâcher sans vitesse initiale (l'autre mobile autoporteur étant sur le papier pour fermer le circuit).



Analyser la trace obtenue ; montrer que l'accélération est constante au cours du mouvement et de valeur

$$a = g \frac{m}{m + M} \quad (\text{où } M \text{ désigne la masse du mobile et } m \text{ la masse accrochée}).$$

Suggestion d'analyse avec Regressi ou Latis

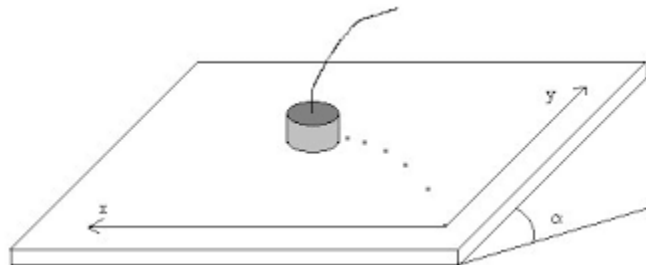
Relever les coordonnées (x_i) des points successifs de la trajectoire en prenant comme origine le point de départ du mobile ; entrer ces coordonnées dans une colonne puis remplir une deuxième colonne avec les dates à l'aide d'une expression du type $i \cdot \delta t$ (où i désigne le numéro de la mesure et δt l'intervalle de temps choisi entre deux étincelles). Définir la grandeur dérivée v (vitesse). Tracer $v_i(t_i)$ et modéliser les résultats.

On peut alors également vérifier simplement la conservation de l'énergie mécanique du système ($M+m$).

Mouvement parabolique : table inclinée

Manipulation

Incliner la table d'un angle α en glissant d'un côté de la table une cale d'épaisseur connue (la mesurer). Bien positionner le papier de façon que l'un de ses côtés soit bien parallèle à la ligne de plus grande pente. Sans déplacer le papier, effectuer un lancer à partir du bas de la table de façon à obtenir une trajectoire parabolique. (on peut aussi effectuer un premier lâcher du mobile sans vitesse initiale, de la partie haute de la table pour obtenir une trace de la ligne de plus grande pente).



Analyse

L'analyse de l'enregistrement est fastidieuse et source de nombreuses incertitudes si l'on procède par détermination progressive des valeurs successives de la vitesse puis de celles de l'accélération. L'expérience peut très bien être présentée avec l'objectif de vérifier que les mouvements selon l'axe horizontal (Ox) et l'axe de plus grande pente (Oy) sont indépendants, le premier étant uniforme et le second uniformément varié.

Dès lors le protocole est simple. Vérifier que la vitesse selon l'axe horizontal est constante, c'est vérifier que les projections des différents points de la trajectoire sur cet axe (les abscisses) sont équidistantes. Vérifier que le mouvement est uniformément varié selon l'axe de plus grande pente, c'est montrer que les projections selon cet axe (les ordonnées) correspondent à un mouvement uniformément décéléré (phase ascendante) ou accéléré (phase descendante) ; ce qui est le cas traité précédemment. Vérifier que l'accélération a est bien compatible, compte tenu des incertitudes sur a et $\sin \alpha$, avec la relation $a = g \sin \alpha$. Pour cette analyse on peut utiliser un des logiciels disponibles.

II. Solide mobile autour d'un axe fixe

Objectifs

Le but de cette partie est de mettre en évidence les différents paramètres intervenant dans l'équilibre puis dans le mouvement d'un solide lorsque celui-ci est contraint par des forces de liaison à se mouvoir autour d'un axe. On se limitera aux cas de solides supposés indéformables. Autre simplification dans cette dernière partie : on négligera l'effet de frottements sur le solide en mouvement, les poulies, etc.

On montrera expérimentalement que la somme des moments (par rapport à l'axe) des forces qui sont appliquées au solide contrôle son accélération angulaire autour de l'axe. Les concepts/grandeurs importants sont donc: moments d'une force, moment cinétique, vecteur rotation, moment d'inertie, le théorème du moment cinétique.

II.1. Rappels

Moment d'une force

Soit un point M. Le moment \vec{M}_O d'une force \vec{F} appliquée en M par rapport à un point O est (figure 1) :

$$\vec{M}_O = \vec{OM} \wedge \vec{F}$$

C'est un vecteur perpendiculaire au plan (OM, F) de module :

$$M_O = OM \times F \sin \alpha$$

Le moment M_Δ par rapport à un axe Δ passant par O est alors $M_\Delta = \vec{M}_O \cdot \vec{k} = M_O \cos \theta$ où $\vec{k} \in \Delta$ est un vecteur unitaire.

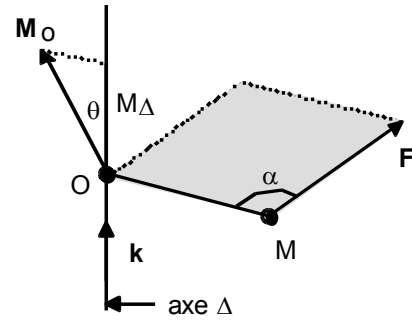


Figure 1

Cinématique

Le champ des vitesses dans le solide est :

$$\vec{v}_M = \vec{\omega} \wedge \vec{OM}$$

M est un point quelconque du solide et O un point quelconque de l'axe Δ .

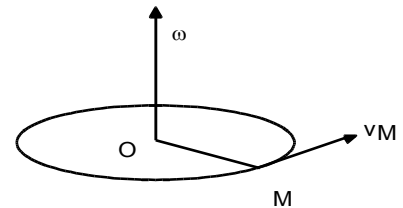


Figure 2

Dynamique

En général, pour un solide en rotation autour d'un axe fixe ($\vec{\omega} = \omega \vec{k}$), le moment cinétique \vec{L}_O n'est pas colinéaire à Δ (figure 3).

La relation entre \vec{L}_O et $\vec{\omega}$ est $\vec{L}_O = [\mathbf{J}] \vec{\omega}$ où $[\mathbf{J}]$ est la matrice d'inertie au point O.

- Le moment cinétique L_Δ par rapport à l'axe Δ s'exprime par :

$$L_\Delta = \vec{L}_O \cdot \vec{k} = J_\Delta \omega \quad \text{avec} \quad J_\Delta = \iiint_{\text{volume}} r^2 dm \quad \text{moment d'inertie du solide par rapport à l'axe } \Delta.$$

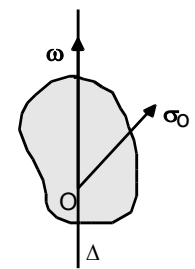


Figure 3

- J_Δ (aussi notée I_Δ) est une grandeur extensive : le moment d'inertie d'un système formé de plusieurs parties est la somme des moments d'inertie de chacune des parties.

- Soit G le centre de masse du solide. Pour tout axe D, $I_\Delta = I_{D_G} + M d^2$ où D_G est l'axe parallèle à D passant par G et d la distance entre D_G et D (théorème de Huygens).

- Le rayon de giration par rapport à l'axe est la longueur R_D tel que $I_\Delta = M R_D^2$ c'est la distance à l'axe à laquelle il faudrait concentrer toute la masse M pour que le point matériel ainsi obtenu ait le même moment d'inertie par rapport à D.

- Le théorème du moment cinétique en projection sur l'axe de rotation exprime l'équation du mouvement du solide en rotation autour d'un axe Δ fixe :

$$\frac{dL_\Delta}{dt} = I_\Delta \dot{\omega} = I_\Delta \ddot{\theta} = \sum_i M_\Delta (F_i^{ext})$$

Si la somme des moments est nulle, on en déduit que $\omega = Cte$ et $\theta = \omega t$.

Si $\omega = Cte \neq 0$, on a un mouvement de rotation uniforme ; si $\omega = 0$ on a l'équilibre.

Équilibre

- Si un solide (ou un système de solides) est en équilibre dans un référentiel galiléen (R), alors le torseur des forces extérieures du système est équivalent à zéro :

$$\sum_i \vec{F}_i^{ext} = \vec{0} \quad \text{et} \quad \forall O, \sum_i \vec{M}_O(\vec{F}_i^{ext}) = \vec{0}$$

II.2. Étude statique

Moment d'une force par rapport à un axe : expérience qualitative

On réalise ici une série d'expériences qualitatives illustrant la notion de moment d'une force.

La force \vec{F} étant créée avec la main, on procède de la façon suivante (figure 4). *Il n'y a aucune rotation si :*

- 1 • la force \vec{F} est nulle ;
- 2 • la direction de la force passe par l'axe Δ (\vec{F} appartient au plan du disque);
- 3 • le point d'application de \vec{F} est sur l'axe Δ ($OM = 0$) ;
- 4 • \vec{F} est parallèle à l'axe Δ

Il y a une rotation si : le point d'application de \vec{F} est dans le plan du disque (ou de la porte) et la direction de \vec{F} est quelconque. Le sens de la rotation dépend de sens de \vec{F} .

Elle est d'autant plus « facile » que le point d'application est plus éloigné de l'axe Δ et que la direction de \vec{F} est perpendiculaire à l'axe Δ .

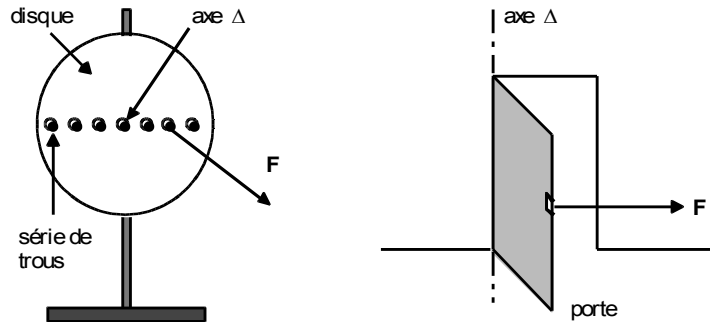


Figure 4

Théorème des moments

Dans un repère galiléen, la condition nécessaire pour qu'un solide mobile autour d'un axe fixe soit en équilibre est que la somme des moments par rapport à un axe Δ des forces qui lui sont appliquées soit nulle :

$$\forall \Delta, \sum_i M_{\Delta}(\vec{F}_i^{ext}) = 0$$

Le matériel proposé (figure 5) permet une vérification immédiate du théorème des moments ; en effet, en tournant la règle graduée, on mesure directement les bras de levier. On peut de même déplacer facilement les poulies (grâce aux aimants) ainsi que les fiches (grâce aux nombreux trous percés sur le solide).

- On vérifie que le solide est équilibré avant l'accrochage des masses.
- On choisit un sens positif, puis, sachant que $\vec{F}_{1,2} = m_{1,2} \vec{g}$ on en déduit :

$$M_{\Delta}(\vec{F}_1) = -\|\vec{F}_1 \wedge \vec{OA}_1\| = -m_1 g OA_1 \sin \theta_1 = -m_1 g d_1$$

$$M_{\Delta}(\vec{F}_2) = \|\vec{F}_2 \wedge \vec{OA}_2\| = m_2 g OA_2 \sin \theta_2 = m_2 g d_2$$

Par suite :

$$\sum_i M_{\Delta}(\vec{F}_i^{ext}) = 0 \Rightarrow m_1 d_1 = m_2 d_2$$

On vérifie cette relation dans différents cas. On tracera $-M_{\Delta}(\vec{F}_1)$ en fonction de $M_{\Delta}(\vec{F}_2)$: c'est une droite de pente 1. NB : on se limite ici au cas où les forces sont dans le plan du disque. Naturellement, on peut utiliser trois masses marquées.

On vérifie cette relation dans différents cas. On tracera $-M_{\Delta}(\vec{F}_1)$ en fonction de $M_{\Delta}(\vec{F}_2)$: c'est une

droite de pente 1. NB : on se limite ici au cas où les forces sont dans le plan du disque. Naturellement, on peut utiliser trois masses marquées.

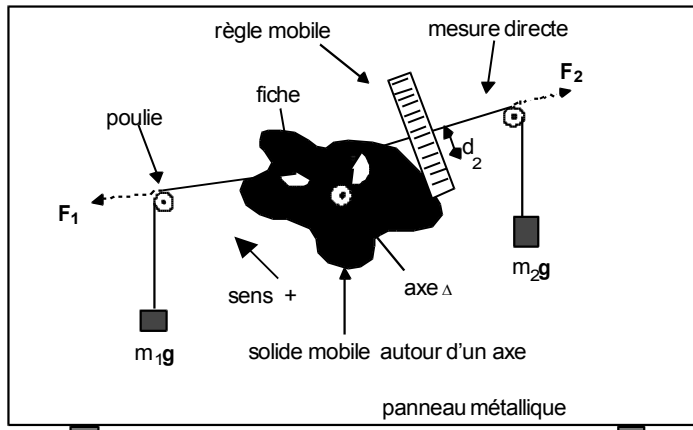


Figure 5

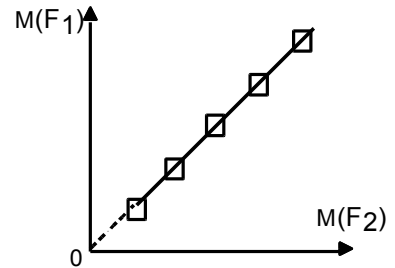


Figure 6

On veillera à présenter les résultats avec une incertitude de mesure $\Delta(M)$.

II.3. Étude dynamique

(Solide en rotation autour d'un axe fixe et soumis à une force de moment constant)

(Matériel distribué par Pierron)

On utilise une poulie à plusieurs gorges, mobile autour d'un axe vertical Δ sur lequel est fixé une tige comportant deux masselottes diamétralement opposées, de positions réglables.

On appelle :

M la masse des masselottes cylindriques de rayon r et de hauteur h

R le rayon de la poulie autour de laquelle la ficelle est enroulée

m la masse du corps qui provoque le mouvement

J_0 le moment d'inertie par rapport à Δ de l'ensemble sans masselotte

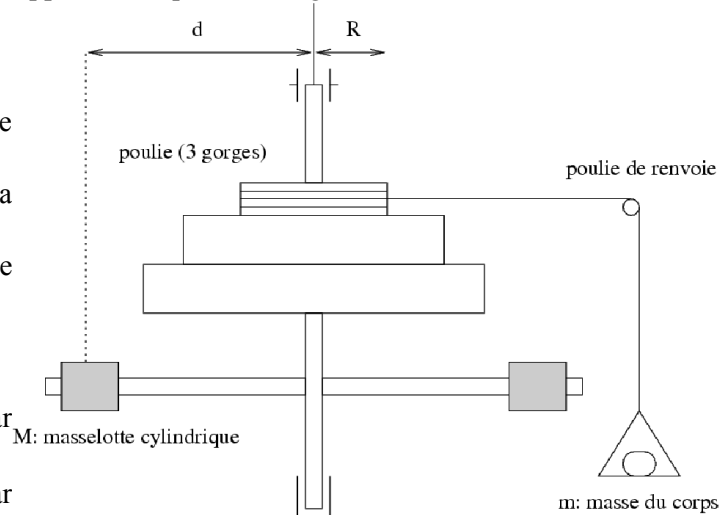
J_M le moment d'inertie d'une masselotte par rapport à Δ

J_G le moment d'inertie d'une masselotte par rapport à $\Delta_G // \Delta$ passant par le centre G d'une masselotte

T la tension du fil appliquée à la poulie de rayon R

d la distance entre Δ et le centre d'une masselotte;

n le nombre de tours effectués par la tige.



