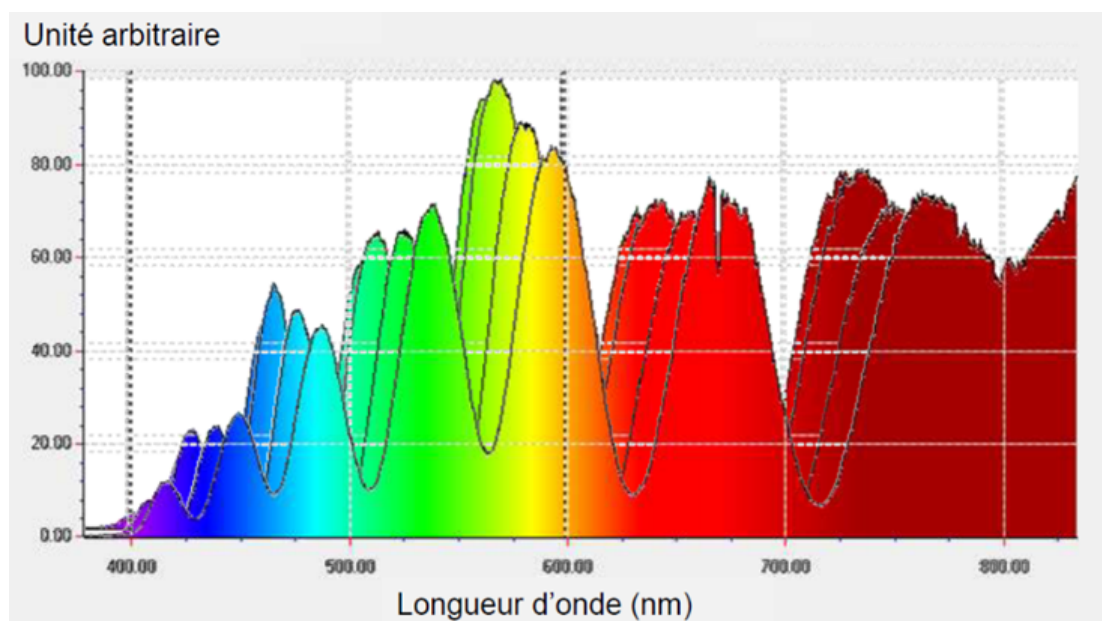


---

# 1,2,3... SCOTCHEZ... MESUREZ !

---



Liam CHAOUALI Julien MAILLE-PAEZ Arthur MOL Raphaël MOL

*Professeurs référents* : M. et Mme. Brunel, Mme. Dombrowski

LYCÉE MASSÉNA, 06000 NICE

2019 — 2020

# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I Théorie sur la biréfringence</b>	<b>4</b>
I.1 Les ondes lumineuses, des ondes électromagnétiques . . . . .	4
I.2 Interactions de la lumière entre le polariseur et le scotch . . . . .	4
I.3 Le phénomène de biréfringence . . . . .	6
<b>II Essais expérimentaux</b>	<b>10</b>
II.1 Le spectre de la lumière après traversée de plusieurs épaisseurs de scotch . . . . .	10
II.2 Essais expérimentaux selon la température . . . . .	12
<b>III Prototype, mesurer températures et vibrations</b>	<b>16</b>
III.1 La maquette et son fonctionnement . . . . .	16
III.2 Les Applications . . . . .	17
. . . . .	17
III.2.1 Mesure de vibration sur une vitre . . . . .	18
III.2.2 Mesure d'une variation de température . . . . .	18
<b>Sitographie</b>	<b>20</b>

# Introduction

Qui ne s'est jamais servi lorsqu'il était malade d'un thermomètre ? On ne prête souvent que peu d'intérêt à cet objet, tout au plus a-t-on une vague idée de son fonctionnement. Plusieurs phénomènes physiques différents expliquent son fonctionnement pour des applications privilégiées.

En assistant à une expérience de physique, sur la biréfringence du scotch, nous avons eu l'idée d'utiliser ces propriétés pour en faire un thermomètre. Plus précisément, il s'agirait de profiter d'une propriété physique de ce matériau, la biréfringence, phénomène rencontré lors de la traversée de ce dernier par des ondes lumineuses, pour déterminer sa température.

Pour mener à bien ce projet, il nous fallut donc comprendre dans un premier temps certaines propriétés de la lumière, indispensable à la biréfringence pour ensuite réaliser, après beaucoup d'expérimentations, un prototype fonctionnel.

