

Stroboscopie

Olympiades de la Physique 2007-2008

Lycée Victor Hugo Besançon

Élèves :

Vuillet Baptiste
Lemercier Baptiste

Professeurs

Ben Younes Malika
Jussiaux Jean-Michel

Conseiller scientifique

Tuloup Marc

Olympiades de la Physique 2007-2008

Lycée Victor Hugo Besançon

Élèves :

Vuillet Baptiste
Lemercier Baptiste

Professeurs

Ben Younes Malika
Jussiaux Jean-Michel

Conseiller scientifique

Tuloup Marc

Stroboscopie

Résumé

Il nous est arrivé, en regardant un film, d'observer des objets, qui dans la réalité sont en rotation, et qui dans le film semblaient fixes ou tournant à l'envers. Par exemple, des pales d'hélicoptères. Nous avons cherché la cause de ce phénomène, c'est un effet stroboscopique.

Nous avons réalisé plusieurs expériences mettant en évidence ce phénomène :

Une expérience classique avec un moteur électrique entraînant un disque noir et blanc et un stroboscope, qui permet d'**expliquer** le phénomène,

une expérience plus originale, utilisant un écran de téléviseur, qui permet d'estimer **sans instrument** la fréquence du spot,

une **simulation** à l'aide d'un tableur,

une stroboscopie de la chute de gouttes d'eau, que nous améliorons constamment et avec laquelle nous essayons d'étudier les **vibrations** des gouttes d'eau.

Nous avons aussi étudié la lumière émise par différentes lampes, tubes fluorescents, lampe à diodes, lampe à économie d'énergie... Certaines peuvent provoquer des effets stroboscopiques.

Stroboscopie de fréquences spatiales...

Nous avons découvert au cours de nos recherches que les physiciens effectuent actuellement de la stroboscopie attoseconde (10^{-18} s).

Mais il est arrivé à plusieurs élèves de la classe d'observer un phénomène stroboscopique à la lumière du jour, **sans stroboscope**. C'est d'ailleurs cette observation, évoquée en Travaux Personnalisés Encadrés de première S, qui nous a conduit à ce sujet d'Olympiades. Nous avons tenté de reproduire ce phénomène. Les interprétations des observations trouvées sur Internet semblent contradictoires.

Cela nous a amené à observer l'intérieur d'un projecteur de cinéma.

Plan

1. Définition
2. Expérience classique
 - Théorie
 - Réglages de l'oscilloscope
 - Observations, méthode de la fréquence maximale
 - Observations, méthode des deux fréquences
 - Observations, images multiples
3. Expérience utilisant un téléviseur à tube cathodique
 - Observations
 - Calculs
4. Stroboscopie par échantillonnage, simulation à l'aide d'un tableur
5. Stroboscopie de la chute de gouttes d'eau
 - 5.1. Les montages successifs
 - 5.2. Calculs
 - 5.3. Mesure du diamètre de la goutte
 - 5.4. Mesure du nombre de gouttes formées chaque seconde
6. Etude de la lumière de différentes lampes
7. Stroboscopie attoseconde
8. Stroboscopie sans stroboscope
 - Observations
 - Disque de Newton
 - Expérience
 - Interprétation
9. Observation d'un projecteur de film
10. Conclusion

1. Définition

Selon l'encyclopédie Universalis,

Stroboscopie : Technique permettant la visualisation de phénomènes périodiques matériels trop rapides pour être suivis par l'œil. Elle utilise une lampe émettant, à la fréquence f voisine de celle du phénomène F , des éclairs de durée beaucoup plus courte que la période du phénomène à étudier (afin que le mouvement observé soit insensible pendant la durée des éclairs). Entre deux éclairs, la pièce en mouvement accomplit ainsi un cycle et se retrouve très proche de la position qu'elle avait lors de l'éclair précédent.(...)

2. Expérience classique

2.1. Montage

Un disque est fixé sur l'arbre d'un moteur électrique dont la vitesse de rotation est ajustable. Ce disque porte une marque noire sur fond blanc. Le mouvement de la marque est donc **périodique**. Nous l'éclairons à l'aide d'un stroboscope. Nous relevons la fréquence indiquée sur le stroboscope. Pour valider nos résultats, nous fixons un morceau de carton noir dépassant du disque, et nous plaçons derrière une photodiode reliée à un oscilloscope.

Pour la présentation, le montage a été modifié, afin de servir en même temps à la stroboscopie des gouttes d'eau.

2.2 Théorie

Soit f_s la fréquence en herz du stroboscope et f_m celle du moteur. f_s et f_m sont deux nombres réels. Soit Δt une durée en secondes (nombre réel) telle que multipliée par f_s et f_m elle donne deux nombres entiers p et q . Ceci n'est réalisable physiquement que de manière approximative.

$f_s \cdot \Delta t = p$, $f_m \cdot \Delta t = q$. En choisissant une durée Δt la plus courte possible, p et q sont premiers entre eux, la fraction p / q est irréductible.

Pendant la durée Δt il se produit p flashes du stroboscope et le moteur fait q tours. Cela conduit à p images **différentes** du disque.

Si la fréquence f_s donnant une seule image fixe (donc $p = 1$) est maximale, le rapport f_s / f_m est maximal, p / q aussi et comme $p = 1$, q est minimal donc $q = 1$.

Donc : Si la fréquence du stroboscope est maximale et donne une seule image fixe, elle est égale à la fréquence du moteur.

Comment être sûr que f_s est maximale ? Il faut vérifier qu'aucune fréquence comprise entre f_s et $2 \cdot f_s$ ne donne une seule image fixe.

$2 \cdot f_s$ doit donner deux images fixes.

Cette méthode nécessite un stroboscope plus rapide que le moteur. Si ce n'est pas le cas, la méthode suivante convient :

On mesure deux fréquences f_{1s} et f_{2s} consécutives donnant une seule image fixe. La fréquence du moteur vaut : $f_m = (f_{1s} \cdot f_{2s}) / |f_{1s} - f_{2s}|$

Si f_s est légèrement trop grande, le mouvement apparaît ralenti et en sens inverse, si elle est légèrement trop petite, il semble ralenti, dans le vrai sens.