En négligeant la masse de la poulie de renvoi devant m , on peut montrer que l'accélération angulaire $\ddot{\theta}$ de l'équipage s'écrit:

$$\ddot{\theta} = \frac{mgR}{J_0 + 2J_M + mR^2} \text{ avec } J_M = J_G + Md^2 \text{ et } J_G = M \left(\frac{r^2}{4} + \frac{h^2}{12} \right)$$

pour les masselottes considérées.

Le solide étant soumis à la force \vec{T} de moment constant $M_{\Delta}(\vec{T}) = (J_O + 2J_M)\ddot{\theta}$

On mesure le temps mis pour faire n tours à l'aide d'un chronomètre ou d'un capteur optique.

On relie $\ddot{\theta}$ à n en écrivant que (vitesse initiale nulle) : $\theta = \frac{1}{2}\ddot{\theta}t^2 = 2\pi n$ d'où $\ddot{\theta} = \frac{4\pi n}{t^2}$

Vérification de la nature du mouvement

On commence par vérifier que le mouvement est bien uniformément accéléré. Pour cela, on trace alors : $n = f(t^2)$. On obtient une droite dont la pente permet de déduire l'accélération angulaire $\ddot{\theta}$.

Influence du moment de T par rapport à Δ sur l'accélération angulaire $\ddot{\theta}$

Pour chaque étude, on pourra faire une modélisation à l'aide de REGRESSI.

1. Influence de m :

Mesurer par exemple le temps mis pour faire 10 tours pour différentes valeurs de m ,

puis tracer $\frac{gt^2}{4\pi nR}$ en fonction de $\frac{1}{m}$. On obtient une droite de pente $\frac{J_O + 2J_M}{R^2}$.

2. Influence de d : Mesurer par exemple le temps mis pour faire 10 tours pour différentes valeurs de d ,

puis tracer $\frac{gt^2}{4\pi nR}$ en fonction de $\frac{d^2}{R^2}$. On obtient une droite d'ordonnée à l'origine $\frac{J_O + 2J_G}{mR^2} + 1$

3. Influence de R :

On pourrait éventuellement faire varier R ; cependant, étant donné que l'on ne dispose que de trois poulies, un graphique avec 3 points de mesure ne serait pas très démonstratif.

Détermination de J_O et J_G

En enlevant une des deux masselottes et en mettant l'axe Δ horizontal, on obtient un pendule pesant. Pour les faibles amplitudes, on peut montrer que la période s'écrit :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_{\Delta}}{gMd}} = 2\pi \sqrt{\frac{J_O + J_G + Md^2}{gMd}}$$

La mesure de T permet donc d'avoir une mesure de $J_O + J_G$; on peut ensuite déterminer séparément J_O et J_G en utilisant les mesures du b).

Références :

- Duffait R. Expériences de physiques (Bréal 2008)
- Bellier J-P., Bouloy C., Guéant D. Montages de physiques (Dunod 2004)
- Livres de Physique seconde, Term. S, Première. STI2D.

Programmes du lycée :

<p>Seconde Signaux périodiques : période, fréquence, tension maximale, tension minimale. Ondes sonores. Domaines de fréquences.</p> <p>Term. S Observer Ondes progressives. Grandeurs physiques associées. Retard. Ondes progressives périodiques, ondes sinusoïdales. Ondes sonores et ultrasonores. Analyse spectrale. Hauteur et timbre. Effet Doppler.</p> <p>Term S enseignement de spécialité Son et musique Instruments de musique : Instruments à cordes, à vent et à percussion. Instruments électroniques. Acoustique musicale ; gammes ; harmonies. Traitement du son.</p>	<p>Émetteurs et récepteurs sonores : Voix ; acoustique physiologique. Microphone ; enceintes acoustiques ; casque audio. Reconnaissance vocale. Son et architecture : Auditorium ; salle sourde. Isolation phonique ; acoustique active ; réverbération.</p> <p>Première STI2D et STL habitat Confort acoustique Ondes sonores et ultrasonores ; propagation. Puissance et intensité sonore ; niveau ; Transmission, absorption, réflexion.</p> <p>Santé Quelques outils du diagnostic médical. Onde ultra sonore - Transducteur ultrasonore.</p>
--	--

I. Ondes sonores et ultrasonores

- I.1. Nécessité d'un milieu matériel pour la propagation de l'onde
- I.2. Cavité résonnante
- I.3. Mesure de la vitesse d'une onde ; temps de propagation et longueur d'onde
- I.4. Interférences et diffraction, battements
- I.5. Effet Doppler

II. Analyse d'un son, acoustique musicale

- II.1. Mesure de l'intensité sonore
- II.2. Hauteur d'un son, échelle de fréquence et gamme musicale
- III.3. Composition spectral d'un son, timbre.

I. Ondes sonores et ultrasonores

I.1. Nécessité d'un milieu matériel pour la propagation de l'onde

Placer un buzzer sur de la mousse dans une cloche à vide. Faire le vide dans la cloche. Mesurer objectivement l'intensité sonore à l'aide d'un sonomètre, puis laisser l'air entrer dans la cloche et mesurer à nouveau l'intensité. Comparer. Conclure quant à la nécessité d'un milieu matériel pour la propagation d'une onde sonore.

I.2. Cavité résonnante

On fait vibrer un diapason au dessus d'un tube vertical ouvert rempli d'eau (longueur minimale 70 cm). On

fait baisser le niveau de l'eau lentement. Pendant que cela se produit, l'air dans le tube résonne avec le diapason lorsque la distance entre la surface de l'eau et l'ouverture du tuyau prend certaines valeurs. Repérer deux valeurs successives, en déduire la fréquence du diapason.

++ Tube de Kundt.

I.3. Mesure de la vitesse d'une onde ; temps de propagation et longueur d'onde

Propagation d'un clap sonore

Décalage temporel : Placer deux micros l'un derrière l'autre à au moins une vingtaine de centimètres de distance. Les relier à un oscilloscope numérique à mémoire en mode monocoup. Après avoir réglé le déclenchement sur le micro, mesurer la durée séparant les deux enregistrements de clap puis en déduire la valeur de la célérité du son dans l'air.

Propagation d'un signal en salves ou "burst"

Décalage temporel : utiliser le matériel ONDUSON en mode "salves". Montrer que la réponse du récepteur est en retard sur l'excitation de l'émetteur. En déduire une valeur de la célérité de propagation du son.

On peut également utiliser Latis Pro, et alimenter des émetteurs/récepteurs d'ondes ultrasonores en mode "burst". Pour cela, créer une variable permettant de générer un signal de sortie : un "burst" peut se fabriquer en multipliant un signal sinusoïdal haute fréquence par un créneau.

Réflexion d'un signal :

réflexion par une plaque métallique d'une salves d'ultrasons. Mesure du décalage temporel des deux signaux.

Remarque : le principe du sonar repose sur ce phénomène, mais la situation est "inverse" : connaissant la célérité, on en déduit la distance... (Application du télémètre à ultrason)

Propagation d'une onde sinusoïdale

Mesure de longueur d'onde par décalage/déphasage. Déduire la célérité du son.

Propagation du son dans l'eau

Utiliser le matériel Electrome : émetteurs et récepteur air/eau. En déduire la célérité du son dans l'air et dans l'eau. Discuter leur précision.

I.4. Interférences et diffraction, battements

Interférences à deux ondes

Avec le matériel ONDUSON Placer le boîtier de façon à pouvoir utiliser les deux émetteurs synchrones en mode "continu" et à montrer, en déplaçant le détecteur, que le signal passe par des minima. Mieux encore : se placer sur un minimum et montrer, en jouant sur les interrupteurs des sources, que la superposition de deux signaux donne un signal d'amplitude plus faible que chacun d'eux.

Avec 2 hauts parleurs, réaliser le même type d'expérience en alimentant les deux haut-parleurs avec le même générateur.

++ Trombone de König.

Diffraction

Avec une seule fente source, montrer qu'il existe un pic central d'intensité maximum, puis des minimums et maximums secondaires.

Battements

En utilisant un diapason et un générateur basse fréquence alimentant un haut-parleur dont la fréquence est voisine de celle du diapason, montrer que la superposition conduit à un phénomène de battements.

On peut également utiliser deux diapasons identiques et ajouter une masselotte sur l'un des deux afin de modifier légèrement sa fréquence.

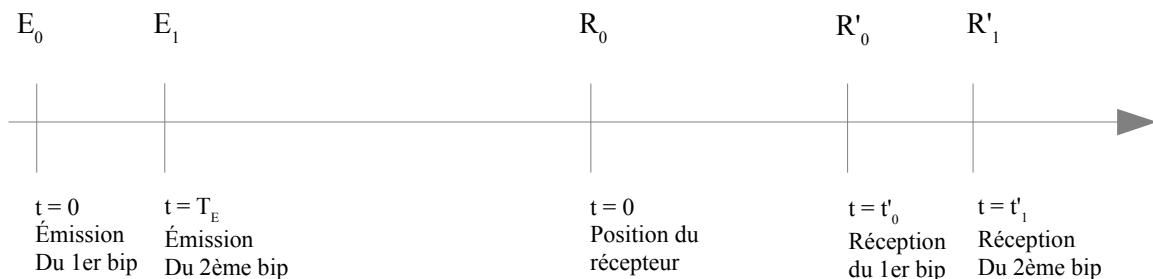
I.5. Effet Doppler

Rappel théoriques

A partir de la simulation accessible sur le lien ci-dessous, décrire l'effet Doppler.

http://www.ostralo.net/3_animations/swf/doppler.swf

Lorsqu'un émetteur et un récepteur d'onde sont en déplacement relatif, établir la relation qui existe entre la fréquence d'émission et la fréquence de réception des ondes. *Indications : on pourra s'aider de la chronologie ci-dessous et suivre les étapes suggérées par les questions 1. à 4..*



1. Exprimer t'_0 en fonction de la distance E_0R_0 , de c , vitesse de l'onde et de v_R , vitesse du récepteur.
2. Exprimer t'_1 en fonction de la distance E_0R_0 , de c , vitesse de l'onde, de v_R , vitesse du récepteur, de v_E vitesse de l'émetteur et de T_E .
3. Exprimer la période de réception T_R des bips sonores en fonction de la période d'émission T_E .
4. En déduire :

$$F_R = \frac{c - v_R}{c + v_R} F_E .$$

Attention, dans cette expression les vitesses sont algébriques. Si l'onde se propage dans le sens opposé à la flèche $c < 0$, de même pour v_E et v_R .

Dans un radar permettant de mesurer la vitesse d'un véhicule par exemple, l'émetteur et le récepteur sont placés au même endroit, à l'intérieur du radar. L'émetteur envoie une onde qui est réfléchiée sur le véhicule et renvoyée vers le récepteur. Lors de cette réflexion, on considère que la fréquence de l'onde reçu par le véhicule (récepteur en mouvement) est identique à la fréquence de l'onde réémise par le véhicule (émetteur en mouvement). En considérant ces deux phases, réception par le véhicule puis émission par le véhicule, montrer que :

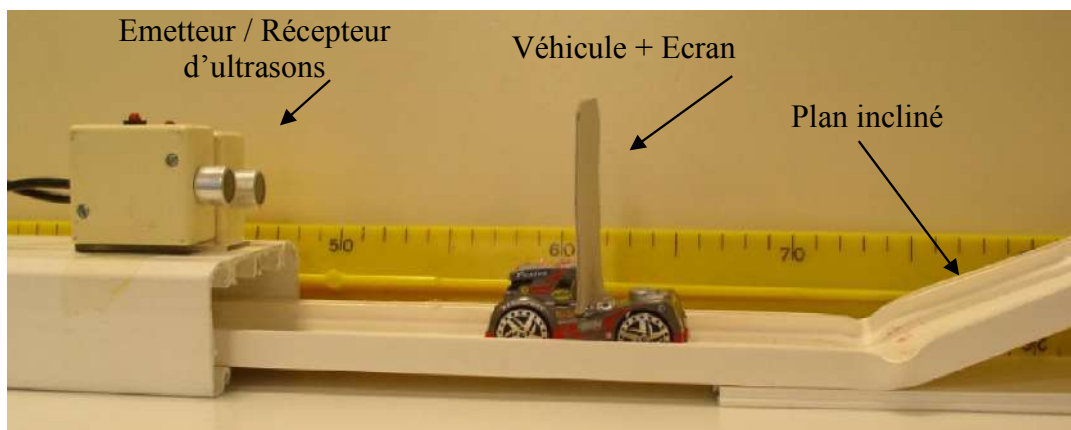
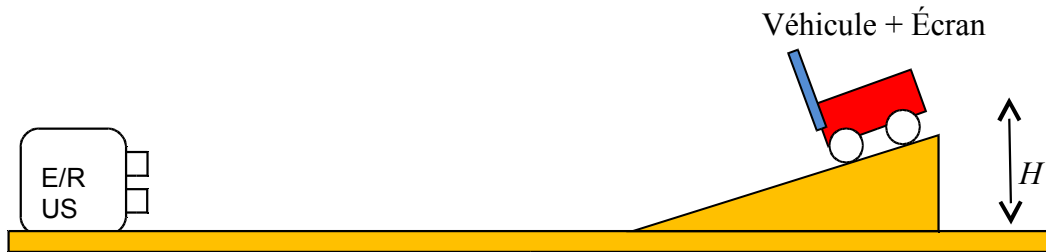
$$v = c \frac{\Delta F}{F_E + F_R}$$

avec ; v la vitesse du véhicule, F_E la fréquence des ondes émises par le radar, F_R la fréquence des ondes reçues par le radar et $\Delta F = F_R - F_E$.

Étude expérimentale

On souhaite **mesurer** par effet Doppler **la vitesse d'un petit véhicule** lâché sans vitesse initiale sur un plan incliné depuis une hauteur H .

Pour cela, on utilise un émetteur-récepteur d'**ultrasons** (fréquence ≈ 40 kHz) tous les deux reliés à une interface d'acquisition.



1. Positionner l'émetteur et le récepteur d'ultrasons face à face et trouver leur fréquence d'accord (fréquence à laquelle l'amplitude du signal reçu est maximale).
2. Faire une acquisition en lâchant le véhicule d'une hauteur H sans vitesse initiale. Enregistrer le signal émis et le signal reçu. Arrive-t-on à caractériser l'effet Doppler sans traitement des signaux ? Pourquoi ?
3. Représenter la somme du signal émis et du signal reçu. On doit observer des battements dus aux interférences. Montrer que la période des battements est égale à l'inverse du décalage Doppler ΔF défini précédemment.
4. En déduire la vitesse du véhicule à partir de l'effet Doppler. Estimer cette vitesse en prenant en compte la hauteur initiale H du véhicule. Conclure.