# I Théorie sur la biréfringence

## I.1 Les ondes lumineuses, des ondes électromagnétiques

La lumière est une onde électromagnétique, composée d'un champ électrique ( $\vec{E}$ ) et un champ magnétique ( $\vec{B}$ ) perpendiculaires l'un à l'autre qui se propagent dans la direction d'un vecteur ( $\vec{k}$ ) qui leur est perpendiculaire, c'est pourquoi on la modélise par un trièdre direct. On peut seulement percevoir le champ électrique  $\vec{E}$  à l'œil nu, on se limitera donc à ce dernier pour commenter nos observations. L'étude au cours du temps de la direction et de l'amplitude du champ électrique  $\vec{E}$ , dans un plan contenant  $\vec{E}$  et  $\vec{k}$  (nommée plan d'onde), correspond à l'étude de la polarisation de l'onde lumineuse.

Néanmoins, si cette direction présente une évolution aléatoire au cours du temps, on dit que la lumière n'est pas polarisée (ce qui est le cas de la lumière naturelle). On peut déduire trois états de polarisation selon l'évolution de la direction de  $\vec{E}$  au cours de la propagation :

- La polarisation est rectiligne quand  $\vec{E}$  varie dans une seule direction.
- La polarisation est circulaire,  $\vec{E}$  tourne autour du vecteur  $\vec{k}$  en formant un cercle.
- La polarisation est elliptique si  $\vec{E}$  tourne autour du vecteur  $\vec{k}$  et change d'amplitude pour former une ellipse.

## I.2 Interactions de la lumière entre le polariseur et le scotch

Différents outils peuvent influencer sur la polarisation d'une onde lumineuse, le plus connu est bien sûr le polariseur. Ce dernier produit généralement une onde polarisée rectilignement selon une certaine direction appelée « axe de polarisation ». Il ne laisse passer que les composantes du champ  $\vec{E}$  colinéaires à l'axe de polarisation ; en conséquence, une onde lumineuse ne sera donc totalement transmise que si la direction de  $\vec{E}$  est la même que l'axe de polarisation. On peut vérifier cette propriété expérimentalement, en ajoutant un second polariseur nommé analyseur.

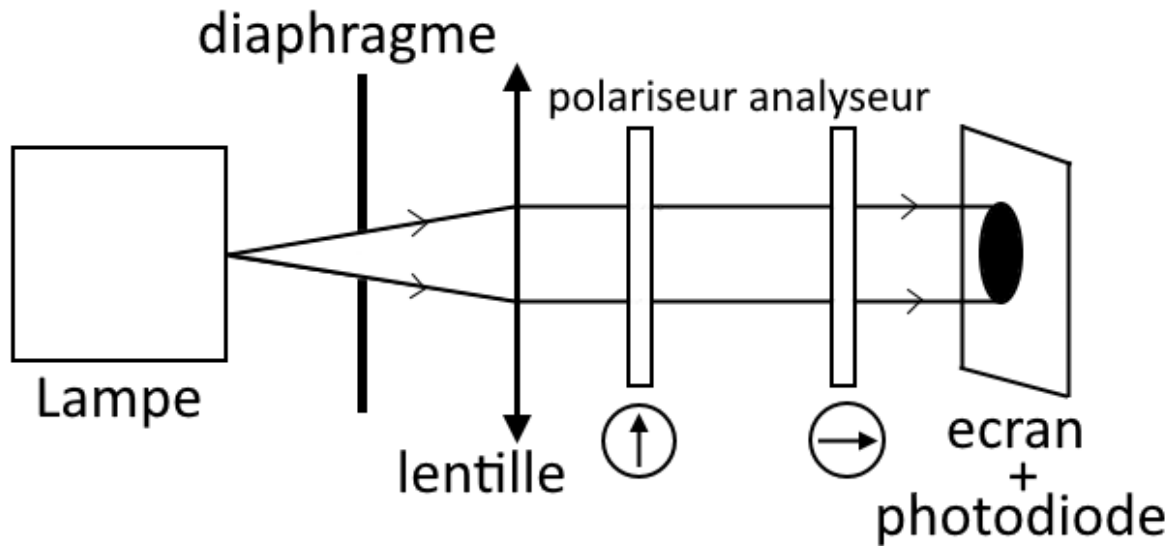


FIGURE 1 – Montage pour vérifier la loi de Malus

En tournant l'analyseur, on observe que l'intensité lumineuse reçue sur l'écran varie. Plus précisément, si les axes de polarisation du polariseur et de l'analyseur sont parallèles, on observe un éclairement maximal. Si les axes de polarisation sont perpendiculaires (le polariseur et l'analyseur sont alors dits « croisés ») on observe une extinction (absence de la lumière à la sortie du système).