2.3. Réglages de l'oscilloscope

La photodiode dirigée vers une source de lumière est directement branchée sur l'oscilloscope. Nous observons une tension continue, quasi constante. Nous mettons l'entrée en mode AC, ce qui nous permet d'augmenter la sensibilité. Nous observons des pics négatifs quand le carton coupe une partie de la lumière.

Nous mémorisons le signal et mesurons la période à l'aide des curseurs. Nous trouvons 56 ms et 17 Hz, pour le variateur sur 30%.

Nous passons au mode FFT de mesure de fréquence. Nous diminuons la vitesse de balayage. Nous observons des pics à 17 Hz, 34 Hz, 51 Hz etc. Cette méthode est plus rapide.

Le moteur ayant un régime instable, l'un de nous règle le stroboscope, pendant qu'un autre effectue la mesure à l'oscilloscope.

2.4. Observations, méthode de la fréquence maximale

Nous obtenons une image unique fixe pour une fréquence de stroboscope de 5,383 Hz, 8,067 Hz et 16,1 Hz. 32 Hz donne deux images fixes. La fréquence du moteur est donc 16,1 Hz.

2.5. Observations, méthode des deux fréquences

$323 / 60 = 5,383$ Hz et $484 / 60 = 8,067$ Hz donnent $(5,383 \times 8,067) / (8,067 - 5,383) = 16,18$ Hz alors que la mesure directe à l'oscilloscope donne 16,15 Hz.

2.6. Observations, images multiples

Le stroboscope est à 26,98 Hz, le moteur à 16,1 Hz et nous observons **5 images fixes**. De $f_s \cdot \Delta t / f_m \cdot \Delta t = p / q = 5 / q$, nous tirons $\Delta t = 5 / f_s$, $\Delta t = 5 / 26,98$, d'où $\Delta t = 0,1853$ s. $f_m \cdot \Delta t = 16,1 \times 0,1853 = 2,983$ effectivement proche de l'entier 3 avec une erreur relative de $(3 - 2,983) / 3 = 0,5$ %.

Le stroboscope est à 26,15 Hz, le moteur à 17,7 Hz et nous observons **3 images fixes**. De $f_s \cdot \Delta t / f_m \cdot \Delta t = 3 / q$, nous tirons $3 = 26,15 \cdot \Delta t$, d'où $\Delta t = 0,1147$ s. $f_m \cdot \Delta t = 17,7 \times 0,1147 = 2,03$ effectivement proche de l'entier 2 avec une erreur relative de $(2,03 - 2) / 2 = 1,5$ %.

3. Expérience utilisant un téléviseur à tube cathodique

Nous-nous proposons de vérifier si la vitesse de balayage du spot est de 25 ou 50 ou 100 Hz, sans aucun matériel. D'après Cours de physique, Berkeley, Ondes, volume 3, page 36. Nous pouvons aussi vérifier grossièrement la fréquence d'actualisation du moniteur d'un ordinateur.

3.1. Observations

Nous agitions rapidement un doigt devant l'écran. Nous observons plusieurs images. Les images les plus écartées correspondent à la vitesse maximale du doigt.

A l'aide de battements cardiaques, nous estimons la fréquence de la main à environ 4 hertz. L'amplitude de l'oscillation est de 5 centimètres, la distance entre les images de 1 cm (environ 1/10 de la distance totale parcourue par la main).

3.2. Calculs

Supposons le mouvement de la main sinusoïdal : $x = a \cos(2 \pi f t)$. Alors, la vitesse $v = 2 \pi f a \sin(2 \pi f t)$ et sa valeur maximale est $v_m = 2 \pi f a$. La distance parcourue par le doigt entre deux passages du spot électronique est $d = v_m \cdot \Delta t = 2 \pi f a \Delta t$. La fréquence Fécran de passage du spot est $1 / \Delta t$. $\text{Fécran} = 2 \pi f a / d$. $\text{Fécran} = 2 \pi \cdot 4 \cdot 0,05 / 0,01 = 125$ Hz pour un téléviseur 100 Hz.

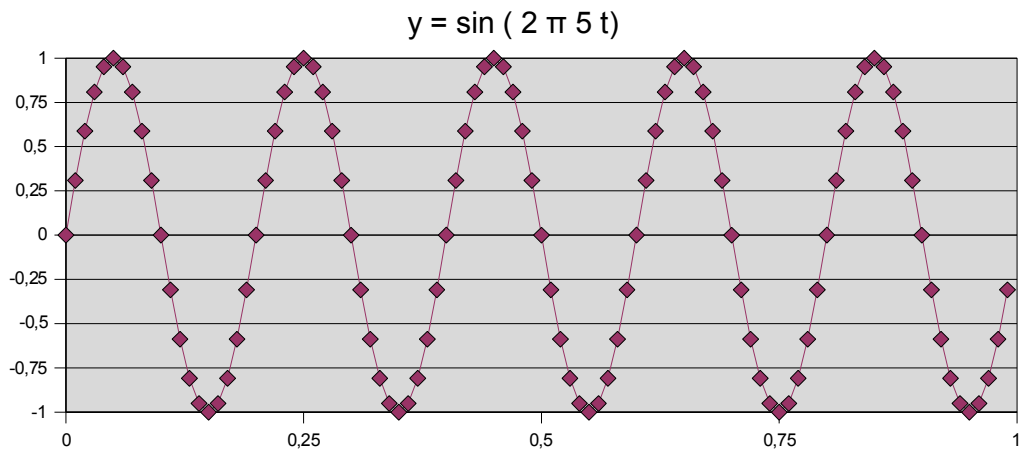
Pour un écran d'ordinateur, nous trouvons une distance de 1,5 cm entre deux images, soit une fréquence d'environ 82 Hz. Le menu Paramètres avancés de l'écran nous donne 80 Hz. Si le spot balayait l'écran à 25 Hz (25 images par seconde), la distance entre images serait de 4 cm.