II. Analyse d'un son, acoustique musicale

II.1. Mesure du niveau sonore

Une source émet de façon isotrope avec une puissance P (en W). A une distance r , l'intensité acoustique est (en W/m^2) :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

et le niveau sonore (en dB) :

$$N = 10 \text{Log}(I/I_0) \text{ .}$$

$I_0 \approx 10^{-12} \text{ W/m}^2$ est le seuil de sensibilité de l'oreille humaine (à une fréquence de 1000 Hz). Il correspond à une surpression $p \approx 2.10^{-5} \text{ Pa}$.

- Brancher un générateur basse fréquence sur un haut Parleur. Mesurer le niveau sonore avec un sonomètre. Faire varier la fréquence du GBF, sa tension de sortie (on peut considérer que si elle est multipliée par $\sqrt{2}$, P est multiplié par 2) ainsi que la distance entre le HP et le sonomètre. Montrer que l'expression logarithmique du niveau sonore est bien vérifiée.

II.2. Hauteur d'un son, échelle de fréquence et gamme musicale

Les notes se suivent dans l'ordre Do, Do#, Ré, Mib, Mi, Fa, Fa#, Sol, Sol#, La, Sib, Si, Do ; un « cycle » correspond à une octave.

Chaque note est caractérisée par sa fréquence. Dans la gamme tempérée, une octave est divisé en douze intervalles chromatiques égaux et le rapport de la fréquence d'une note sur la note précédente est égale à $2^{1/12} \approx 1,059$ ce qui donne le tableau suivant pour une octave donnée :

note	Fréquence (Hz)
do	261,63
do#	277,18
ré	293,66
mib	311,13
mi	329,63
fa	349,23
fa#	369,99
sol	392,00
sol#	415,30
la	440,00
sib	466,16
si	493,88
do	523,25

Par convention, le La₃ (diapason des musiciens) a une fréquence de 440 Hz.

Le passage d'une note à la note du même nom située à l'octave supérieure multiplie sa fréquence par deux ainsi la fréquence du La₂ est 220 Hz et celle du La₄ de 880 Hz.

- Déterminer la bande passante de l'oreille en faisant varier la fréquence d'un GBF branché sur un HP.
- Faire quelques mesures de fréquences des notes joués par un instrument de musique. Retrouver la gamme chromatique tempérée.

III.3. Composition spectral d'un son, timbre.

La carte audio d'un ordinateur est une interface parfaitement adaptée. Le choix du logiciel permet ensuite différentes analyses et représentations. Des logiciels tels qu' ANALY'SON ou SPECTROGRAMME, permettent d'obtenir le spectre de n'importe quel signal envoyé par un microphone. Le spectre peut être présenté sous forme "traditionnelle" (amplitude en fonction de la fréquence) ou en mode sonagramme (fréquence et amplitude portées en fonction du temps).

Montrer que, pour une même fréquence fondamentale, la forme du signal modifie le timbre et la composition spectrale : analyser un signal délivré par un haut-parleur alimenté par un générateur en signal sinusoïdal, triangulaire puis carré.

Remarque :

- L'option de "fenêtrage" pour l'analyse spectrale doit être du type Hamming ou Hanning. Elle permet d'atténuer les effets de bords liés à la "troncature" du signal.
- Si le signal délivré par le générateur est en principe rectangulaire ou triangulaire, celui délivré par le haut-parleur et enfin, celui restitué par le microphone ne l'est pas. La présentation dans ces conditions ne peut être que qualitative.

Analyser différents sons d'instruments : diapason, flûte, guitare,...Montrer la progression des harmoniques lorsqu'on monte la gamme.

Montrer avec une corde de guitare que, si elle est mise en vibration en la pinçant à des endroits différents (au milieu, près d'une extrémité, ...), la hauteur est la même mais le timbre et le spectre sont différents.

EXPERIENCES SUR LES OSCILLATIONS MECANIQUES

Introduction

Les oscillations mécaniques interviennent très fréquemment en physique, car elles surviennent lorsqu'un système est légèrement déplacé d'une position d'équilibre stable. L'étude physique des oscillateurs a pris son essor au XVII^{ème} siècle, avec Galilée, Hooke, Huygens et Newton.

Il existe de nombreux oscillateurs mécaniques, citons par exemple :

- * un pendule élastique,
- * un pendule de torsion,
- * un pendule pesant.

Ce sujet, très vaste, peut donner lieu à différents montages. Il est pédagogiquement intéressant d'étudier quantitativement les oscillations libres et harmoniques forcées *d'un même oscillateur*, grâce à un capteur linéaire permettant une acquisition et un traitement informatisés. Ceci limite considérablement les matériels envisageables. Les possibilités sont mentionnées dans le tableau suivant, avec leurs points forts et faibles.

	<i>Pendule élastique vertical</i>	<i>Pendule élastique horizontal</i>	<i>Pendule de Pohl</i>
Descriptif	Cylindre accroché à un ressort . Amortissement ajustable par des disques fixés sous la masse et par la nature du liquide de l'éprouvette. Excitation grâce à un fil relié à un ergot en rotation. Capteur de position potentiométrique.	Cavalier relié à deux ressorts identiques, se déplaçant en translation sur un banc soufflant. Amortissement ajustable par l'immersion d'une palette dans un liquide. Excitation grâce à l'attraction magnétique d'une corde de piano solidaire du mobile. Capteur de position optoélectronique linéaire original.	Pendule de torsion avec ressort spiral. Amortissement ajustable par frein électromagnétique. Excitation grâce à un système bielle-manivelle. Capteur de position potentiométrique (ajouté par des centres de préparation).
Références	Dictionnaire de Physique (oscillations libres pour l'interfaçage).	Notice JEULIN. (Ref. 332 028)	Notice et recueil d'expériences LEYBOLD. Montages de Physique Archambault, Fontes.
Avantages	Observation visuelle très aisée des phénomènes. Théorie classique (cf H.Prépa par exemple)	Rapidité des acquisitions. Possibilité d'étudier aussi l'entretien des oscillations grâce à un dispositif judicieux.	Rapidité des acquisitions. Souplesse de réglage de l'amortissement. Quasiment pas de frottement solide.
Inconvénients	Capteur de position à fabriquer en préparation (Montage potentiométrique). Réglage du dispositif pouvant être délicat (risque de sortie de la masse du liquide à la résonance, frottement solide, etc...)	Risque de frottement solide malgré le coussin d'air si le système n'est pas parfaitement horizontal ou si la soufflerie n'est pas assez efficace. Dispositif d'excitation un peu sophistiqué. Pas d'observation du déphasage entre l'excitation et la réponse. Excitation non harmonique. Appareil bruyant !	Capteur de position (potentiomètre angulaire) non fourni par le constructeur, et installé définitivement par le centre de préparation. (<i>le jury peut ne pas accepter l'appareil...</i>)

Les oscillations libres sont toujours plus ou moins amorties, en raison de frottements inévitables. Ces derniers peuvent être de deux types très différents :

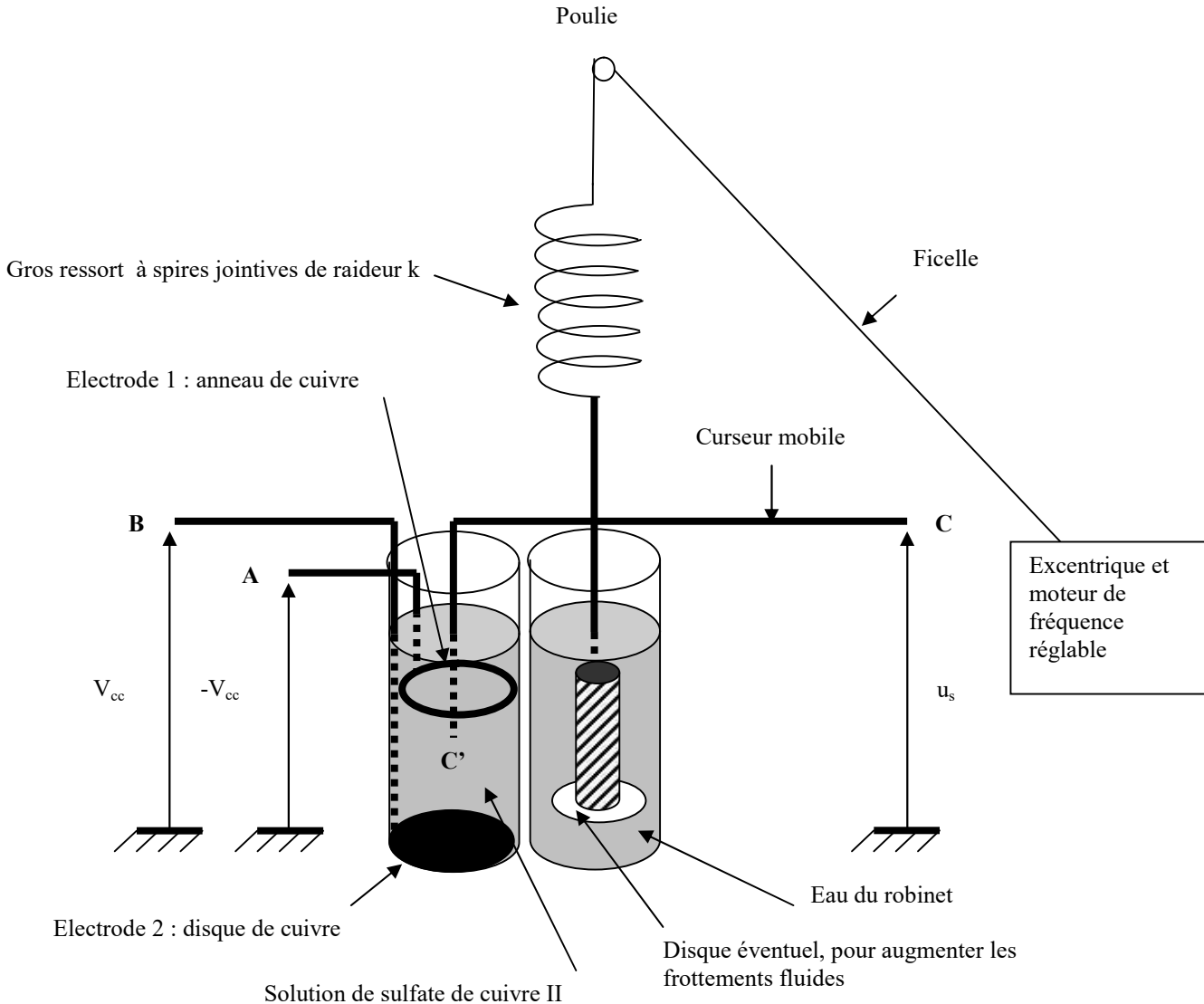
- **les frottements solides**, qui sont dus à des contacts entre solides. En ce qui concerne le glissement, ils sont bien modélisés par la loi de Coulomb (à connaître).
- **les frottements fluides**, qui sont dus au mouvement relatif entre un fluide et un solide. Pour un solide en translation, leur résultante est opposé à la vitesse de celui-ci. La dépendance de la valeur de la résultante avec la vitesse est compliquée. Si le régime est laminaire (faible nombre de Reynolds), elle est proportionnelle à la vitesse.

Dans les trois études d'oscillateurs explicitées dans ce qui suit, on négligera les frottements solides. Il sera possible, si l'on souhaite voir leur incidence, de faire une expérience en faisant frotter légèrement un solide sur le mobile.

PENDULE ELASTIQUE VERTICAL

Dans cette étude, on se propose de déterminer expérimentalement l'équation horaire d'un pendule élastique en translation verticale, d'abord **en régime libre** avec frottements visqueux plus ou moins importants, puis **en régime harmonique forcé**, avec les mêmes frottements de façon à tester diverses conséquences issues de la théorie. Pour cela, on construira un capteur de position linéaire (grâce à un montage appelé montage potentiométrique push-pull), puis on réalisera une acquisition et un traitement par ordinateur ou oscilloscope numérique.

1. Présentation de l'oscillateur et du capteur



L'alimentation double utilisée est telle que $V_{cc}=15V$.

La masse m du pendule élastique comprend celle de la masse et celle du conducteur en forme de croix constituant le curseur. (On considère comme négligeable l'incidence de la masse du ressort).

Les bornes C et masse seront reliées à un voltmètre de la console d'acquisition ESAO4.

Pour le régime libre, le moteur est arrêté : le haut du ressort est fixé.

Pour le régime harmonique forcé, le moteur tourne : le haut du ressort se déplace avec un mouvement rectiligne harmonique, dont l'amplitude correspond à la distance entre l'ergot et l'axe de l'excentrique. En regardant le haut du ressort, on voit l'excitation ; en regardant le bas, on voit la réponse !

2. Opérations préliminaires

2.1. Détermination statique de la raideur du ressort

Pour tous les tests que l'on va effectuer, il est nécessaire de connaître la raideur du ressort. Pour la déterminer, la *méthode dynamique* serait maladroite, puisqu'elle est fondée sur les relations à tester ! En conséquence, on fera une *détermination statique* de la raideur du ressort. On va utiliser deux équilibres successifs, ce qui permet d'éliminer la longueur à vide et la force minimale pour décoller les spires, toutes deux inconnues ; on envisage donc de suspendre au ressort (détaché du montage ci-dessus !) deux masses différentes m_1 et m_2 et de repérer la variation de longueur du ressort $L=l_2-l_1$. **Avant de manipuler, il faut calculer comment procéder pour réaliser la mesure la plus précise possible !**

Déterminer l'expression permettant de déterminer la raideur k en fonction de m_1 , m_2 , g et L . Calculer l'incertitude relative de k . En déduire comment on doit choisir les deux masses pour avoir la meilleure précision sur la mesure de la raideur.

Faire la mesure. Déterminer k et son incertitude absolue.

2.2. Détermination de la masse du pendule

Déterminer la masse M de l'équipage mobile (cylindre+ croisillon+ pince crocodile éventuellement) grâce à une balance électronique.

2.3. Étalonnage du capteur

On définit un axe vertical x ' x orienté vers le bas. On choisit comme origine la position d'équilibre d'un point de l'équipage mobile (celui qui arrange !). On placera une règle graduée le long du ressort afin de mesurer x . Mettre en place l'équipage et régler correctement le curseur : il ne doit pas toucher l'éprouvette lors des oscillations !

Alimenter le montage potentiométrique conformément au schéma ci-dessus.

Pour 4 ou 5 valeurs de x , déterminer la tension u_s . Tracer $u_s(x)$ à l'aide de GENERIS.

Un capteur est dit linéaire si sa réponse (ici u_s) est fonction affine du mesurande (ici x).

Grâce à l'outil modélisation de Générís, tester la linéarité du capteur. Conclure.

Relever la fonction de transfert du capteur (ici expression de u_s en fonction de x) ? Noter aussi la relation inverse permettant de calculer x en fonction de u_s qui sera utilisée plus loin.