A l'aide d'une photodiode, on peut mesurer l'intensité lumineuse en fonction de l'angle entre les axes de polarisation. Ainsi, si on note  $\theta$  l'angle formé par l'axe de polarisation avec  $\vec{E}$ , et  $I_0$  l'amplitude/intensité de l'onde incidente, on obtient, après traversé d'un polariseur :

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Cette relation se nomme la Loi de Malus.

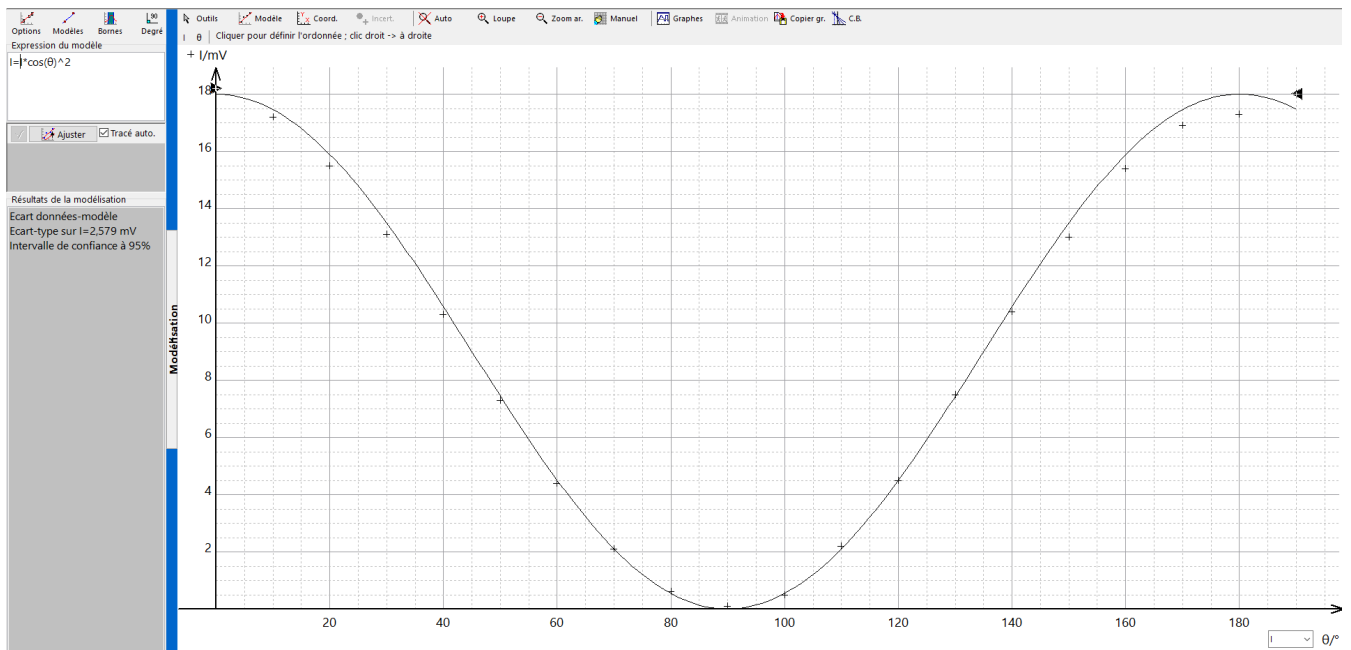


FIGURE 2 – Mesures relatives à la loi de Malus

Toutefois, en rajoutant un élément (en l'occurrence le scotch) entre le polariseur et l'analyseur croisés, on peut observer une modification de l'intensité lumineuse sortante lorsqu'on fait varier la position du scotch dans l'espace. Ceci est la conséquence d'une propriété du scotch, la biréfringence.