3.3. Conclusion

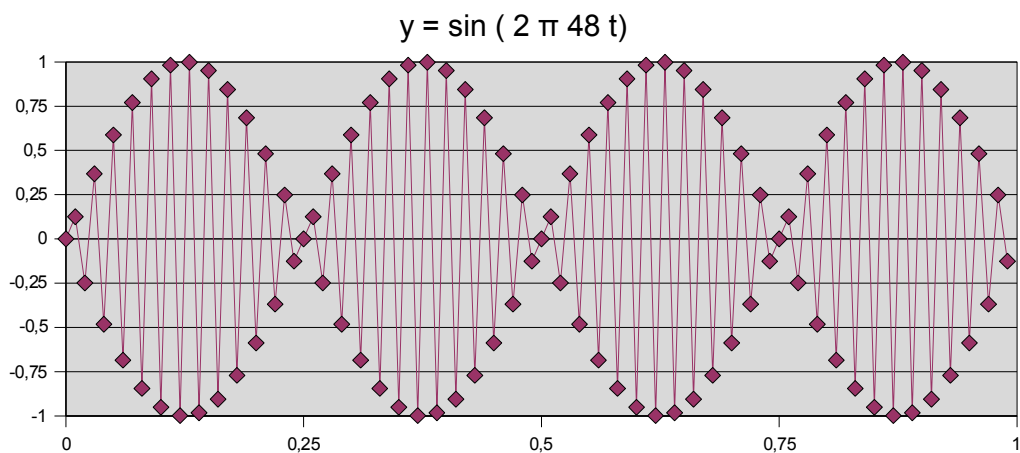
Cette méthode est peu précise, mais permet de distinguer immédiatement, et sans appareil de mesure, un balayage à 25 ou 50 ou 100 Hz.

4. Stroboscopie par échantillonnage, simulation à l'aide d'un tableur

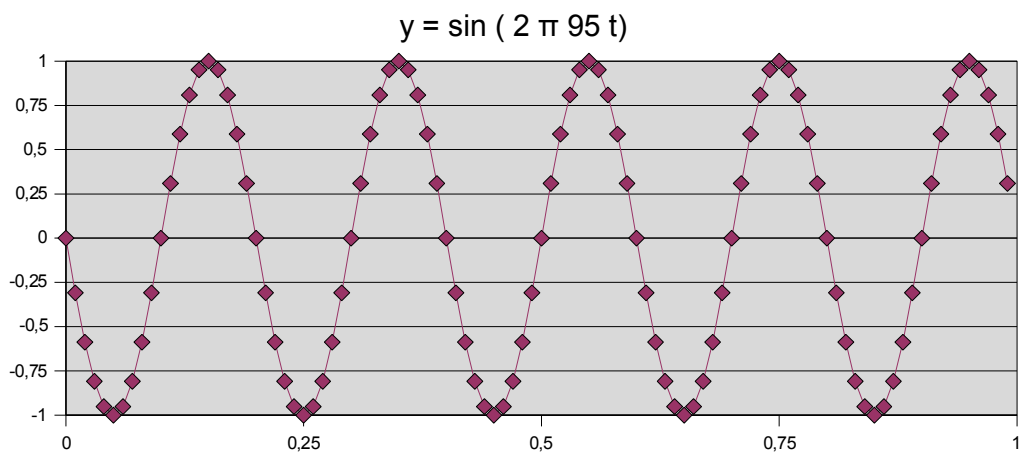
Nous représentons par 100 points la fonction $\sin (2 \pi f t)$ de $t = 0$ à $t = 1$ seconde ; cela revient à échantillonner à 100 Hz.



Pour $f_m = 5$ Hz, la représentation est correcte, en amplitude et fréquence. Cela correspond à stroboscooper rapidement un phénomène lent, ou à filmer un sujet bougeant lentement. Jusqu'à 20 Hz, le résultat est à peu près correct.

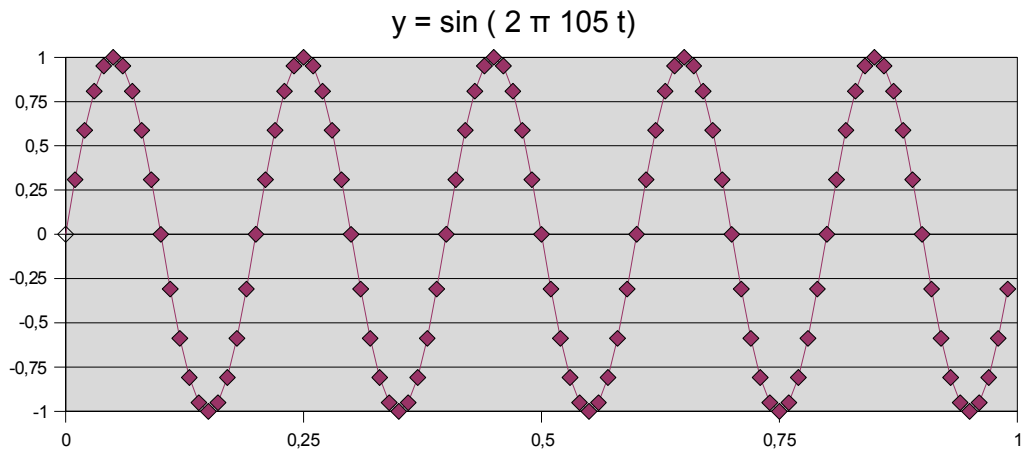


Pour $f_m = 48$ Hz, l'amplitude est incorrecte. Cela correspond à stroboscooper avec f_s légèrement supérieure à $2 \cdot f_m$, ce qui donne deux images tournant à l'envers.