ATTENTION ! Ne plus modifier le montage avant l'acquisition, sinon l'étalonnage serait à refaire !

3. Etude du régime libre

3.1. Acquisition

A l'aide du logiciel GENERIS, paramétrer l'acquisition: voltmètre, calibre 25 V, tension instantanée; fonction du temps, durée 50s, 1001 points.

Lancer l'acquisition (feu vert...) et abandonner le pendule écarté de $x_0 = 5$ cm à la date t_0 .

On a obtenu $u_s(t)$! Grâce au pointeur, relever la valeur de t_0 .

3.2. Exploitation

- La fonction du temps qui nous intéresse est non pas $u_s(t)$ obtenue, mais $x(t)$ (élongation du pendule à partir de sa position d'équilibre). Il faut donc créer la variable x à partir de u_s en tenant compte de la relation que l'on avait obtenue précédemment lors de l'étalonnage. Réaliser ceci grâce au centre de calcul (icône avec +,-,x...).
- Commenter la courbe $x(t)$ obtenue.
- Montrer que, si l'on suppose les frottements fluides dus à l'air régis par une résultante de valeur proportionnelle à la vitesse ($\vec{f} = -\alpha\vec{v}_{gr}$, α coefficient positif), l'élongation $x(t)$ pour $t > t_0$ doit vérifier l'équation différentielle (forme canonique):

$$\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

dans laquelle la pulsation propre et le facteur de qualité ont les expressions suivantes, respectivement :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad Q = \frac{m\omega_0}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{mk}$$

- Que peut-on dire de la valeur du facteur de qualité au vu de la courbe obtenue? Justifier.
- Quelle est l'expression littérale attendue pour $x(t)$ pour $t > t_0$ sachant que $x(t_0) = x_0$? On utilisera la pseudo-pulsation :
$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$
- Donner l'expression de la période propre T_0 en fonction des données k , M , α , et la relation entre la pseudo-période T et la période propre T_0 .
A quelle condition sur Q peut-on assimiler la pseudo-période à la période propre à mieux que 0,1 % ?
A l'aide du pointeur, déterminer la pseudo-période T des oscillations. La comparer à la période propre attendue.
- Effectuer une *modélisation par fonction* (modèle prédéfini: sinusoïde amortie $a \exp(-t/\tau) \sin(2\pi t/T + \varphi) + b$ que l'on modifiera). Comparer T à la détermination précédente. Déterminer le facteur de qualité Q grâce à τ et T . Commenter.
- Effectuer une *modélisation par équation différentielle* ($\ddot{x} = -a\dot{x} - bx$), qui permettra aussi de Déterminer à nouveau Q et T à partir des valeurs de a et b obtenues. Commenter.

- On définit le décrément logarithmique $\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+nT)} \right)$. Montrer que $\delta = \frac{\pi}{Q}$ à mieux que 0,1% si $Q > 11,2$. Mesurer le décrément logarithmique et en déduire Q .
- Résumer dans un tableau les valeurs des différentes mesures de T et Q .
- Créer dx/dt , qui est la composante v_x de la vitesse,.
- Afficher le *portrait de phase*, graphe de $x \mapsto \frac{dx}{dt}$. Commenter.
- Montrer que l'énergie potentielle *totale* du pendule est : $E_{p(\text{tot})} = \frac{1}{2} kx^2$, si l'on choisit comme état de référence la position d'équilibre.
- Donner l'expression de l'énergie cinétique E_c du pendule.
- Donner l'expression de l'énergie mécanique E du pendule.
- Créer les grandeurs E_c , $E_{p(\text{tot})}$, et $E = E_c + E_p$; Commenter.

4. Etude du régime harmonique forcé

On se propose de déterminer la courbe de variation, en fonction de la fréquence, de l'amplitude de la réponse en régime harmonique forcé., **dans les mêmes conditions de frottements fluides**, pour recouper la valeur du facteur de qualité Q .

4.1. Etude théorique

- Montrer, **par une étude dynamique soigneuse**, que l'équation différentielle qui pilote l'élongation est maintenant, à condition que x désigne l'élongation à partir d'une certaine origine que l'on précisera :

$$\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 a \cos(\omega t + \varphi_e)$$

- a désigne le rayon du cercle décrit par l'ergot de l'excentrique.
- $\omega = 2\pi f$ la pulsation de l'excitation ($\omega_{\text{moteur}} / 40$ à cause de la démultiplication).
- φ_e est la phase initiale de la force excitatrice équivalente.
- Montrer que l'amplitude complexe \underline{x} de l'élongation peut s'écrire

$$\underline{x} = \frac{-jQae^{j\varphi_e}}{u \left[1 + jQ \left(u - \frac{1}{u} \right) \right]}, \text{ avec } u = \frac{f}{f_0}, \text{ fréquence réduite}$$

- Déterminer l'amplitude $\hat{X}(u)$ de l'élongation en fonction de la fréquence réduite.
Montrer qu'il y a résonance si $Q > \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$, pour une fréquence, f_r , dont on donnera l'expression.
Donner aussi l'amplitude de l'élongation à la résonance. Quelle approximation peut-on faire si $Q > 5$?
- Déterminer le déphasage de l'élongation par rapport à la force excitatrice équivalente. Etudier les cas limites : $f \gg f_0$, $f = f_0$, $f \ll f_0$.

4.2. Etude expérimentale

- Brancher à la sortie du potentiomètre un oscilloscope numérique, qui permettra de relever, pour chaque valeur de la fréquence f imposée grâce au moteur, l'amplitude \hat{U} et la fréquence f de la réponse en tension.
- Dans le tableur de Génériss, créer deux colonnes correspondant à f , \hat{U} . Afficher en mosaïque tableau et graphe, pour contrôler la répartition des mesures effectuées.
- Faire un premier balayage en agissant sur la fréquence f , pour observer ce qui se passe, et repérer la zone de résonance.
- Refaire un balayage, en notant cette fois f, \hat{U} dans le tableau, de façon à avoir une belle courbe.
- Créer, grâce au centre de calculs, \hat{X} , amplitude de l'élongation calculée grâce à l'étalonnage du capteur de position..
- Exploiter la courbe de résonance "d'élongation" :
 - * mesurer la fréquence de résonance f_r , la comparer à f_0 ,
 - * mesurer l'ordonnée du maximum,

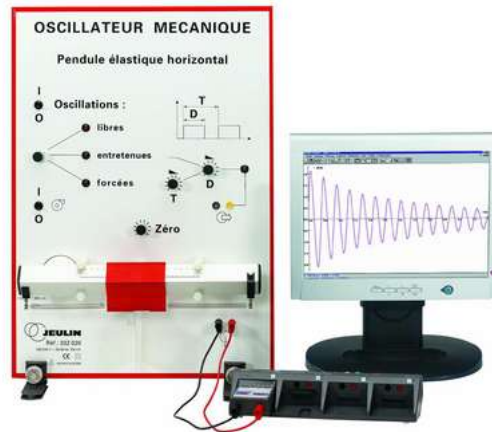
* modéliser par la fonction : $\frac{Qaf_0}{f\sqrt{1+Q^2\left(\frac{f}{f_0}-\frac{f_0}{f}\right)^2}}$. Relever Q et f_0 , les comparer aux valeurs

obtenues lors des oscillations libres,

- Créer la courbe de résonance de "vitesse": $\hat{V} = 2\pi f\hat{X}$ en fonction de f .
- * L'afficher avec la précédente. Commenter
- * Déterminer la bande passante à -3dB, Δf . En déduire une nouvelle détermination du facteur de qualité, que l'on comparera aux précédentes.
- En regardant à la fois les mouvements du haut du ressort et de la masse, vérifier les cas limites du déphasage : $f \gg f_0, f = f_0, f \ll f_0$.

PENDULE ELASTIQUE HORIZONTAL

I. Le dispositif



Le mobile est attaché à **deux ressorts** identiques (attention, il existe deux jeux de raideurs différentes (voir notice)). Un capteur linéaire optoélectronique (à observer et comprendre !) permet l'acquisition à l'ordinateur d'une tension proportionnelle à l'élongation du pendule, les données étant ensuite traitées à l'aide du logiciel Génériss ou Latis pro.

II. Oscillations libres

Il existe deux types de frottements : solide ou fluide. Ces derniers peuvent être modélisés par une force de valeur proportionnelle à la vitesse. L'amortissement par frottement fluide introduit dans l'équation différentielle du mouvement un terme $-h\dot{x}$. Celle-ci peut s'écrire, si l'on néglige tout frottement solide : $\ddot{x} + \frac{h}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0$ (forme canonique). On définit alors les quantités suivantes :

la pulsation propre : $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ et la période propre : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

le facteur de qualité : Q défini par $\frac{\omega_0}{Q} = \frac{h}{m}$, ce qui entraîne $Q = \frac{m\omega_0}{h} = \frac{1}{h}\sqrt{mk}$

la pseudo-pulsation $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$

la pseudo-période : $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$

le temps de relaxation $\tau = \frac{2Q}{\omega_0} = T_0 \frac{Q}{\pi}$

En fonction des valeurs du coefficient de qualité Q , on définit trois cas :

- $Q > \frac{1}{2}$, l'amortissement est faible. On parle de *régime pseudo-périodique*.
- $Q < \frac{1}{2}$, l'amortissement est fort. On parle de *régime aperiodique*.
- $Q = \frac{1}{2}$, c'est le régime *apériodique critique*.

Les deux derniers régimes sont difficiles à atteindre à moins d'utiliser un liquide très visqueux.

1. Frottements faibles (sans la palette d'amortissement)

Placer le commutateur sur oscillations libres.

A l'aide de Générïs, paramétrer l'acquisition: voltmètre, calibre 2,5 V, tension instantanée; fonction du temps, durée 5s, 501 points, acquisition continue.

Mettre en marche la soufflerie, faire apparaître l'afficheur, régler le zéro à l'aide du potentiomètre correspondant sur le tableau.

Cliquer sur graphique, écartier le mobile de sa position d'équilibre et lancer l'acquisition (cocher *acquisitions multiples* en prévision du 2.) . A la fin de celle-ci, penser à arrêter la soufflerie!

Commenter. A l'aide du pointeur, déterminer la *pseudo-période* T des oscillations. La comparer à la *période propre* :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

(m et k sont donnés sur la notice)

Effectuer une *modélisation par fonction* (modèle prédéfini: sinusoïde amortie $a \exp(-t/\tau)\sin(2\pi t/T + \phi) + b$). Comparer T à la détermination précédente. Déterminer le *facteur de qualité* Q grâce à τ et T .

Effectuer éventuellement une *modélisation par équation différentielle* ($\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$), qui permettra aussi de déterminer Q et T .

Créer du/dt , qui est proportionnelle à la composante horizontale de la vitesse, v_x .

Afficher le **portrait de phase**, graphe de $u \mapsto \frac{du}{dt}$. Commenter.

2. Frottements plus importants (avec la palette d'amortissement légèrement immergée dans de l'eau)

Fixer la palette sous le mobile, au centre. Immerger son extrémité dans une cuve contenant de l'eau.

Refaire l'étude précédente. Commenter.

III. Oscillations entretenues

L'oscillateur Jeulin permet également de réaliser l'entretien des oscillations du pendule élastique. A chaque période propre, une petite quantité d'énergie est apportée au pendule. Celle-ci est communiquée au système par l'attraction qu'une bobine, alimentée par un circuit extérieur, exerce sur une aiguille en acier solidaire du mobile et qui se déplace à l'intérieur de la bobine, chaque fois que la bobine est traversée par un courant électrique.

Pour que cette impulsion se passe au bon moment, un second capteur optoélectronique fonctionne par réflexion. Il est fixé sur le tableau. Un réflecteur, constitué d'un petit morceau d'aluminium, est collé sur le mobile. Chaque fois que le réflecteur passe devant le capteur, dans le sens de gauche à droite, le signal optique détecté par le capteur déclenche le passage du courant dans la bobine, pendant une durée réglable par action sur le potentiomètre D du tableau, et attire la tige d'acier.

Pour un bon fonctionnement, il faut placer le mobile à gauche avant de commuter sur "oscillations entretenues".

Faire une acquisition.

Vérifier que l'amplitude est maintenant constante.

Vérifier que la période est la période propre T_0 .

Modéliser par une sinusoïde. Commenter.

Éventuellement, créer le portrait de phase ou faire une FFT sur une portion d'une période.

IV. Oscillations forcées

Lorsqu'on place le commutateur sur "oscillations forcées", on va soumettre l'oscillateur à une excitation périodique; c'est le même système constitué de la bobine et de l'aiguille d'acier qui est utilisé pour exciter le pendule élastique mais cette fois sans l'intervention du deuxième capteur. Un oscillateur extérieur, de période variable T , détermine le passage du courant dans la bobine pendant une durée choisie D . Les attractions exercées sur l'aiguille d'acier obligent le pendule élastique à osciller à la fréquence de l'excitateur, en régime établi.

La période T varie entre 0,3 s et 0,6 s environ, ce dont il faudra se souvenir pour l'interprétation.

1. Observation du régime transitoire

Réaliser une acquisition mettant en évidence le régime transitoire. Celui-ci se manifeste par des battements qui s'estompent pour donner le régime forcé à la pulsation ω . A la résonance on n'observe plus de battements mais une augmentation continue de l'amplitude jusqu'au régime établi.

2. Etude du régime forcé

a) Frottements faibles (sans la palette d'amortissement)

On se propose de déterminer la courbe de variation, en fonction de la fréquence, de l'amplitude de la réponse en régime forcé.

Brancher aux bornes de l'adaptateur voltmètre un oscilloscope numérique AGILENT, qui permettra de relever, pour chaque valeur de T imposée grâce au potentiomètre, l'amplitude \hat{U} et la fréquence f de la réponse. On règlera le potentiomètre D définitivement, en position sensiblement médiane.

Dans le tableur de Génériss, créer deux colonnes correspondant à f et \hat{U} . Afficher en mosaïque tableau et graphe, pour contrôler la répartition des mesures effectuées.

Faire un premier balayage en agissant sur le potentiomètre T, pour observer ce qui se passe, et repérer la zone de résonance.

Refaire un balayage, en notant cette fois f et \hat{U} dans le tableau, de façon à avoir une belle courbe.

Attention: la résonance mécanique est aiguë et la détermination de la fréquence de résonance est assez délicate.

Exploiter la courbe de résonance "d'élongation":

* mesurer la fréquence de résonance f_r , la comparer à f_0 .

* mesurer l'ordonnée du maximum.

* modéliser par la fonction: $\frac{b}{f\sqrt{1+Q^2(f/f_0 - f_0/f)^2}}$. Relever Q et f_0 , les comparer aux valeurs obtenues

lors des oscillations libres.

Créer la courbe de résonance de "vitesse": $\hat{V} = 2\pi f\hat{U}$ en fonction de f .