### I.3 Le phénomène de biréfringence

Dans un milieu biréfringent, la lumière se propage de manière anisotrope, c'est-à-dire, de différentes façons en fonction de l'orientation. Une des caractéristiques d'un tel milieu est de présenter un double indice de réfraction, ce qui permet au rayon incident de se décomposer en rayon dit « ordinaire » (polarisé perpendiculairement à l'axe optique) et en rayon dit « extraordinaire » (polarisé parallèlement à l'axe optique). Le rayon ordinaire se propage de la même manière quel que soit l'orientation du scotch, car il dépend de l'indice de réfraction ordinaire ( $n_O$ ). Quant au rayon extraordinaire, il ne se propage pas toujours de la même façon, car il dépend de l'indice de réfraction  $n_e$  qui varie selon l'orientation du scotch, de manière continue entre  $n_O$  et  $n_E$  ( $n_E$  indice extraordinaire).

Il existe ainsi une situation (quand  $n_e=n_O$  ou  $n_e=n_E$ ) où l'onde incidente se propage sans modification. On dit qu'elle passe par les lignes neutres du scotch.

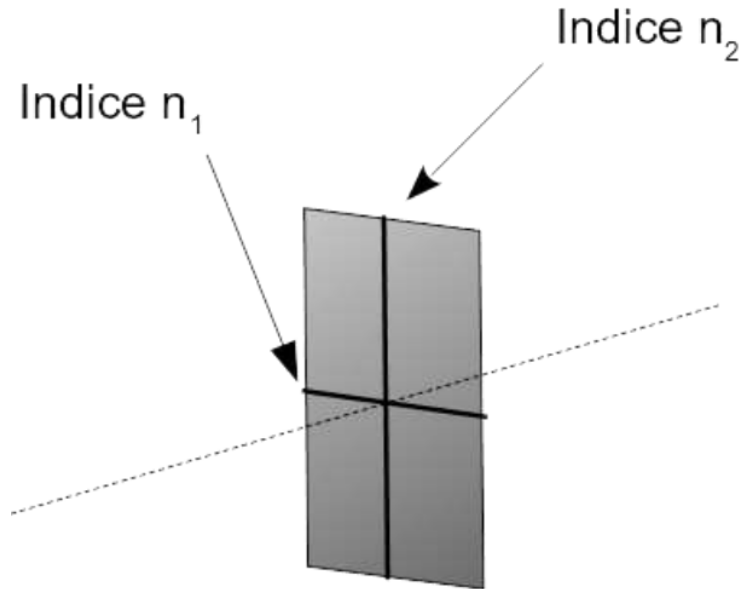


FIGURE 3 – Lignes neutres du scotch

Ces dernières, aussi dénommées axe lent et axe rapide (respectivement  $A_1$  et  $A_2$ ), sont perpendiculaires et on associe à l'axe lent l'indice de réfraction le plus grand et à l'axe rapide l'indice le plus petit. On a donc des vitesses de phase qui ne sont pas égales :

$$v_1 < v_2$$

$$\frac{c}{n_1} < \frac{c}{n_2}$$

Les deux rayons lumineux parcourent donc la même distance mais en un temps différent. On a alors ce que l'on appelle une différence de chemin optique (on parle aussi de différence de marche). Le chemin optique noté ( $L$ ) est la distance qu'aurait parcouru la lumière dans le vide pendant la durée du trajet effectué dans le milieu d'indice  $n$  donné.

$$L_{AB} = \int_A^B n(s)ds$$

Par conséquent, on note ( $\delta$ ) la différence de marche et ( $e$ ) l'épaisseur du scotch :

$$\begin{aligned}\delta &= L_2 - L_1 \\ &= e(n_2 - n_1) \\ &= e\Delta n\end{aligned}$$

A la sortie du scotch, les rayons ne sortant donc pas tous au même instant, ils ne sont pas forcément en phase. La différence de marche nous permet d'évaluer le retard (ou déphasage) des ondes.