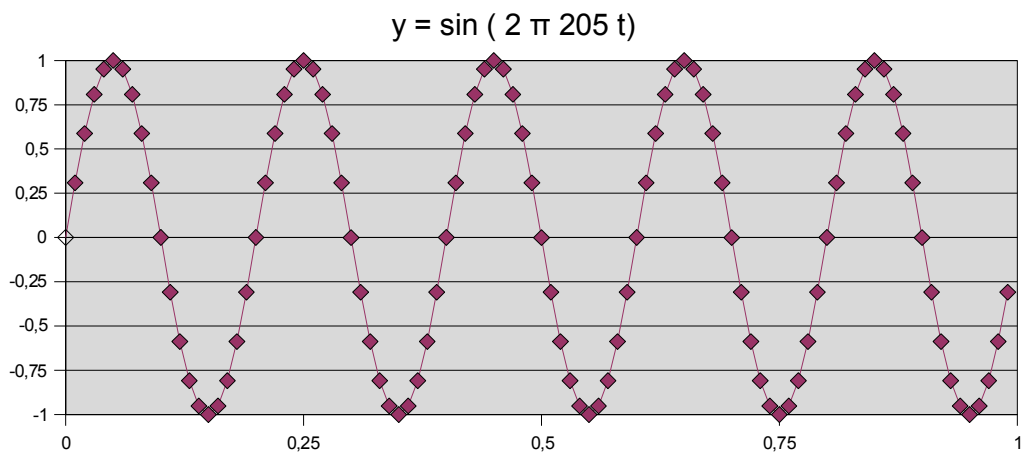


Pour $f_m = 95$ Hz, la fréquence est incorrecte. Cela correspond en stroboscopie à f_s légèrement

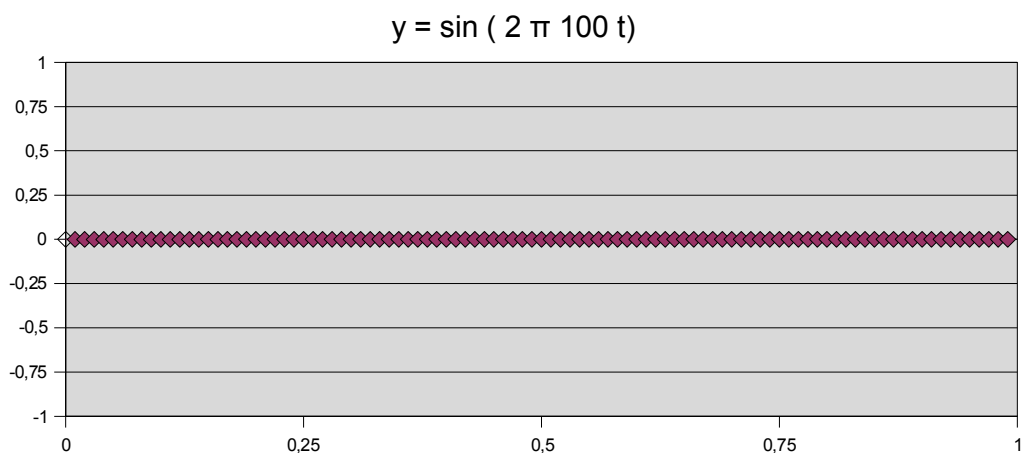
supérieur à f_m , donnant un mouvement ralenti (donc à fréquence très basse), inversé.



Pour $f_m = 105$ Hz, la fréquence est incorrecte. Cela correspond en stroboscopie à f_s légèrement inférieur à f_m , donnant un mouvement ralenti, dans le sens réel.

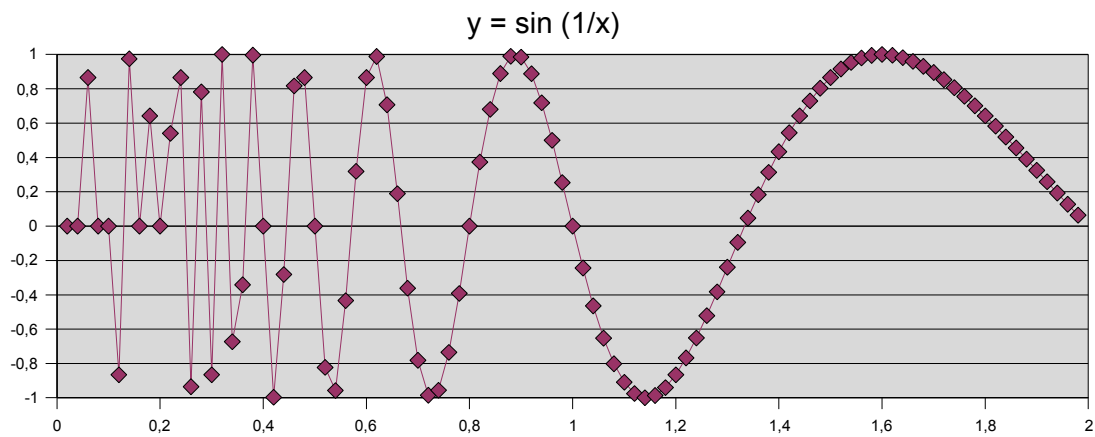


Pour $f_m = 205$ Hz, la fréquence est incorrecte. Cela correspond en stroboscopie à f_s légèrement inférieur à $f_m / 2$, donnant un mouvement ralenti, dans le sens réel.



Pour $f_m = 100$ Hz, la fréquence est incorrecte. Cela correspond en stroboscopie à f_s égal à f_m , donnant une image unique fixe.