* L'afficher avec la précédente. Commenter

* Déterminer la bande passante à -3 dB. En déduire une nouvelle détermination du facteur de qualité, que l'on comparera aux précédentes.

b) Frottements plus importants (avec la palette d'amortissement légèrement immergée dans de l'eau)

Fixer la palette sous le mobile, au centre. Immerger son extrémité dans une cuve contenant de l'eau, sans changement par rapport au montage réalisé pour les oscillations libres.

Refaire l'étude précédente. Commenter.

PENDULE DE POHL

Le pendule de Pohl est un oscillateur harmonique à ressort spiral. Il peut être amorti par des courants de Foucault induits par un électroaimant. Il peut aussi être excité par un moteur de fréquence variable.



Appareil Leybold.

Oscillations libres amorties

Le moteur à l'arrêt et en l'absence de courant dans l'électroaimant, mesurer la fréquence propre f_0 de l'oscillateur.

En augmentant progressivement le courant dans l'électroaimant, montrer l'existence d'un amortissement et observer les différents régimes : pseudo-périodique, aperiodique critique et aperiodique.

En régime pseudo-périodique, pour quelques valeurs de l'intensité I du courant dans l'électroaimant, déterminer le décrément logarithmique :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+nT)} \right)$$

et vérifier que δ est proportionnel à I^2 . Justifier.

Oscillations forcées

La fréquence f des excitations est réglée par la tension d'alimentation U du moteur ($f = kU$).

Etude qualitative

Pour $I = 0$ dans l'électroaimant (donc pas de courants de Foucault et pas d'amortissement), faire varier la fréquence d'excitation f autour de la fréquence propre f_0 de l'oscillateur. Observer les battements entre le mouvement oscillatoire à la fréquence f_0 du système et le mouvement oscillatoire imposé à la fréquence f de l'excitateur. Dans ce cas, la durée du régime transitoire, inversement proportionnel à l'amortissement, est très longue.

Augmenter progressivement l'intensité I du courant dans l'électroaimant. Ne pas dépasser 1 A. Observer la diminution de la durée du régime transitoire et l'installation d'un régime stationnaire à la fréquence f de l'excitateur.

Modifier la fréquence f et observer à l'aide de l'index noir sur le moteur et de l'index blanc sur l'oscillateur, un déphasage entre l'oscillateur et l'excitateur, dans le cas général. En particulier ;

- si $f \ll f_0$, l'oscillateur suit l'excitateur et le déphasage est nul,
- si $f = f_0$, ils sont en quadrature de phase.
- si $f \gg f_0$, ils sont en opposition de phase.

Observer la résonance en amplitude (la fréquence de résonance f_r n'est pas la fréquence propre f_0).

Etude quantitative

Pour deux valeurs de l'intensité dans l'électroaimant, $I = 0,2 \text{ A}$ et $I = 0,6 \text{ A}$, relever l'amplitude maximum θ_m des oscillations (après disparition du régime transitoire), pour différentes valeurs de la fréquence d'excitation f (ou de la tension U). Faire plusieurs mesures autour de la fréquence propre f_0 . Attention, lorsque f est nulle, θ_m ne l'est pas !

Rentrer dans un tableur les valeurs de θ_m en fonction de f . Déterminer la fréquence de résonance f_r et la comparer à f_0 . Calculer la bande passante Δf pour $\theta_m = \theta_m(f_r)/\sqrt{2}$. En déduire le facteur de qualité Q . Modéliser les courbes par l'expression théorique de l'amplitude :

$$\theta_m(f) = \frac{C}{\sqrt{(f^2 - f_0^2)^2 + \left(\frac{f f_0}{Q}\right)^2}}$$

Issu du BO

<p>Terminale S</p> <p>Notions et contenus Caractéristiques des ondes Ondes progressives. Grandeurs physiques associées. Retard. Ondes progressives périodiques, ondes sinusoïdales. Ondes sonores et ultrasonores. Analyse spectrale. Hauteur et timbre. Effet Doppler.</p> <p>Compétences exigibles Définir une onde progressive à une dimension. Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité). Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde. Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde. Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale. Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre. Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler. Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses. Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.</p>	<p>Terminale S – spécialité</p> <p>Thème 2 : son et musique</p> <table border="1"> <tr> <td>Domaines d'étude</td> <td>Mots-clés</td> </tr> <tr> <td>Instruments de musique</td> <td>Instruments à cordes, à vent et à percussion. Instruments électroniques. Acoustique musicale : gammes ; harmonies. Traitement du son.</td> </tr> <tr> <td>Émetteurs et récepteurs sonores</td> <td>Voix : acoustique physiologique. Microphone : encointes acoustiques ; casque audio. Reconnaissance vocale.</td> </tr> <tr> <td>Son et architecture</td> <td>Auditorium : salle sonore. Isolation phonique ; acoustique active ; réverbération.</td> </tr> </table>	Domaines d'étude	Mots-clés	Instruments de musique	Instruments à cordes, à vent et à percussion. Instruments électroniques. Acoustique musicale : gammes ; harmonies. Traitement du son.	Émetteurs et récepteurs sonores	Voix : acoustique physiologique. Microphone : encointes acoustiques ; casque audio. Reconnaissance vocale.	Son et architecture	Auditorium : salle sonore. Isolation phonique ; acoustique active ; réverbération.
Domaines d'étude	Mots-clés								
Instruments de musique	Instruments à cordes, à vent et à percussion. Instruments électroniques. Acoustique musicale : gammes ; harmonies. Traitement du son.								
Émetteurs et récepteurs sonores	Voix : acoustique physiologique. Microphone : encointes acoustiques ; casque audio. Reconnaissance vocale.								
Son et architecture	Auditorium : salle sonore. Isolation phonique ; acoustique active ; réverbération.								
<p>1^{ère} STI2D et 1^{ère} STL</p> <p>Confort acoustique</p> <table border="1"> <tr> <td>Ondes sonores et ultrasonores ; propagation.</td> <td>- Définir et mesurer quelques grandeurs physiques associées à une onde sonore ou ultrasonore : pression acoustique, amplitude, période, fréquence, célérité, longueur d'onde. - Énoncer qu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde sonore. - Donner l'ordre de grandeur de la célérité du son dans quelques milieux : air, liquide, solide.</td> </tr> <tr> <td>Puissance et intensité sonore ; niveau ; Transmission, absorption, réflexion.</td> <td>- Citer les deux grandeurs influençant la perception sensorielle : l'intensité et la fréquence d'un son. - Citer les seuils de perception de l'oreille humaine. - Définir et mesurer le niveau sonore. Citer l'unité correspondante : le décibel (dB). - Mettre en évidence expérimentalement les phénomènes de réflexion, de transmission ou d'absorption d'un son ou d'un ultrason pour différents matériaux.</td> </tr> </table>	Ondes sonores et ultrasonores ; propagation.	- Définir et mesurer quelques grandeurs physiques associées à une onde sonore ou ultrasonore : pression acoustique, amplitude, période, fréquence, célérité, longueur d'onde. - Énoncer qu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde sonore. - Donner l'ordre de grandeur de la célérité du son dans quelques milieux : air, liquide, solide.	Puissance et intensité sonore ; niveau ; Transmission, absorption, réflexion.	- Citer les deux grandeurs influençant la perception sensorielle : l'intensité et la fréquence d'un son. - Citer les seuils de perception de l'oreille humaine. - Définir et mesurer le niveau sonore. Citer l'unité correspondante : le décibel (dB). - Mettre en évidence expérimentalement les phénomènes de réflexion, de transmission ou d'absorption d'un son ou d'un ultrason pour différents matériaux.	<p>1^{ère} STI2D et 1^{ère} STL</p> <table border="1"> <tr> <td>Ondes sonores ; propagation.</td> <td>- Définir et mesurer quelques grandeurs physiques associées à une onde sonore : pression acoustique, amplitude, période, fréquence, célérité, longueur d'onde. - Énoncer qu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde sonore. - Donner l'ordre de grandeur de la célérité du son dans quelques milieux : air, liquide, solide.</td> </tr> </table>	Ondes sonores ; propagation.	- Définir et mesurer quelques grandeurs physiques associées à une onde sonore : pression acoustique, amplitude, période, fréquence, célérité, longueur d'onde. - Énoncer qu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde sonore. - Donner l'ordre de grandeur de la célérité du son dans quelques milieux : air, liquide, solide.		
Ondes sonores et ultrasonores ; propagation.	- Définir et mesurer quelques grandeurs physiques associées à une onde sonore ou ultrasonore : pression acoustique, amplitude, période, fréquence, célérité, longueur d'onde. - Énoncer qu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde sonore. - Donner l'ordre de grandeur de la célérité du son dans quelques milieux : air, liquide, solide.								
Puissance et intensité sonore ; niveau ; Transmission, absorption, réflexion.	- Citer les deux grandeurs influençant la perception sensorielle : l'intensité et la fréquence d'un son. - Citer les seuils de perception de l'oreille humaine. - Définir et mesurer le niveau sonore. Citer l'unité correspondante : le décibel (dB). - Mettre en évidence expérimentalement les phénomènes de réflexion, de transmission ou d'absorption d'un son ou d'un ultrason pour différents matériaux.								
Ondes sonores ; propagation.	- Définir et mesurer quelques grandeurs physiques associées à une onde sonore : pression acoustique, amplitude, période, fréquence, célérité, longueur d'onde. - Énoncer qu'un milieu matériel est nécessaire à la propagation d'une onde sonore. - Donner l'ordre de grandeur de la célérité du son dans quelques milieux : air, liquide, solide.								

Bibliographie habituelle :

R. Duffait, *Expériences de Physique*, Bréal
J.P. Bellier, *Montages de Physique*, Dunod

GENERALITES

L'acoustique est l'étude des sons, elle nécessite trois éléments : une source sonore, un milieu de propagation, un détecteur.

- Une onde acoustique plane peut se décrire par exemple par la pression acoustique $p(t)$.

Pour une onde sinusoïdale on peut écrire : $p(t) = p_0 \cos(\omega t - \varphi) = p_0 \cos(2\pi(t/T - x/\lambda))$

avec p_0 amplitude, ω pulsation, T période (ou $f = 1/T$ fréquence), φ phase, λ longueur d'onde ($k = 2\pi/\lambda$)

Si le milieu n'est pas dispersif, on a la relation $\lambda = c/f$ (ou $\omega = kc$) avec c célérité, caractéristique du milieu.

- Si l'onde est sphérique elle peut être représentée par : $p(t) = (A/r) \cos(\omega t \pm kr)$

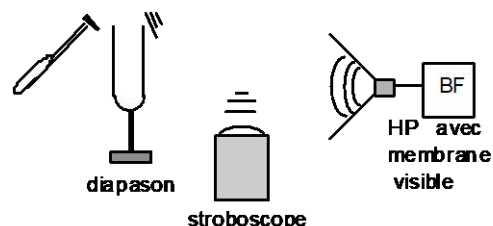
EXPERIENCES QUALITATIVES

L'origine du son : une vibration mécanique

On observe directement à l'aide d'un stroboscope (immobilité ou ralenti apparent) :

→ Vibration des branches d'un diapason

→ Vibration de la membrane d'un H.P.

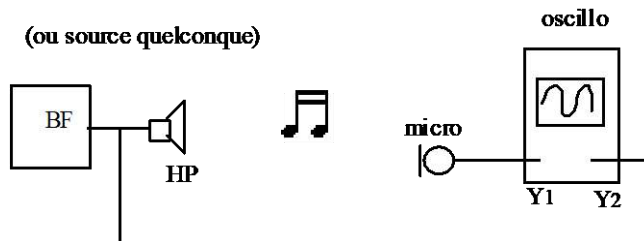


Le détecteur est un instrument sensible aux vibrations mécaniques

• Les microphones : les plus courants sont des capteurs de pression acoustique ; ils transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Les vibrations mécaniques sont transformées en vibrations électriques et sont " visualisées " à l'aide d'un oscilloscope.

On présente une expérience élémentaire :

Le son est issu d'un BF et capté par un micro.
Le signal capté est similaire au signal de la source.

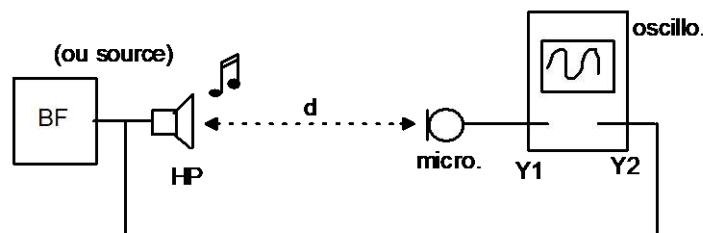


On donnera un ordre de grandeur des bandes passantes des " instruments " utilisés : oreille [20 ; 20000 Hz] ; microphone (dépend de sa qualité, au moins du même ordre de grandeur que celle de l'oreille) ; oscillo. [1 ; 10⁵]

AMPLITUDE, INTENSITE SONORE

Cette expérience a pour but de montrer la relation entre A l'amplitude du signal sonore et I son intensité (ou niveau) sonore : $I = k A^2$; k constante.

On réalise le montage suivant :



L'amplitude du signal est mesurée sur l'oscilloscope.

Le niveau sonore est mesuré à l'aide d'un sonomètre placé à la même distance d de la source que le micro.

(voir la notice du sonomètre ; on se placera en général sur " Hi ; S ; C ")

On rappelle que $I_{dB} = 10 \log(I/I_0)$ avec I en $W.m^{-2}$ et $I_0 = 10^{-12}.W.m^{-2}$

avec I_0 correspond au seuil d'audibilité de l'oreille humaine.

Faire une première mesure de A_1 et I_{1dB} avec un niveau quelconque et d fixé. Puis doubler le niveau sonore en ajoutant 3dB à la valeur précédente : $I_{2dB} = I_{1dB} + 3dB$.

En effet, si $I_2=2I_1$, $I_{2dB}=10 \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right)=10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)+10 \log 2 = I_{1dB}+3dB$

Mesurer A_2 et vérifier que $A_2 = A_1 \sqrt{2}$.

FREQUENCES

Son pur :

La source sonore est un diapason émettant un son pur ($L_{a3} = 440$ Hz).

Relier le microphone sur la voie 1 de l'oscillo ou sur l'entrée EA0 de la carte d'acquisition Eurosmart.

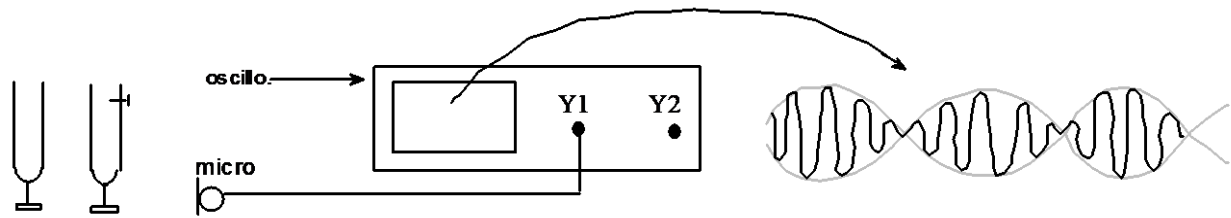
Attention au choix des paramètres d'acquisition : faire l'acquisition d'un grand nombre de périodes, prendre un nombre de points tels que $N=2^n$ (8192 conseillés) nécessaire pour l'algorithme de la FFT et faire attention aussi au sous échantillonnage (au moins deux points échantillonnés par période).