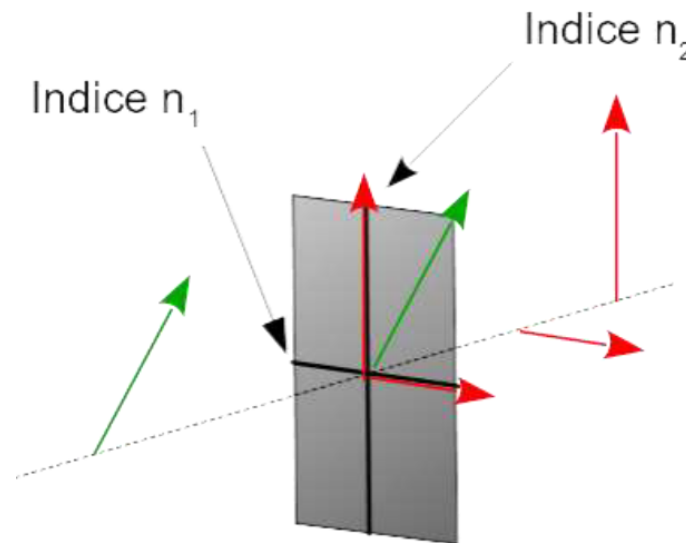


FIGURE 4 – Composantes de  $\vec{E}$  selon les lignes neutres du scotch

Après traversée de l'analyseur, les ondes sont de nouveau orientées dans une unique direction, (perpendiculaire par rapport à celle du polariseur dans notre expérience), et se superposent (bien qu'elles ne soient pas forcément en phase). Ceci provoque des interférences, (qui peuvent être constructives comme destructives).

Lorsque les ondes arrivent en phase, on a des interférences constructives (les amplitudes « s'ajoutent »), l'amplitude de l'onde résultante est maximale. On les observe quand la différence de marche est un multiple de la longueur d'onde  $\lambda$ , soit :

$$\delta = e\Delta n = k\lambda \quad \text{où } k \in \mathbb{Z}$$

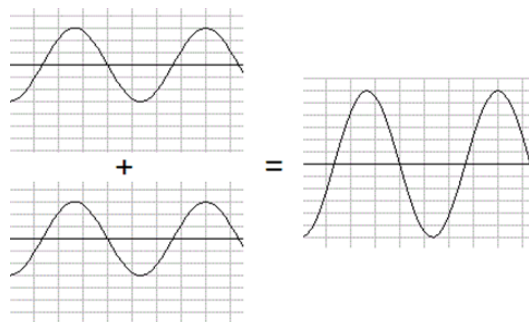


FIGURE 5 – Interférences constructives



Enfin, si les ondes sont en opposition de phase, on a des interférences destructives, l'amplitude de l'onde résultante est nulle. La différence de marche est alors un multiple demi-entier de la longueur d'onde :

$$\delta = e\Delta n = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{où } k \in \mathbb{Z}$$

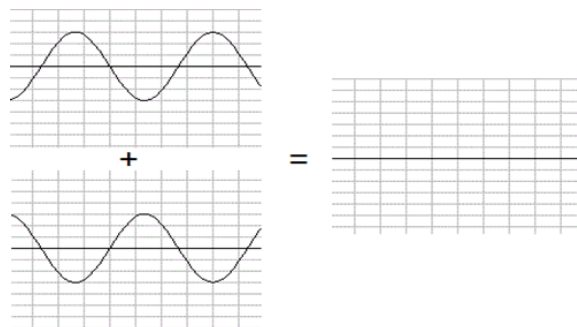


FIGURE 6 – Interférences destructives

## II Essais expérimentaux

### II.1 Le spectre de la lumière après traversée de plusieurs épaisseurs de scotch

Lorsque l'on superpose plusieurs épaisseurs de scotch, on observe sur un écran que la lumière qui traverse le système optique (Polariseur-Scotch-Analyseur) devient colorée, et que cette couleur change selon le nombre d'épaisseur. Aussi, lorsque l'on modifie l'angle selon lequel le scotch est orienté, ou bien celui entre les directions de l'analyseur et du polariseur, on observe des modifications sur les nuances obtenues.

Cela s'explique par le fait que le scotch est biréfringent : En effet, la lumière blanche après avoir traversée le polariseur est polarisée dans une seule direction. Puis, la lumière traverse le scotch qui est biréfringent, (ce qui implique que son indice de réfraction n'est pas unique), et ce qui fait que la vitesse de trajet des rayons dépend de la direction. A la sortie du scotch, les rayons ne sortent pas tous au même instant, par conséquent, ils ne sont pas en phase.

La biréfringence est à l'origine de ce phénomène, car après avoir traversé l'analyseur, les ondes à la sortie du système optique provoquent des interférences constructives ou destructives. Or, le spectre de la lumière blanche incidente est continu, c'est-à-dire qu'il contient toutes les longueurs d'ondes  $\lambda$  visibles (toutes les couleurs de l'arc en ciel).