Nous représentons à l'aide de 100 points la fonction $\sin(1/x)$



Observations

La représentation est aberrante lorsque $x < 0,4$

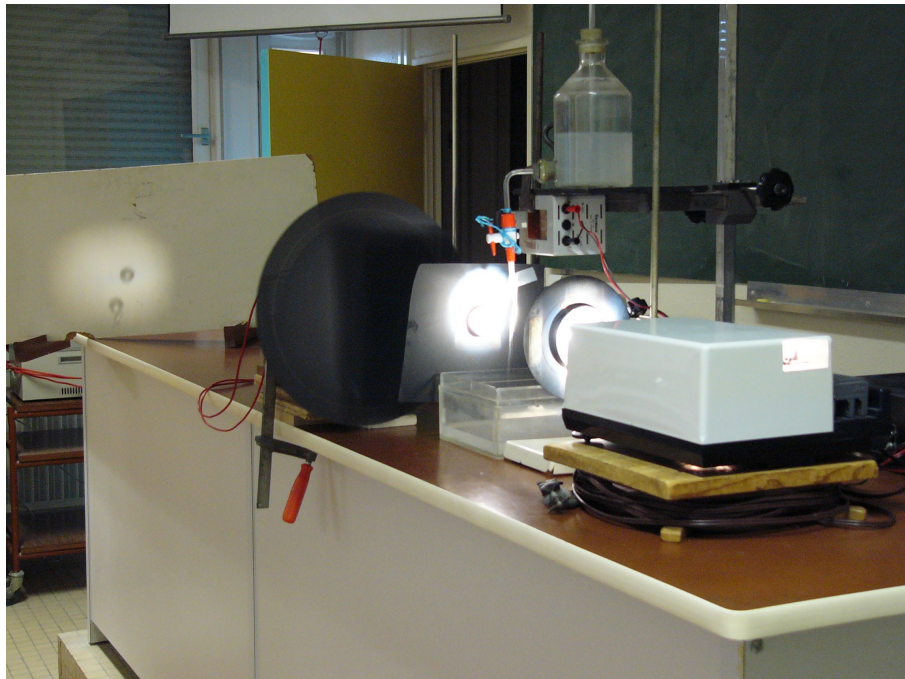
5. Stroboscopie de la chute de gouttes d'eau

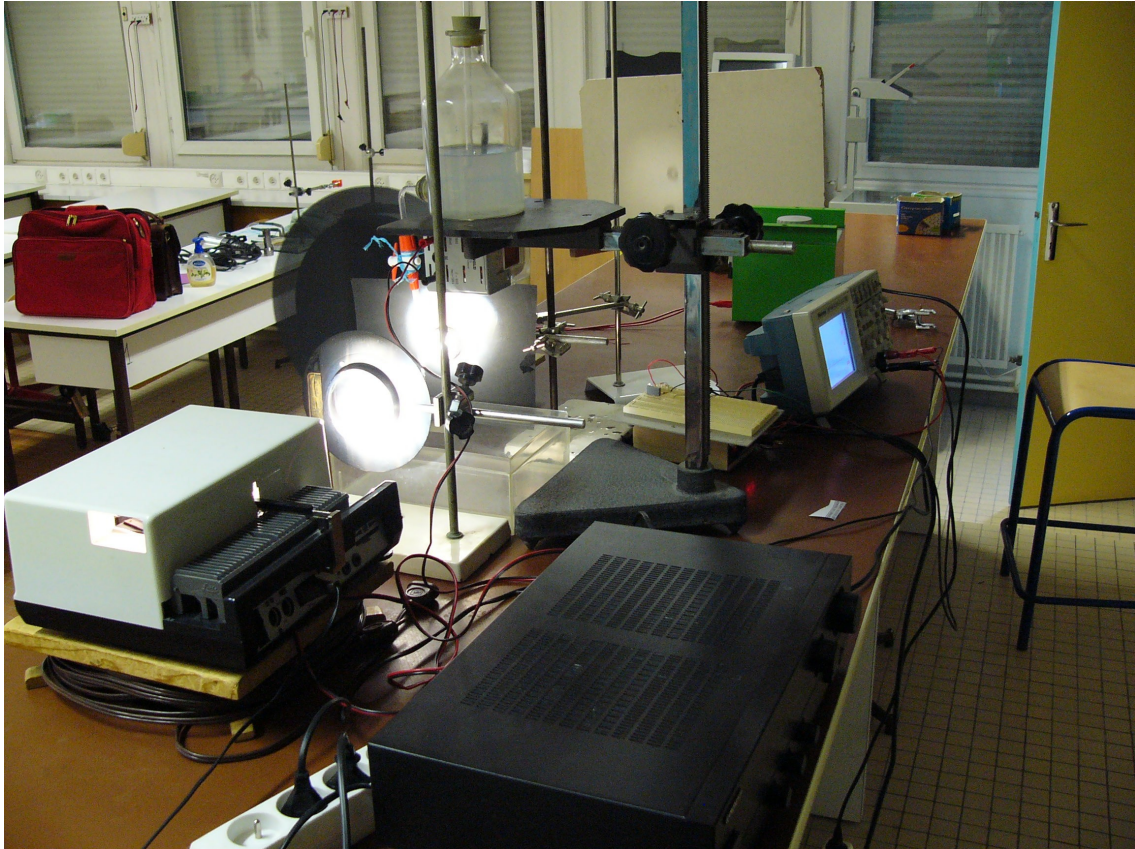
5.1. Les montages successifs

Ce montage nous donne beaucoup de mal et nous tentons constamment de l'améliorer.

Nous avons d'abord voulu "bloquer" la chute de gouttes d'eau, puis, constatant que les gouttes se déformaient, nous essayons de mesurer leur fréquence d'oscillation.

Le deuxième montage :





Nous réalisons un **vase à débit constant**, et un stroboscope formé de notre moteur entraînant un disque avec un trou, dans lequel passe la lumière d'un projecteur de diapositives.

La première fois, les gouttes ne tombent pas verticalement et la direction du jet est **aléatoire**.

Nous cherchons à résoudre ce problème imprévu.

Nous collons une **aiguille** contre la sortie de la burette. Le résultat est moins mauvais, mais parfois l'eau tourne autour de l'aiguille.