Faire une transformée de Fourier du signal temporel acquis et mesurer la fréquence du son pur. Répéter la mesure en surchargeant le diapason (ajouter pour cela une masselotte) et mesurer à nouveau la fréquence.

Phénomène de battements

La source sonore est un diapason étalon (f) + un diapason surchargé (f').

Relier le microphone sur la voie 1 de l'oscillo ou sur l'entrée EA0 de la carte d'acquisition. Observer le phénomène de battements sur le signal temporel et vérifier que : $f_{\text{battements}} = f' - f$



Faire une transformée de Fourier du signal temporel et retrouver la valeur des deux fréquences f et f' .

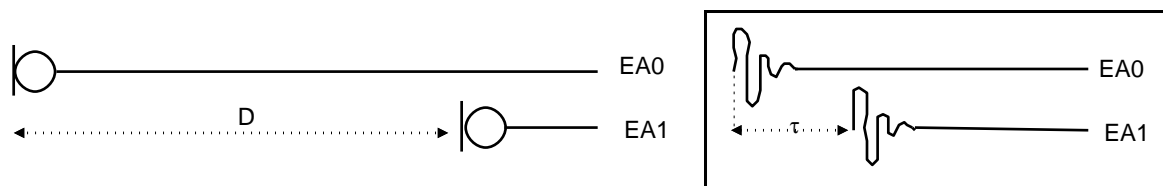
Sons complexes :

Vous pouvez faire une analyse spectrale d'une note jouée sur un instrument de musique. Comparer les timbres des instruments à votre disposition pour une même note jouée. Vérifier que l'on double la fréquence en passant d'une octave à la suivante. Vous pouvez également faire une analyse spectrale d'une note chantée !

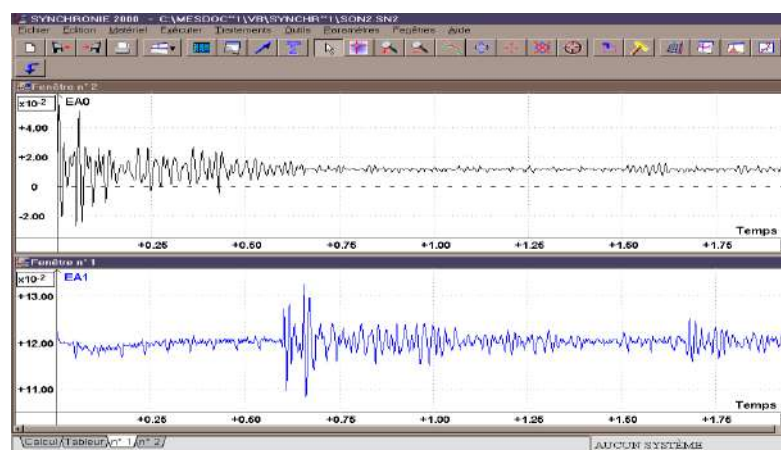
PROPAGATION LIBRE, LONGUEUR D'ONDE, CELERITE

Mesure directe de la célérité du son dans l'air

On se propose de mesurer la **vitesse de propagation du son dans l'air** grâce à la mesure du temps mis par une onde acoustique pour parcourir une distance connue. Pour cela, on relie deux microphones identiques (même temps de réponse) à la carte d'acquisition : l'un à l'entrée EA0, l'autre à l'entrée EA1. On sépare ces deux microphones d'une distance d (1 à 2 m). Le mode de déclenchement est affecté à l'entrée EA0. On produit un bruit sec et bref, par exemple à l'aide d'une pince en bois, devant le micro relié à l'entrée EA0 (celle qui déclenche l'acquisition).



Il suffit alors de pointer avec le réticule un même motif sur le signal EA0 et sur le signal EA1 et de calculer Δt . Avec le réticule, aller dans le menu « Précision » pour obtenir une meilleure précision sur les valeurs lues. On en déduit alors simplement la vitesse de propagation du son en effectuant le calcul : $c = d / \Delta t$.



Mesure indirecte à partir de la longueur d'onde

On détermine c (célérité) par la *mesure d'une longueur* (la longueur d'onde λ) et la *mesure d'un temps* (fréquence f ou période T) puis, le milieu étant non dispersif, on applique la relation $c = \lambda f$.

On utilise dans cette expérience des ultrasons créés et captés par des émetteurs-récepteurs piézoélectriques ; leur fréquence d'utilisation est de l'ordre de **40 kHz** (bande passante de l'ordre de 1000 Hz).



Pour éviter le plus possible la formation d'ondes stationnaires entre l'émetteur et le récepteur, on pourra placer l'émetteur légèrement en travers. Sur la voie Y1 on observe le signal capté par le micro, sur la voie Y2 le signal émis. On déplace le micro pour avoir ces deux signaux en phase, puis on déplace le micro et on relève n (n = 10) coïncidences (signaux de nouveau en phase). On pourra utiliser la méthode de Lissajous (se mettre en XY à l'oscillo) pour repérer plus précisément les coïncidences.

On en déduit λ par $\lambda = d/n$ (Précision ?), puis on en déduit c (Précision ?).

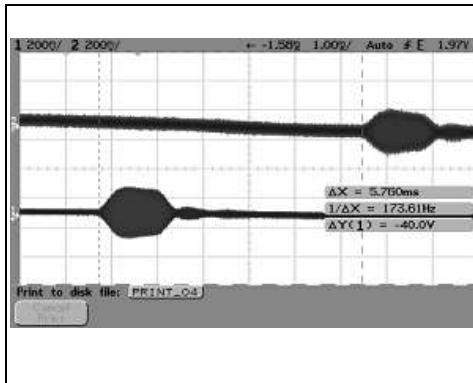
Remarque

Pour les résultats des célérités, il peut être utile d'effectuer une correction de température, sachant que le modèle

est $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ et qu'à $T_0 = 273 \text{ K}$, on a $c_0 = 331 \text{ m.s}^{-1}$.

Un dispositif permet de mesurer la célérité **du son dans l'eau**. Vérifier que celle-ci est bien plus élevée que dans l'air.

PRINCIPE DU SONAR



On utilise un générateur de salves adapté aux émetteurs ultrasonores et une plaque réfléchissant les ondes US.

Le signal électrique est transformé par le transducteur ultrasonore et la forme initiale (salve 40kHz dans le créneau) est rarement conservée. Pour améliorer la précision de la mesure, on peut utiliser un émetteur et deux récepteurs. Utiliser un oscillo pour la mesure de $\Delta t = 2*d/c$. En déduire d. Précision.

EFFET DOPPLER

Le but de la manipulation est d'illustrer le principe de la mesure de vitesse utilisé dans les radars routiers. Les ondes électromagnétiques seront remplacées par les ondes ultrasonores.

Dans cette expérience, l'émetteur et le récepteur seront fixes et face au train.

On peut montrer la relation approchée suivante : $v = \frac{c \Delta f}{2f}$

Avec Δf le décalage de fréquence existant entre le signal reçu et le signal émis que l'on se propose de mesurer

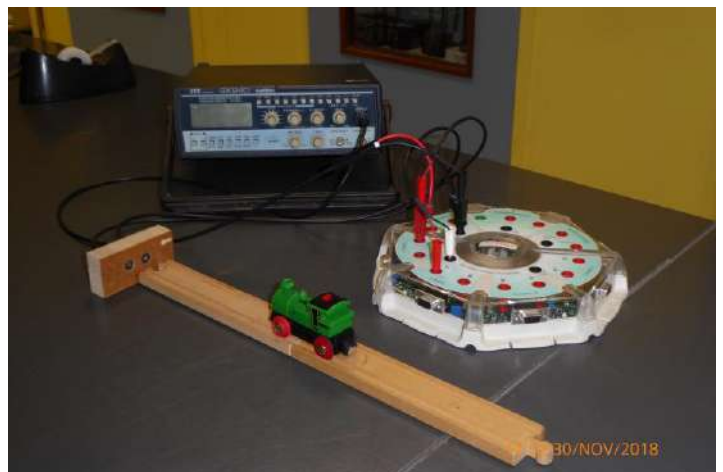
- 1) Dans un premier temps, on cherche à mesurer la fréquence du signal émis et celle du signal reçu. Sachant que la fréquence de ces signaux est autour de 40kHz, régler les paramètres d'acquisition et notamment le temps d'échantillonnage pour que le critère de Shannon ($F_E \geq F_{signal}$) soit respecté.
- 2) On se rend compte que l'on n'arrive pas à caractériser l'écart en fréquence créé par l'effet Doppler. Pourquoi ?
- 3) On propose donc traiter les signaux émis et reçus.

Une solution consiste à multiplier les signaux émis et reçus

$$\text{Rappel : } \cos(2\rho f_1 t) \cdot \cos(2\rho f_2 t) = \frac{1}{2} (\cos(2\rho(f_1 + f_2)t) + \cos(2\rho(f_1 - f_2)t)).$$

Liste du matériel :

Générateur BF
 Carte Eurosmart
 locomotive BRIO sur un rail de 30 à 40cm
 2 émetteurs/récepteurs ultrasons disposés côte à côte dans un support adapté
Paramètres :
 16000 points, durée 1.6s, $T_e=100\mu s$
 BF sur EA1 et Récepteur sur EA2



Optimiser la fréquence du BF pour détecter le meilleur signal au niveau du récepteur.

Exemple de Feuille de calcul :

$pr=EA1*EA2$

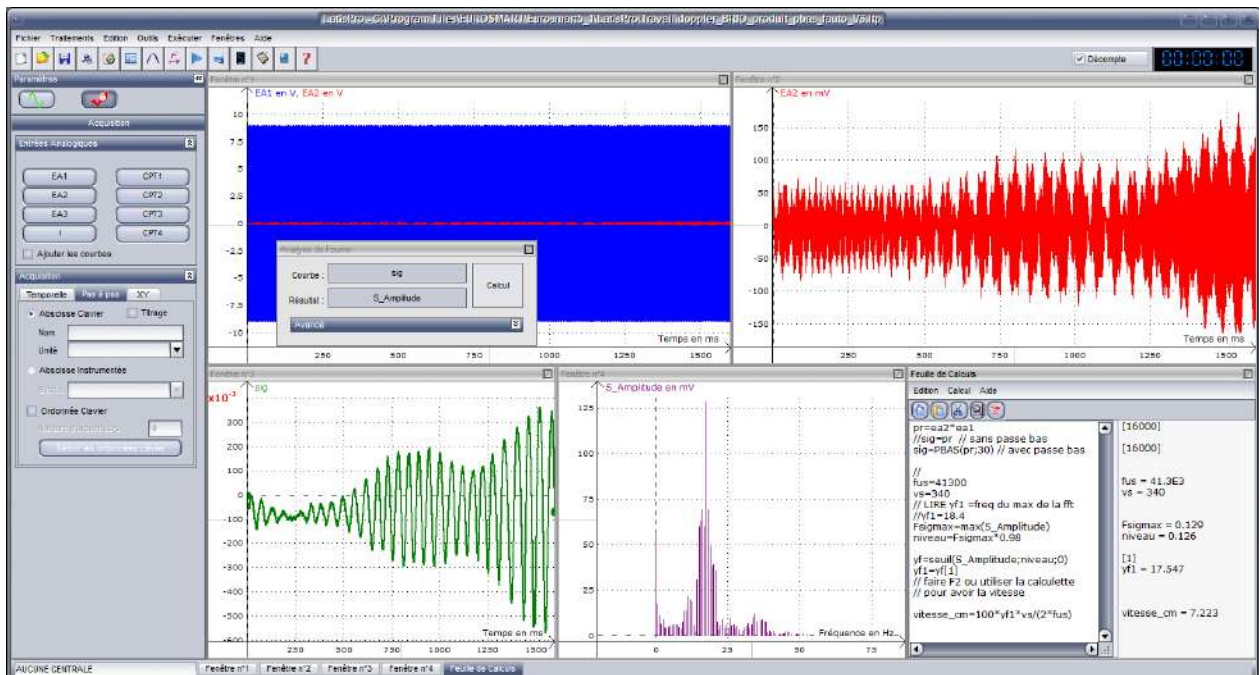
// on fait le produit

$sig=PBAS(pr;30)$

// on applique un filtre passe bas

Δf est obtenue soit par lecture directe à partir de la période de la courbe « sig » sur laquelle on a appliqué un passe-bas, soit après transformée de Fourier.

On calcule alors la vitesse par : $v= \Delta f.c/2f$; valeur à comparer avec celle mesurée directement à l'aide d'un chronomètre.



Rayonnement, température, changement d'état

4 décembre 2018

Manips possibles

1 Rayonnement thermique : lois de Wien, Planck et Stefan	1
1.1 Quelques rappels théoriques	1
1.2 Expériences qualitatives : absorption et émission du rayonnement, infrarouge, cube de Leslie	2
1.3 Expérience quantitative : vérification de la loi de Stefan	4
2 Conduction thermique	5
2.1 Aspects qualitatifs	5
2.2 Aspects quantitatifs : mesure de conductivité	6
2.3 Conduction et convection : expérience de Ingen-Housz	6
3 Enthalpies de changement d'état	7
3.1 Chaleur latente de fusion de la glace	7
3.2 Chaleur latente de vaporisation de l'eau	8
4 Phénomène de transport : diffusion de la glycérine dans l'eau	9
5 Les programmes et les sujets de MSP 2018	9
Références	12

1 Rayonnement thermique : lois de Wien, Planck et Stefan

1.1 Quelques rappels théoriques

Le rayonnement thermique est le rayonnement électromagnétique émis par un corps à la température T . Le rayonnement émis dépend de la nature du corps, cependant les lois du rayonnement de tous les corps se réfèrent au rayonnement d'un corps particulier, le corps noir. Celui-ci est défini comme étant capable d'absorber tout rayonnement qu'il reçoit. La théorie du corps noir développée au début du 20^{ème} siècle a marqué l'histoire de la physique par la confirmation du caractère discret des échanges énergétiques matière-rayonnement et l'introduction du photon [Planck (1900), Einstein (1905)].

La densité spectrale d'énergie $u(\lambda, T)$ du corps noir représente l'énergie interne par unité de volume du corps noir à la température T pour les radiations du domaine $(\lambda, \lambda + d\lambda)$. On définit de même la densité $u(\nu, T)$ si on précise le domaine spectral en fréquence. Cette densité s'exprime par **la loi de Planck** (voir figure 1) :

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1} \quad \text{ou} \quad u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1}$$

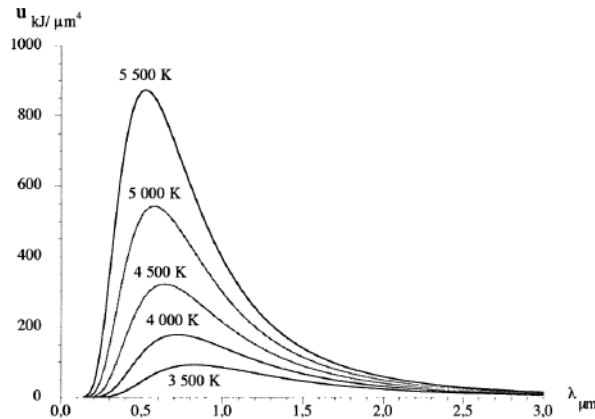


FIGURE 1 – Répartition de l'intensité $u(\lambda, T)$ du rayonnement du corps noir en fonction la longueur d'onde λ , pour différentes températures (à partir de la formule de Planck). λ est en μm , la densité volumique d'énergie est comptée en $kJ/\mu m^4$.