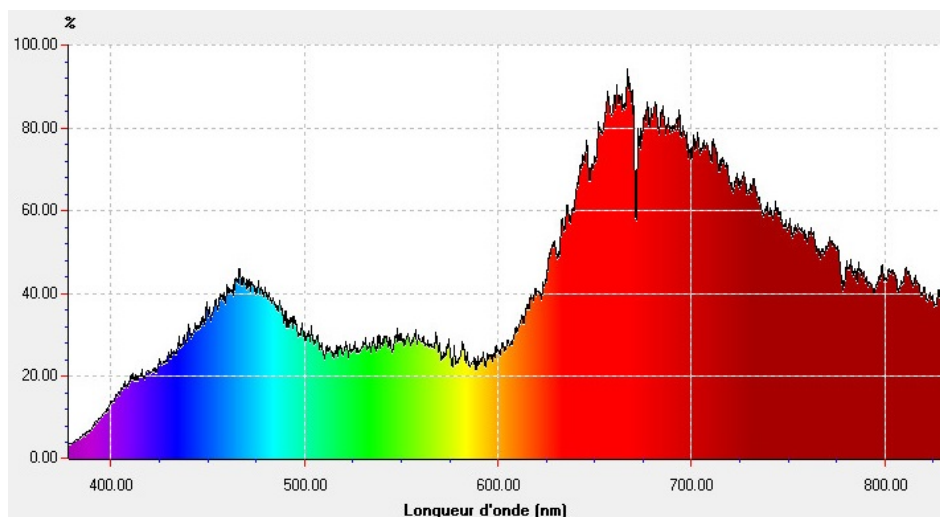


FIGURE 7 – Spectre de la lumière blanche

Ainsi, si toutes les longueurs d'ondes  $\lambda$  présentes dans le rayonnement incident sont en phase, le spectre de la lumière résultante comporte les mêmes composantes et la lumière en

sortie est blanche. A l'inverse, les longueurs d'ondes  $\lambda$  en opposition de phase seront absentes de la lumière résultante, et le spectre correspondant apparaîtra privé de ces  $\lambda$ . La couleur globale qui en résulte suit le principe de la synthèse additive. Afin de visualiser les interférences sur le spectre, on peut utiliser un réseau ou un spectrophotomètre. L'avantage de ce dernier est de fournir l'intensité de chaque radiation lumineuse transmise.

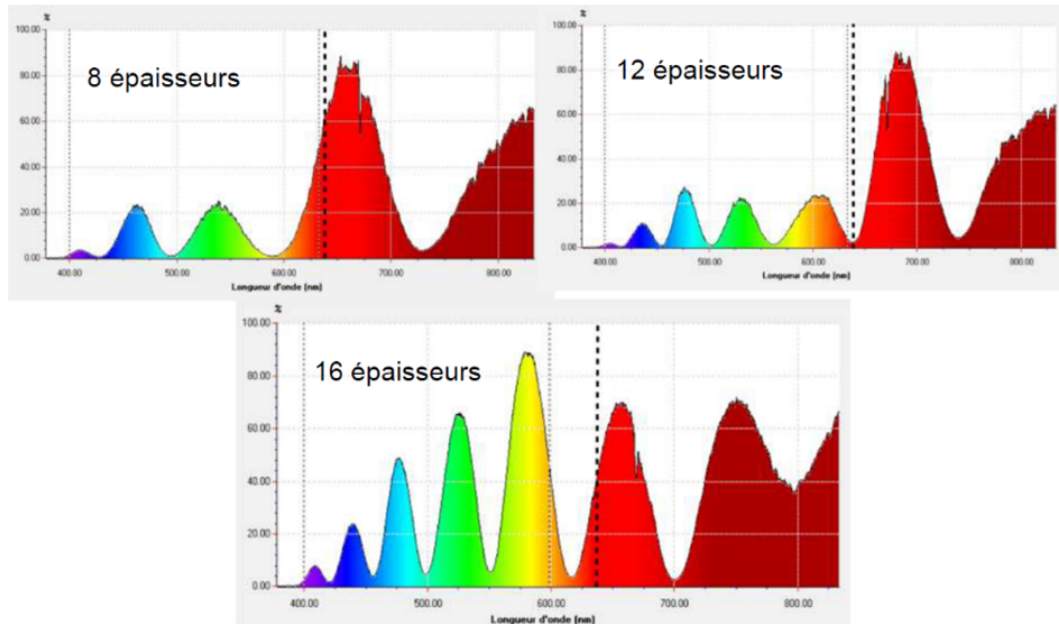


FIGURE 8 – Spectres selon le nombre d'épaisseurs

Le spectre ainsi obtenu en lumière blanche semble constitué de vagues, on appelle ce dernier un spectre cannelé. Ainsi, un creux correspond à une cannelure, tandis qu'un sommet à une interférence constructive. On peut noter que le nombre d'interférences augmente avec l'ajout d'épaisseurs. Cette augmentation semble provoquer un effet visible à l'œil nu, car dès 12 épaisseurs, le scotch ne transmet plus qu'une lumière blanchâtre dépourvue de couleurs. On peut supposer que l'augmentation du nombre de cannelures « trompe » notre œil et nous fait parvenir la sensation d'observer du blanc.