Nous ajoutons du **liquide lave-main** à l'eau. Le résultat est meilleur. Nous parvenons à immobiliser l'image de la goutte pour des fréquences de 28,8 Hz puis, avec un débit différent, 17,6 Hz.

Mais les gouttes n'ont pas la même taille, nous ne pouvons pas aller plus loin, le phénomène de formation des gouttes n'est **pas périodique**.

Notre conseiller scientifique évoque une **synchronisation** des gouttes et du stroboscope. Mais comment faire ?

Nous tentons quelque chose (montage 2) : Faire **vibrer la burette** à la fréquence du stroboscope pour faire tomber les gouttes. Une partie de la lumière sortant du stroboscope est captée par un miroir qui éclaire un phototransistor branché sur un amplificateur qui est raccordé à une bobine ; celle-ci attire un aimant fixé à la burette.

Nous parvenons à **immobiliser** les gouttes pendant de longs moments, et constatons que les gouttes semblent **osciller**.

Mais l'appareil finit par se **boucher**. L'eau du robinet et le liquide lave-main ont fait un dépôt.

Nous recommençons avec de l'eau distillée.

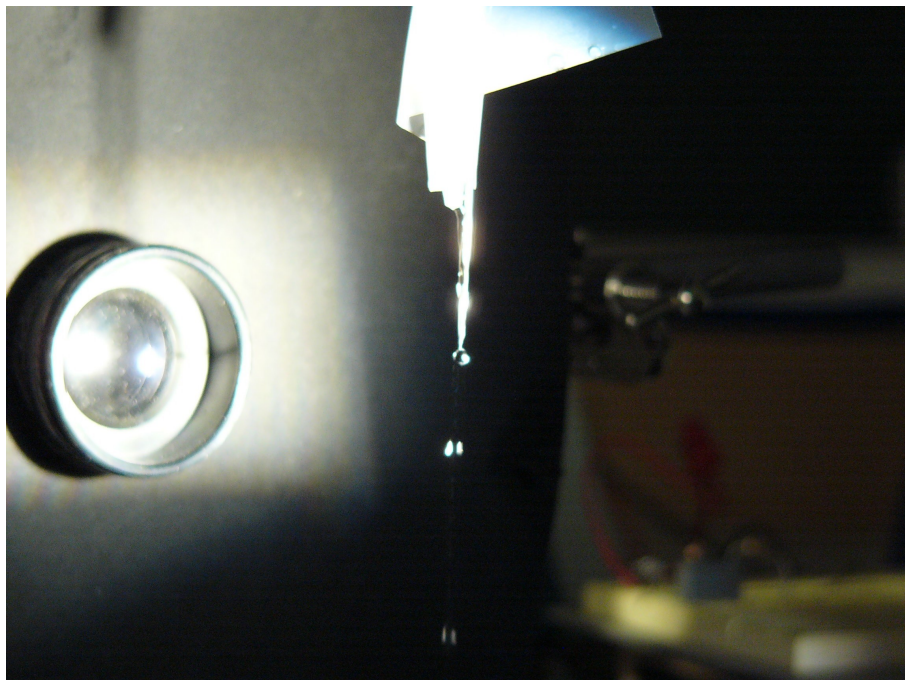
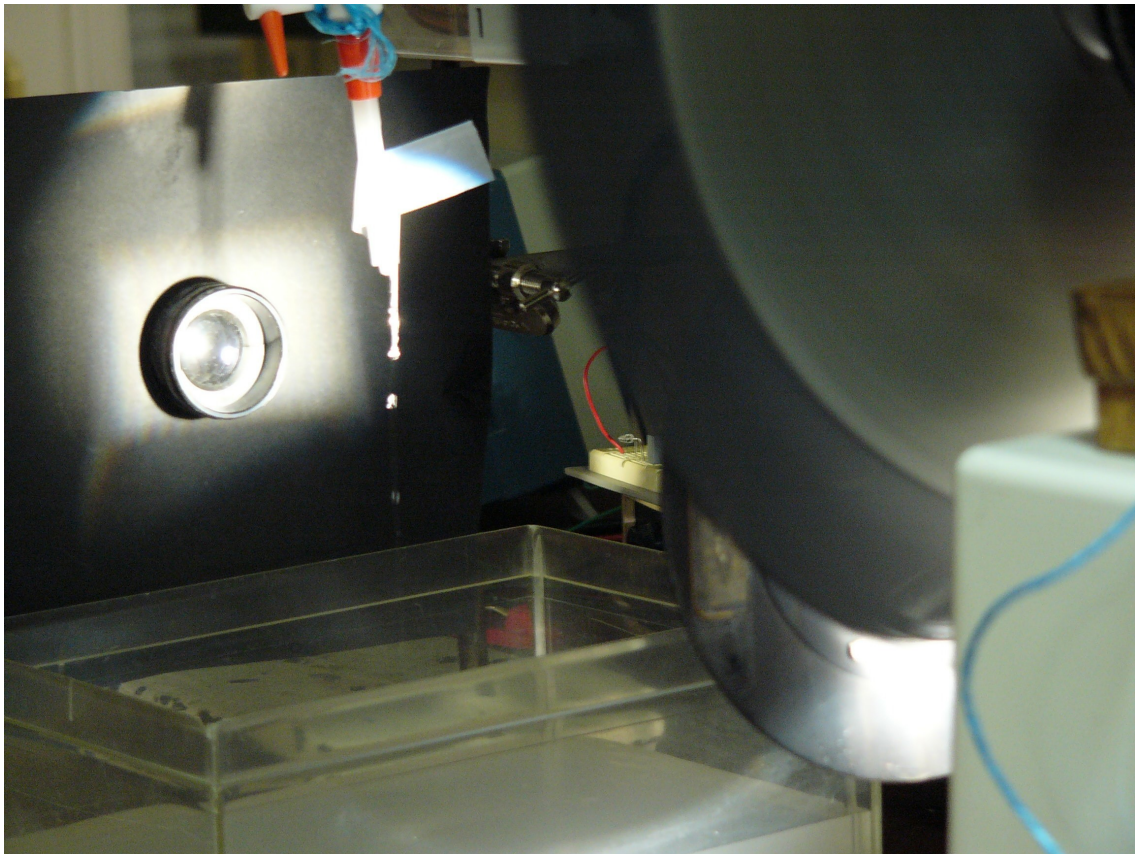
Nous ne voyons plus les gouttes vibrer et elles sont plus petites.