Loi de déplacement de Wien

La répartition de l'intensité en fonction de la longueur d'onde λ a l'allure d'une courbe en cloche asymétrique, passant par un maximum pour une certaine valeur λ_{max} . La loi de Wien (1893) stipule très précisément que le produit $\lambda_{max} T$ est une constante :

$$\lambda_{max} \approx \frac{0.2898}{T} \text{ cm}$$

Ainsi, quand la température augmente, le maximum se déplace du côté des petites longueurs d'onde.

Loi de Stefan

La connaissance de la fonction de Planck donnant u_λ permet de calculer L_λ et donc le pouvoir émissif E total du corps noir (puissance totale rayonnée par unité de surface), voir la référence [2] :

$$E = \int_0^\infty E(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

avec $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.671 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ la constante de Stefan.

1.2 Expériences qualitatives : absorption et émission du rayonnement, infrarouge, cube de Leslie

Absorption du rayonnement

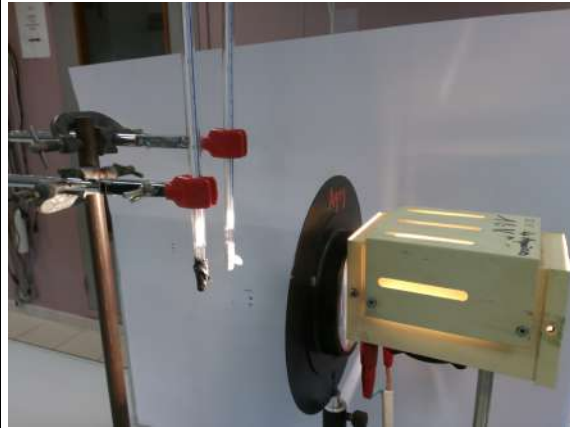
Matériel :

Une lampe à incandescence puissante

Une lentille convergente (condenseur)

Deux thermomètres à mercure dont les réservoirs sont recouverts d'un ruban adhésif blanc pour l'un et noir pour l'autre.

On réalise le montage de la figure. À l'aide du condenseur on éclaire les deux thermomètres. On constate que la température du thermomètre noirci est plus élevée : le ruban adhésif noir augmente le coefficient d'absorption



Absorption et émission du rayonnement

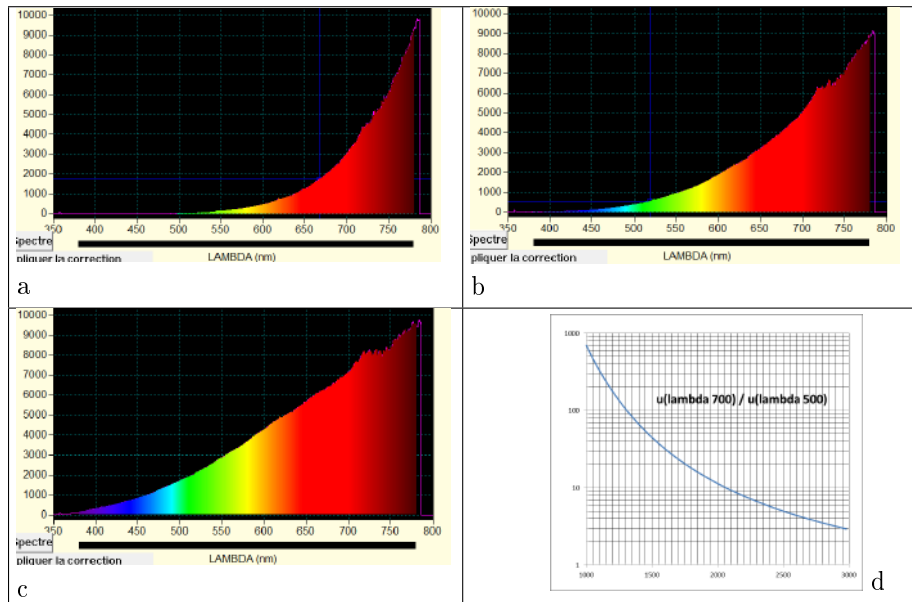
Infrarouge + visible

Matériel : Lampe à incandescence 12V (QI 20W ou 50W)	Alimentation continue variable 0 12V 5A spectro à fibre
--	---

Observer le spectre lorsque U augmente de 0 à 14V, ajuster la distance fibre/lampe pour avoir la bonne sensibilité

ATTENTION : **Utiliser le fichier correction de sensibilité**

Images des spectres pour 2.1V, 6V, 14V

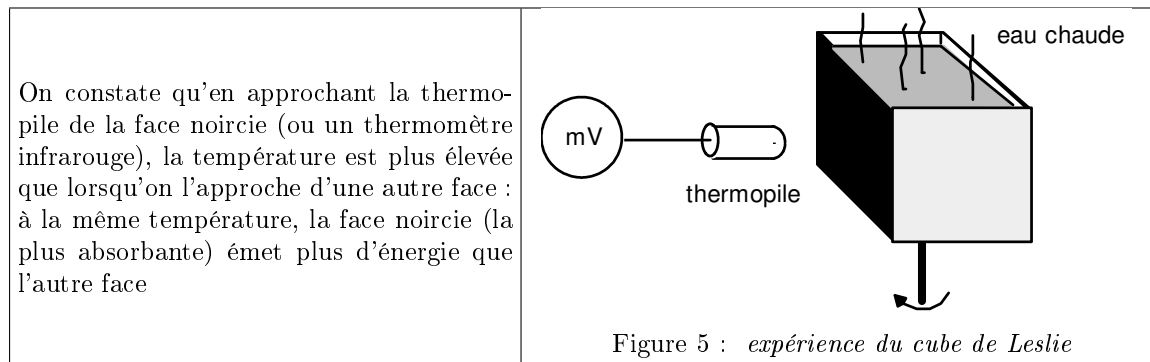


En utilisant la loi de Planck dans un tableau Excel on trace $u_{700\text{nm}}/u_{500\text{nm}}$ en fonction de T , on pourra alors remonter à la température du filament en prenant le rapport $u_{700\text{nm}}/u_{500\text{nm}}$ sur la courbe **d** de la figure et comparer avec le résultat de la dernière partie

Cube de Leslie

Matériel :

Une cuve dont l'une des faces est noircie (cube de Leslie), une autre brillante
 Une thermopile ou un autre capteur de température dont la surface est noircie
 De l'eau (très) chaude



1.3 Expérience quantitative : vérification de la loi de Stefan

Matériel :

Une lampe à filament de tungstène 12V 50W Philips M74 (<http://radiospares-fr.rs-online.com/web/p/capsules-halogenes/0743864/>)

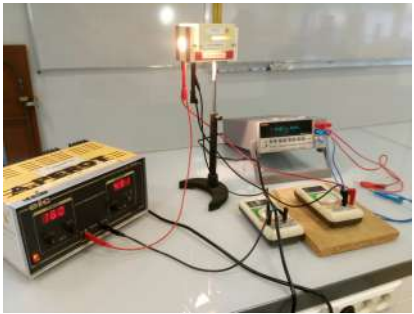
Un voltmètre, un ampèremètre ou une pince ampèremétrique,

Un ohmmètre 4 points

Une alimentation continue variable 0 30V : 10A

Un thermomètre

L'article en référence [1] *Gitton et de Izarra* http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=20695 décrit très bien la manipulation.

<p>Mesurer la résistance R_0 de la lampe à froid (sans l'allumer), si possible avec l'ohmmètre à 4 points. Pour déduire la température T de la lampe, on mesurera sa résistance $R(T)$ dont on connaît la dépendance avec la température. Celle-ci est donnée dans l'article [1] pour un filament de tungstène :</p> $R(T)/R_0 = -0.524 + 0.00466T + 2.8410^{-7}T^2$ <p>La température est extraite de cette équation du 2^{ème} degré. En faisant varier U et I, on trace $UI = f(T)$ que l'on compare avec une loi en T^4.</p>	
---	--

La modélisation en T^4 est meilleure lorsqu'on prend $T > 1600\text{K}$ car le rayonnement est prédominant, si on veut une zone de température plus large (vers les « basses » températures), il faut tenir compte de la conduction et de la convection avec une modélisation du type $P = A(T - T_0) + BT^n$ (avec Latis par exemple).

2 Conduction thermique

2.1 Aspects qualitatifs

On présente quelques manipulations montrant qualitativement comment peut s'effectuer la conduction thermique dans un solide. Rappelons que le transfert d'énergie cinétique se produit au sein du solide sans transfert de matière et qu'il est caractérisé par son coefficient de conductivité thermique λ .

On constate que le transfert thermique s'effectue des régions chaudes vers les froides. La densité de flux thermique $\mathbf{j}_Q = -\lambda \text{grad}(T)$ est proportionnelle au gradient de température (loi de Fourier).

Expériences

Les diverses tiges (cuivre, laiton, aluminium, fer) ont des conductivités différentes. Dans le dispositif de la *photo (a)* on chauffe le centre et les divers bouchons "collés" avec de la paraffine se détachent successivement dans le temps : cela met en évidence les meilleurs conducteurs et les moins bons.

En plongeant la base des diverses tiges *photo (b)* (qui comportent des thermomètres à cristaux liquides) dans de l'eau chaude, on observe au cours du temps la diffusion de l'énergie thermique.



Photo a



Photo b

Dans ces 2 expériences qualitatives qui dépendent du temps, on n'oubliera pas que le paramètre pertinent est la diffusivité thermique $k = \lambda/\rho c$, où ρ est la masse volumique du métal et c la capacité calorifique. Dans le choix des quatre métaux, il se trouve que les conductivités et les diffusivités sont dans le même ordre.

2.2 Aspects quantitatifs : mesure de conductivité

Dans cette expérience, on se propose de vérifier la loi de Fourier $\mathbf{j} = -\lambda \text{grad}T$, où \mathbf{j} est la densité de flux thermique et λ la conductivité du matériau étudié.

On utilise la malette « Transfert d'énergie thermique » commercialisée par Jeulin comprenant 2 blocs parallélépipédiques en acier inox (et 2 autres en aluminium) de même taille 30 x 55 x 10 mm. Deux tiges filetées en plastiques ont été prévu pour permettre de manipuler les blocs chauds. Chaque bloc dispose d'une cavité dans laquelle on insère une sonde thermométrique. On choisira préférentiellement des sondes fines pour minimiser leur influence sur l'évolution de la température de chaque bloc. La mesure des températures de chaque bloc au cours du temps permet de déterminer la conductivité thermique du matériau que l'on aura intercalé entre les deux blocs portés initialement à des températures différentes.



Modélisation

A une dimension, la loi de Fourier que l'on veut vérifier se traduit par : $j = -\lambda \frac{dT}{dx}$.

T_1 est la température du bloc chaud, T_2 celle du froid. Le flux thermique qui s'écoule de **1** vers **2** vaut : $\phi = jS$. Nous ferons les approximations suivantes :

- Le problème étant à une dimension, la composante utile de $\text{grad}T$ qui vaut $\frac{dT}{dx}$ sera approchée par $\frac{dT}{dx} \approx \frac{T_2 - T_1}{L}$ (hypothèse de quasi-stationnarité) où L est l'épaisseur du matériau étudié soit $\phi = -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{L}$.
- Par ailleurs, le flux thermique qui s'écoule de **1** vers **2** vaut : $\phi = jS$. Si on suppose qu'il n'y a pas de fuites thermiques latérales, l'intégralité de l'énergie thermique transférée de **1** vers **2** provient de **1** et on a donc : $\phi = -\frac{\delta Q_1}{dt} = -mc \frac{dT_1}{dt}$, mais on peut aussi écrire que $\phi = \frac{\delta Q_2}{dt} = mc \frac{dT_2}{dt}$, où mc est la capacité thermique de chaque bloc.
- En additionnant les deux expressions de ϕ , on peut écrire :

$$2\phi = mc \left(\frac{dT_2}{dt} - \frac{dT_1}{dt} \right) = -2\lambda S \frac{T_2 - T_1}{L}$$

soit :

$$\frac{d(T_1 - T_2)}{dt} = -2\lambda S \frac{T_1 - T_2}{mcL}$$

dont la solution est une exponentielle

$$T_1 - T_2 = A \exp \left(- \frac{2\lambda S}{mcL} t \right)$$

A l'aide du logiciel Générïs, la modélisation de la mesure de $T_1 - T_2$ en fonction du temps par cette solution exponentielle permet de déterminer la conductivité thermique du matériau étudié.

2.3 Conduction et convection : expérience de Ingen-Housz

Pour mettre en évidence à la fois la conduction et la convection, on pourra réaliser l'expérience historique de Ingen-Housz qui a permis de déterminer la conductivité thermique de différents matériaux. L'expérience est décrite dans le fichier "TPconductiondiffusion.pdf" sur la page *Amétice [18]-S1-MEEF-Thermodynamique (JM Roussel)*.

3 Enthalpies de changement d'état

L'enthalpie de changement d'état (encore parfois appelée chaleur latente de changement d'état), molaire ou massique, est la quantité de chaleur nécessaire à l'unité de quantité de matière (mole) ou de masse (kg) d'un corps pur pour qu'il change d'état, cette transformation ayant lieu à pression constante. Le but de ce TP est de mesurer cette quantité pour deux changements d'état de l'eau :

1. Pour le passage de l'état solide à l'état liquide (on parlera d'enthalpie de fusion) par calorimétrie.
2. Pour le passage de l'état liquide à l'état de vapeur (on parlera d'enthalpie de vaporisation) en mesurant simultanément la pression et la température à la coexistence des phases (à l'ébullition).

3.1 Chaleur latente de fusion de la glace

Une masse m de glace à la température de $\theta_{fus} = 0$ °C est introduite dans le calorimètre contenant une masse d'eau m_e à la température θ_0 . Soit θ_f la température du calorimètre à la fin de l'expérience; l'équation calorimétrique s'écrit :

$$(m_e c_e + C)(\theta_f - \theta_0) + m c_e (\theta_f - \theta_{fus}) + m L_f = 0 \quad (1)$$

où c_e est la capacité thermique massique de l'eau, C la capacité thermique du calorimètre, et L_f la chaleur latente massique de fusion de la glace.