Ces spectres cannelés nous permettent aussi de déterminer une mesure précise de la différence d'indice entre les lignes neutres du scotch, en utilisant la formule reliant les cannelures à la différence de marche. Dans cette formule,  $k$  est un entier qu'on peut déterminer, car la

différence de marche (pour un  $\Delta n$  fixé) est environ la même quelle que soit la longueur d'onde :

$$\begin{aligned}\delta_0 &= \delta_1 \\ \Leftrightarrow k\lambda_1 &= (k+1)\lambda_2 \\ \Leftrightarrow k &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}\end{aligned}$$

On a donc pour le calcul de la différence d'indice :

$$\begin{aligned}e\Delta n &= k\lambda + \frac{\lambda}{2} \\ \Leftrightarrow \Delta n &= \frac{k\lambda}{e} + \frac{\lambda}{2e}\end{aligned}$$

Expérimentalement, on mesure à l'aide d'un palmer et de dix épaisseurs, une épaisseur pour une couche de scotch de :

$$e = (42 \pm 4)\mu m$$

Pour récapituler, lorsque l'on modifie l'orientation du scotch, ou lorsque l'on ajoute des épaisseurs de scotch, les rayons n'ont pas la même vitesse de phase, ce qui entraîne un déphasage, et donc un changement de couleur visible dans le spectre. En fixant le nombre d'épaisseurs, on peut calculer la valeur  $\Delta n$  de la biréfringence du scotch.

Avec  $e = 16 \times 42\mu m$  on obtient expérimentalement :

$$\begin{aligned}k &= \frac{504}{536 - 504} = 15,75 \\ \Delta n &= \frac{15,75 \times 504}{42 \times 10^{-6} \times 16} + \frac{504}{2 \times 42 \times 10^{-6} \times 16} \\ \Leftrightarrow \Delta n &= (n_1 - n_2) = 0,0121\end{aligned}$$

## II.2 Essais expérimentaux selon la température

Au cours de nos expérimentations avec le scotch, nous avons pu remarquer qu'exercer une force sur le scotch, ou le chauffer « décale » le spectre obtenu vers des longueurs d'ondes plus importantes. Il semble donc qu'il existe un lien entre la température du scotch et son spectre.

Notre expérience consiste à observer une modification de l'intensité lumineuse selon la température du scotch. C'est pourquoi on utilise comme source lumineuse un laser rouge, ce dernier

possédant une longueur d'onde fixée ( $\lambda = 642 \text{ nm}$ ), un éventuel décalage du spectre vers des longueurs d'ondes plus importantes va modifier l'intensité lumineuse transmise.