Avec notre conseiller scientifique, nous calculons sommairement, par une équation aux **dimensions**, la **fréquence** d'oscillation des gouttes. Elle est environ dix fois plus grande que celle du stroboscope.

Nous modifions plusieurs fois le montage :

Le stroboscope placé du côté de l'écran est ramené contre le projecteur, ce qui permet de voir directement les gouttes.

Troisième montage :



Quatrième montage : Le phototransistor est collé au stroboscope, dans une position réglable. Nous testons d'autres tubes pour former les gouttes.

5.2. Calculs

Supposons que la fréquence de vibration d'une goutte ne dépende que de sa masse (rayon r et masse volumique ρ) et de la tension superficielle de l'eau γ .

ρ est en kg.m^{-3} , r en m et γ en N/m soit kg.s^{-2} . Donc racine carrée de $\gamma / \rho.r^3$ est une fréquence.

Avec γ eau pure = 7.10^{-2} N/m , et une goutte de rayon 1mm, $f = 260 \text{ Hz}$, soit environ 10 fois la fréquence de notre stroboscope. Entre deux images fixes successives, la goutte a dû faire 10 oscillations.

5.3. Mesure du diamètre de la goutte

Une évaluation directe donne 2 mm.

L'image de la goutte sur l'écran a un diamètre de 3 cm. La focale de l'objectif est de 90 mm et il se trouve à 1,41 m de l'écran.

Calcul sommaire : En supposant que la goutte est à 90 mm de l'objectif, le diamètre de la goutte est :

$3.10^{-2} \times 90.10^{-3} / 1,41 = 1,9.10^{-3} \text{ m}$. Diamètre 1,9 mm, rayon 0,95 mm.

5.4. Mesure du nombre de gouttes formées chaque seconde

6. Etude de la lumière de différentes lampes

Nous collons la photodiode à diverses lampes.

Les tubes fluorescents de la salle donnent une tension constante de 2 V, avec des oscillations à 100 Hz, de 0,1 V crête à crête.

Le tube éclairant l'écran nous paraît moins "bon", il semble clignoter un peu. Nous trouvons 2 V avec du 100 Hz de 0,25 V crête à crête.

Lampe à diodes : Nous trouvons 0,8 V constant.

Lampe à économie d'énergie : Nous trouvons 2 V avec du 100 Hz de 0,02 V crête à crête.

Les lampes qui clignotent créent des effets stroboscopiques et sont interdites dans certains lieux comme les ateliers...

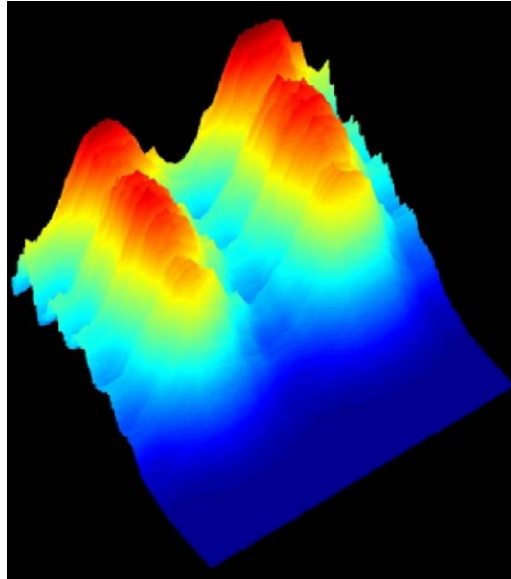
7. Stroboscopie attoseconde

Voir le site <http://www.celia.u-bordeaux1.fr/#>, dont nous avons extrait ce texte et ce graphique

"Tout comme les stroboscopes des discothèques décomposent nos mouvements (relativement lents), des flashes de lumière plus courts peuvent être utilisés pour suivre les mouvements d'objets plus rapides. Plus ces flashes lumineux sont courts et plus les mouvements observables peuvent être rapides. Les impulsions lumineuses femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) permettaient déjà de suivre les mouvements d'atomes oscillants dans les molécules. Les impulsions attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) donnent accès à l'évolution encore plus rapide des électrons dans les atomes et les molécules."

"L'équipe de E. Mével et E. Constant a développé une technique originale permettant de moduler temporellement la polarisation d'impulsions laser

ultracourtes et ainsi de produire les flash lumineux ultraviolets attosecondes les plus courts jamais créés, de l'ordre de l'unité atomique de temps (25 as). Ces résultats obtenus dans le cadre d'une collaboration européenne avec une équipe du Politecnico à Milan ont été publiés dans la revue Nature Physics [Sola *et al.*, Nature Physics **2**, 319 (2006)]. En utilisant la technique de modulation de polarisation avec une impulsion ultracourte (5 fs) dont la phase absolue est contrôlée, ils ont pu isoler à volonté une ou deux impulsions attoseconde et observer clairement la signature de ce confinement dans le domaine spectral."



8. Stroboscopie sans stroboscope

8.1. Observations

L'année dernière, lors de discussions en Travaux Pratiques Encadrés de première S, un élève avait déclaré à notre professeur avoir vu, dans la rue, à la lumière du jour, la roue d'une voiture tourner à l'envers. Il demandait l'explication de ce phénomène. Après discussion en groupe, il s'avère que deux d'entre nous ont déjà observé ce phénomène auquel nous ne trouvons pas d'explication. Nous allons tout d'abord essayer de le reproduire au laboratoire.