La masse m de glace introduite est déterminée par pesée du calorimètre avant et après introduction de la glace. Les morceaux de glace utilisés sont retirés d'un mélange de glace et d'eau en équilibre et doivent être séchés avec du papier filtre. On comparera la valeur de L_f mesurée à sa valeur théorique (334 kJ/kg).

- Représenter l'évolution de la courbe de température attendue lorsque l'on plongera les glaçons.
- En utilisant la méthode des mélanges, déterminer la capacité thermique du calorimètre.
- Pour minimiser l'effet des échanges de chaleur avec le milieu extérieur, la méthode de compensation de Rumford sera employée. Estimer θ_0 pour que les conditions d'application de la méthode soient remplies.
- Déterminer la chaleur latente massique de fusion de la glace.

Mesure de la capacité thermique C du calorimètre et de ses accessoires.

Le calorimètre et ses accessoires participent aux échanges d'énergie. Avant toute mesure calorimétrique, il nous faut donc déterminer la capacité thermique (en J K^{-1}) du calorimètre que l'on utilise. Plusieurs méthodes permettent de déterminer C :

- méthodes des mélanges : on applique la méthode des mélanges avec deux masses d'eau différentes :
 - 1er temps : calorimètre + m_1 eau, température = θ_1 (inférieure si possible de qq kelvins à la température ambiante par exemple)
 - 2ème temps : on ajoute m_2 eau à $\theta_2 > \theta_1$.
 - 3ème temps : la température finale est θ_f . Le bilan donne

$$(m_1 c_0 + C)(\theta_f - \theta_1) + m_2 c_0 (\theta_f - \theta_2) = 0$$

. La capacité thermique du calorimètre est donc donnée par :

$$C = m_2 c_0 \frac{\theta_2 - \theta_f}{\theta_f - \theta_1} - m_1 c_0$$

Ordres de grandeur : $m_1 = 0.10$ kg, $m_2 = 0.15$ kg, $c_0 (= c_{eau}) = 4180 \text{ J.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $\Delta\theta \approx 10C$

- par pesée : C est déterminée en pesant l'enceinte intérieure du calorimètre et en multipliant la masse obtenue par la capacité thermique massique du métal constituant l'enceinte.
- méthode électrique : On apporte une quantité connue d'énergie à une masse connue d'eau, en maintenant une tension électrique U constante au borne d'une résistance R plongeant dans cette masse d'eau. On repère la température θ de l'eau, qui est aussi celle de la résistance de chauffage, du calorimètre et de la

sonde thermométrique, l'ensemble étant toujours en équilibre thermique. Le système considéré est formé par le calorimètre et son appareillage et la masse m_e d'eau. La puissance électrique apportée vaut

$$P_e = \frac{U^2}{R}$$

La puissance thermique mise en jeu par le système vaut

$$P_t = (m_e c_e + C) \frac{d\theta}{dt}$$

Avec : m_e masse de liquide, c_e capacité thermique massique de liquide, C capacité thermique de l'ensemble résistance + calorimètre + sonde thermique (on supposera que la contribution de la résistance et de la sonde sont négligeables). S'il n'y a pas de perte,

$$P_e = P_t$$

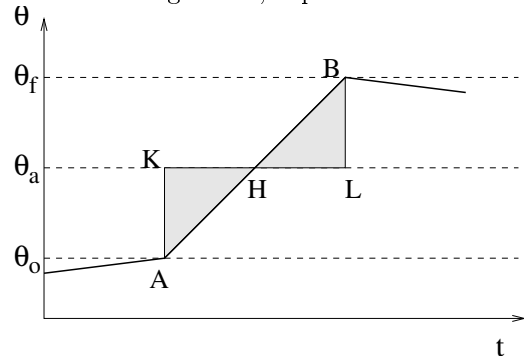
Si la tension d'alimentation est constante, les points acquis par ordinateur θ en fonction du temps sont à peu près alignés ; une modélisation par une droite de $\theta(t)$ de pente $a = \frac{d\theta}{dt}$ permet d'en déduire la valeur de C :

$$C = \frac{U^2}{Ra} - m_e c_e$$

Méthode de Rumford

Le calorimètre, bien que limitant les échanges d'énergie avec l'extérieur, n'est pas parfait. Si on place de l'eau plus chaude que la température ambiante à l'intérieur, il y aura une perte d'énergie vers l'extérieur : l'eau refroidit. Réciproquement, si l'eau à l'intérieur est plus froide que la température ambiante, il y aura transfert d'énergie depuis l'extérieur. Ces échanges d'énergie sont une source d'erreur importante pour la mesure de la chaleur latente de fusion de l'eau, puisque l'équation calorimétrique (1) suppose que ces échanges avec le milieu extérieur sont nuls. Pour limiter la quantité totale de chaleur échangée avec le milieu extérieur, la méthode de compensation de Rumford préconise que les températures initiale et finale se situent de part et d'autre de la température ambiante, comme dans le cas illustré sur la figure. Les quantités de chaleur reçues du milieu extérieur par le calorimètre sont alors positives pendant la première partie de l'expérience et négatives dans la deuxième partie. De plus, comme la température initiale et la température finale sont situées symétriquement de part et d'autre de la température ambiante, la somme des quantités de chaleur échangées est sensiblement nulle. Ceci se vérifie (voir figure) si l'on admet que la variation d'enthalpie due aux pertes pendant la durée $t_f - t_0$ est de la forme

$(W + Q)_{perte} = - \int_{t_0}^{t_f} [a + b(\theta(t) - \theta_a)] dt$ où θ_a est la température ambiante, a et b sont de coefficients positifs à déterminer dépendant de l'origine diverse des pertes (rayonnement, convection, puissance de l'agitateur, vaporisation.



Exemple schématique de l'évolution de la température dans le calorimètre lorsque l'on y introduit un corps chaud à l'instant θ_A . Le terme de perte $(W + Q)_{perte} \propto \text{aireHBL} - \text{aireHAK}$ est réduit lorsque l'on applique la méthode de Rumford. Avec un "mauvais" calorimètre une mesure correcte reste possible.

3.2 Chaleur latente de vaporisation de l'eau.

La chaleur latente massique de vaporisation est donnée par la formule de Clausius-Clapeyron qui vous sera démontrée en cours :

$$L_v = T(v_g - v_l) \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\text{coex}}$$

où T est la température en Kelvin lors du changement d'état, v_g et v_l les volumes massiques des phases gazeuse et liquide respectivement, et $(\partial P/\partial T)_{\text{coex}}$ représente la variation de pression avec la température à la coexistence des phases liquide/vapeur.

Protocole expérimental Pour déterminer la valeur de la chaleur latente de vaporisation L_v de l'eau, il suffit d'après la formule de Clausius-Clapeyron de déterminer expérimentalement la valeur du terme $(\partial P/\partial T)_{\text{coex}}$ lors du changement d'état.

Pour mesurer $(\partial P/\partial T)_{\text{coex}}$ lors de la vaporisation, il nous faut effectuer des mesures simultanées de pression P et de température T à la coexistence des phases vapeur et liquide. On dispose pour cela d'un ballon dans lequel on place environ 120 ml d'eau liquide. Le ballon est relié à un capteur de température et un capteur de pression. Après avoir amené l'eau à ébullition, le ballon est ensuite fermé et retiré du chauffe-ballon. La température et la pression diminuent, l'ébullition se poursuit, le système parcourt la ligne (P,T) de coexistence des phases liquide / vapeur. On enregistrera pendant 20 secondes la pression et la température en fonction du temps (logiciel Génériss). Avant d'exploiter vos résultats, n'oubliez pas de rétablir la pression atmosphérique dans le ballon.

Remarque : Afin d'obtenir un graphique P en fonction de T exploitable, il est recommandé de ne pas effectuer l'expérience dès l'apparition de l'ébullition, mais d'attendre un peu afin que le système s'homogénéise. On pourra par exemple regarder la température de la vapeur. Il faut aussi penser à bien écarter le chauffe ballon afin d'éviter de chauffer par rayonnement.

Exploitation des résultats

- Tracer le graphique P (en Pa) en fonction de T (en K). En déduire la valeur de $(\partial P/\partial T)_{\text{coex}}$ à la température de 100 °C.
- En notant que v_l peut être négligé devant v_g , on pourra écrire une expression simplifiée de L_v en fonction de P , T , et $(\partial P/\partial T)_{\text{coex}}$ en assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait. En déduire la valeur de la chaleur latente de vaporisation L_v de l'eau en J/mol puis en J/kg.
- Comparer avec la valeur théorique de L_v pour l'eau (2258 kJ/kg).

4 Phénomène de transport : diffusion de la glycérine dans l'eau

Pour mettre en évidence expérimentalement le phénomène de diffusion, on pourra réaliser l'expérience historique de Wiener qui a permis de déterminer les coefficients de diffusion dans les liquides. L'expérience est décrite dans le fichier "TPconductiondiffusion.pdf" sur la page *Amétice [18]-S1-MEEF-Thermodynamique (JM Roussel)*.

5 Les programmes et les sujets de MSP 2018

2 ^{nde}	
LA PRATIQUE DU SPORT : Loi de Boyle-Mariotte, un modèle de comportement de gaz, ses limites.	Savoir que, à pression et température données, un nombre donné de molécules occupe un volume indépendant de la nature du gaz.
L'UNIVERS : Les spectres d'émission et d'absorption : spectres continus d'origine thermique, spectres de raies.	Savoir qu'un corps chaud émet un rayonnement continu, dont les propriétés dépendent de la température.
1 ^{ère}	
Sources de lumière colorée : Couleur des corps chauffés. Loi de Wien. Spectre solaire.	Exploiter la loi de Wien, son expression étant donnée. Expliquer les caractéristiques (forme, raies) du spectre solaire.

Formes et principe de conservation de l'énergie : Frottements ; transferts thermiques ; dissipation d'énergie. Formes d'énergie Principe de conservation de l'énergie.	Connaître diverses formes d'énergie. Exploiter le principe de conservation de l'énergie dans des situations mettant en jeu différentes formes d'énergie.
T S	
Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques : Capacité thermique. Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique. Résistance thermique. Notion d'irréversibilité. Bilans d'énergie.	Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé. Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique. Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces. Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.
Rayonnements dans l'Univers Absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre	Extraire et exploiter des informations sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements dans l'Univers. Connaître des sources de rayonnement radio, infrarouge et ultraviolet.
1ere STL-STI2D (physique/chimie)	
Gestion de l'énergie dans l'habitat Énergie interne ; température. Capacité thermique massique.	<ul style="list-style-type: none"> - Mesurer des températures. - Citer les deux échelles principales de températures et les unités correspondantes. - Associer la température à l'agitation interne des constituants microscopiques. - Associer l'échauffement d'un système à l'énergie reçue, stockée sous forme d'énergie interne. - Exprimer la variation d'énergie interne d'un solide ou d'un liquide lors d'une variation de température. - Définir la capacité thermique massique.
Gestion de l'énergie dans l'habitat Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique, résistance thermique. Caractéristiques thermiques des matériaux.	<ul style="list-style-type: none"> - Prévoir le sens d'un transfert thermique entre deux systèmes dans des cas concrets ainsi que leur état final. - Décrire qualitativement les trois modes de transferts thermiques en citant des exemples. - Réaliser expérimentalement le bilan thermique d'une enceinte en régime stationnaire. - Expliciter la dépendance entre la puissance rayonnée par un corps et sa température. - Citer le lien entre la température d'un corps et la longueur d'onde pour laquelle l'émission de lumière est maximale. - Mesurer l'énergie échangée par transfert thermique.

<p>Propriétés des matériaux Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique. Conductivité thermique des matériaux. Résistance thermique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Décrire qualitativement les trois modes de transferts thermiques en citant des exemples. - Classer des matériaux selon leurs propriétés isolantes, leur conductivité thermique étant donnée. - Définir la résistance thermique. - Déterminer la résistance thermique globale d'une paroi d'un système constitué de différents matériaux.
T STL-STI2D (physique/chimie)	
<p>Gestion de l'énergie dans l'habitat : Énergie solaire : conversions photovoltaïque et thermique.</p>	<p>Citer les modes d'exploitation de l'énergie solaire au service de l'habitat.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Schématiser les transferts et les conversions d'énergie mises en jeu dans un dispositif utilisant l'énergie solaire dans l'habitat ; donner des ordres de grandeur des échanges.
<p>Les fluides dans l'habitat : États de la matière. Transfert thermiques et changements d'état. Transformations physiques et effets thermiques associés</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Différencier les différentes transformations liquide-vapeur pour l'eau : évaporation, ébullition. - Associer un changement d'état au niveau macroscopique à l'établissement ou la rupture d'interactions entre entités au niveau microscopique. - Utiliser un diagramme d'état (P, T) pour déterminer l'état d'un fluide lors d'une transformation. - Utiliser l'enthalpie de changement d'état pour effectuer un bilan énergétique.
T STL-SPCL	
<p>Des ondes pour observer et mesurer : Rayonnement et température.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Expliciter la dépendance entre la puissance totale rayonnée d'un corps et sa température. - Effectuer une mesure de température à l'aide d'une thermopile (capteur bolométrique), le protocole étant fourni.
<p>Thermodynamique : Modèle du gaz parfait. Premier principe et second principe de la thermodynamique. Irréversibilité.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Distinguer un échange d'énergie par travail et par transfert thermique. - Expliquer comment une compression ou une détente augmente ou abaisse la température d'un gaz. - Appliquer le principe de conservation de l'énergie à une machine ditherme. - Énoncer le second principe de la thermodynamique comme l'impossibilité d'un transfert thermique spontané d'une source froide vers une source chaude. - Énoncer et exploiter, dans le cadre du second principe, la relation entre les énergies échangées par transferts thermiques et les températures des sources pour une machine ditherme. - Définir, exprimer et calculer le rendement ou l'efficacité d'une machine thermique. - Distinguer le coefficient de performance d'une machine thermique de son efficacité thermodynamique. - Identifier des causes d'irréversibilité.

Flux thermique en régime permanent. Échangeur thermique.	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer expérimentalement le flux thermique échangé par les fluides dans un échangeur liquide-liquide. - Évaluer à partir de données expérimentales le coefficient global d'échange. Phénomènes de transport. <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en évidence expérimentalement le phénomène de diffusion. - Mettre en évidence expérimentalement l'influence de la température sur la diffusion.
---	---

Les sujets de MSP 2018 :

Première S	Comprendre et Agir	Élaborer une séquence pédagogique sur l'énergie, sa conservation et ses transferts.
Première STI2D et STL	Habitat	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Gestion de l'énergie dans l'habitat : Énergie interne; température. Capacité thermique massique. Transferts thermiques. Flux thermique.
Terminale SPCL	STL Des ondes pour observer et mesurer	Élaborer une séquence pédagogique sur la partie du programme : Observer : voir plus loin.

Références

- [1] Jean-Michel Gitton and Charles de Izarra. Température du filament d'une lampe à incandescence et pyrométrie optique. *B.U.P.*, 104 :547, 2010.
- [2] Lucien Quaranta. *Dictionnaire de Physique Expérimentale Tome II - La Thermodynamique.* Editions Pierron, 1990.