8.2. Disque de Newton

Nous lançons en rotation un disque de Newton. Nous observons attentivement en cherchant un éventuel effet inhabituel, sans nous préoccuper des couleurs.

Il se passe effectivement des choses bizarres :

à un moment quand le disque tourne encore assez vite, il nous semble voir des rayons se déplaçant relativement lentement,

quand le disque a nettement ralenti, les rayons semblent s'incurver, la partie éloignée du centre prenant de l'avance.

Mais le montage vibre et la vitesse ne peut pas être contrôlée.

8.3. Expérience

Nous réalisons un disque formé de 5 segments noirs et blancs. Quand il tourne à 2,4 Hz, soit $5 \times 2,4 = 12$ Hz, des effets curieux apparaissent. Mais chacun ne voit pas la même chose.

Parfois le disque semble tourner à l'envers, parfois les rayons semblent aller au ralenti, ou pas tous à la même vitesse. Dans tous les cas, les rayons apparaissent plus étroits qu'il ne sont.

Nous mettons un cache noir qui masque une partie du disque.

Nous cherchons sur Internet si d'autres que nous ont vu les mêmes phénomènes.

Nous trouvons les documents suivants :

Le journal du CNRS en MIDI-Pyrénées, juin 2005, n° 99, P. 3 : La perception du mouvement discrétisée sous l'effet de l'attention, un article peu clair et qui nous semble comporter des imprécisions à la fin (voir le paragraphe Observation d'un projecteur de film).

Nous-nous rendons sur le site indiqué, PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America) du 5 avril 2005. La première fois, nous ne pouvons lire qu'un résumé, le texte complet est payant. Le résumé n'est pas clair, mais ne comporte pas les imprécisions de l'article du CNRS.

La seconde fois, nous accédons gratuitement au document complet.

8.4. Interprétation

Les auteurs (Rufin VanRullen...) ont superposé deux objets au mouvement différent, par une méthode informatique, l'ordinateur étant relié à un moniteur LCD haute fréquence, entre 100 et 200 Hz.. Ils attribuent ce phénomène à un sous-échantillonnage du système visuel à environ 15 Hz, sous l'effet de l'attention.

Mais certains contestent cette interprétation.

9. Observation d'un projecteur de cinéma

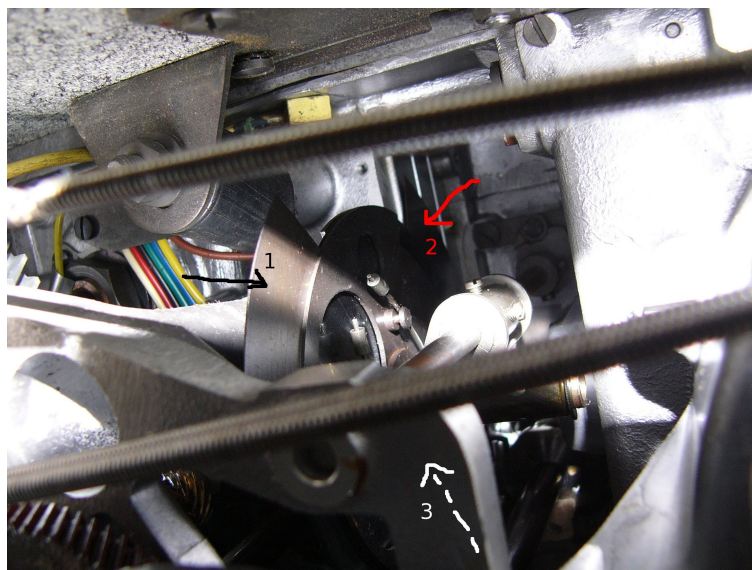
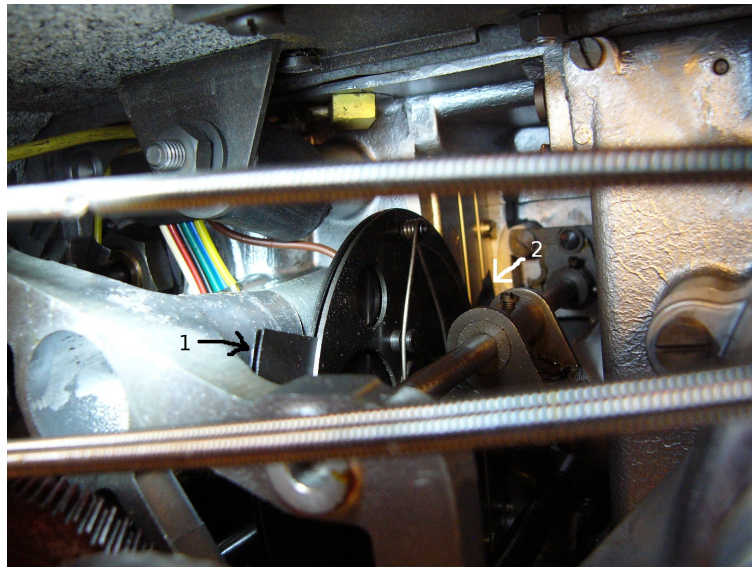
Ce projecteur 16 mm peut projeter des films à 16 ou 18 ou 24 images par seconde. La vitesse se règle par un stroboscope avec une lampe au néon.

Un bouton est marqué 2 ou 3.

Il modifie la roue qui tourne entre la lampe et l'objectif et qui comporte 2 ou 3 ouvertures. Cette roue fait office de stroboscope. Une griffe passe à l'image suivante au bout d'un tour. Chaque image est donc projetée 2 ou 3 fois.

$16 \times 3 = 48$ Hz ; $18 \times 3 = 54$ Hz ; $24 \times 2 = 48$ Hz.

Dans **tous les cas**, la projection ne saccade pas.



10. Conclusion

Nous avons découvert dans la stroboscopie un phénomène passionnant et la chute des gouttes d'eau se révèle bien plus difficile que prévu.