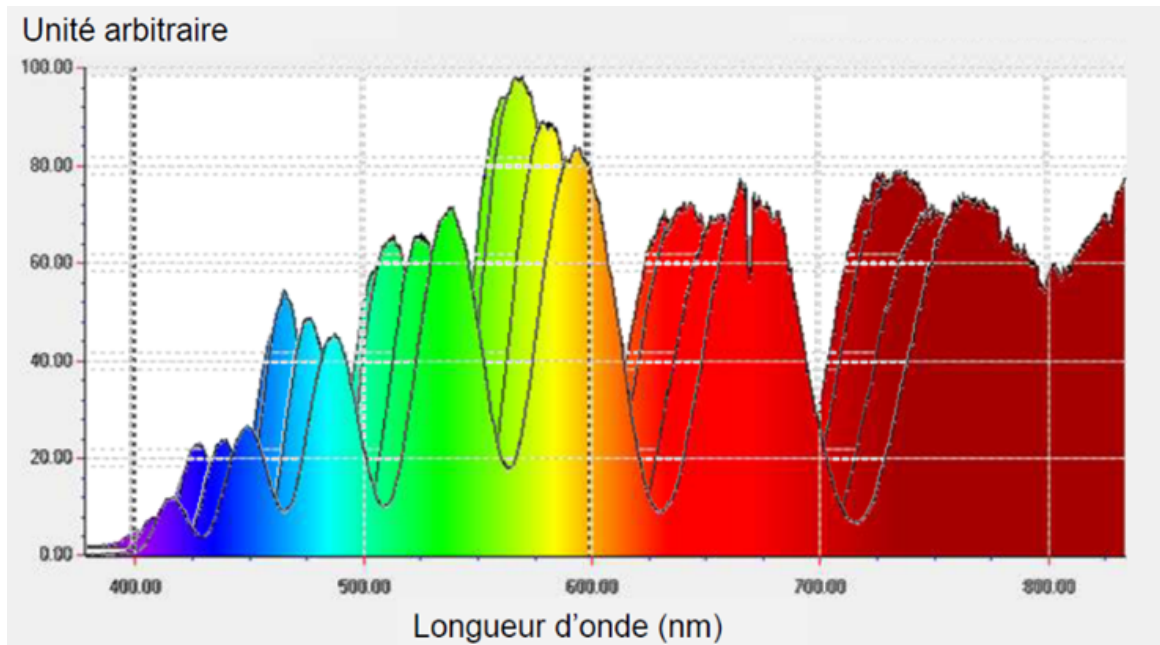


FIGURE 9 – 16 épaisseurs à différentes températures

Dans notre expérience, on vient donc chauffer le morceau de scotch à l'aide d'un sèche-cheveux au sein du montage polariseur/analyseur croisé. Notre source lumineuse est un laser rouge, qui après avoir traversé le système optique est capté par une photodiode reliée à un oscilloscope, affichant l'intensité lumineuse captée.

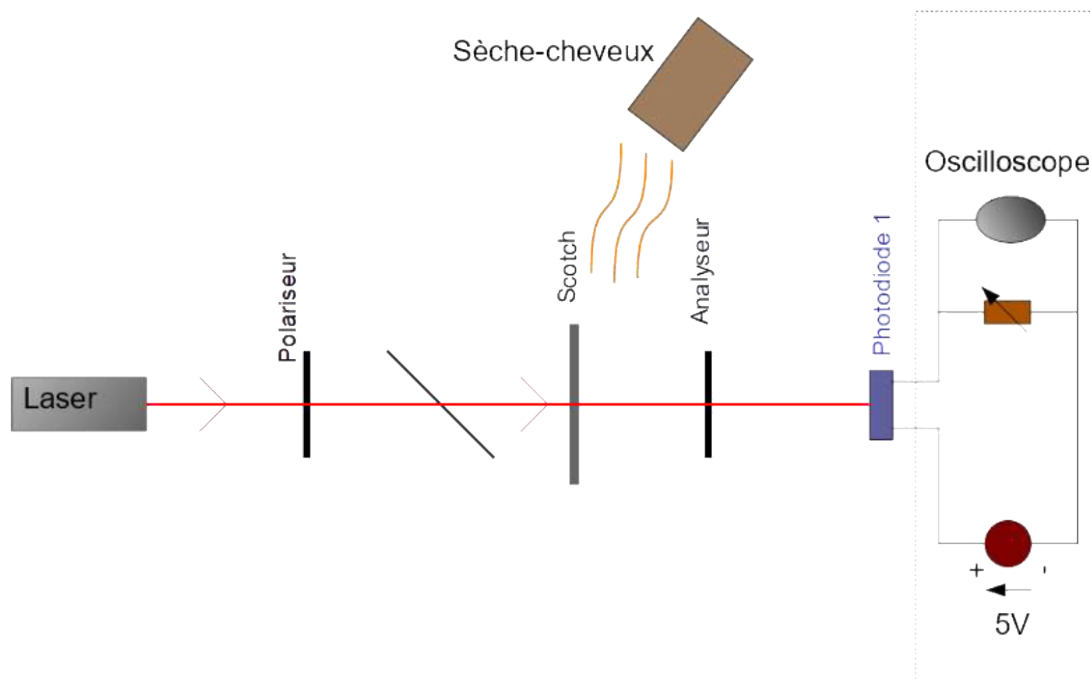


FIGURE 10 – Schéma montage mesurant l'intensité transmise selon la température

Cependant, nous avons remarqué que la tension de la photodiode fluctue au cours du temps. La cause étant le laser, qui doit chauffer au préalable une heure auparavant pour se stabiliser.

Nous avons ensuite perfectionné cette expérience, en rajoutant une lame de verre entre le polariseur et l'analyseur, qui dévie une partie du laser sur une seconde photodiode que l'on peut qualifier de témoin. Ainsi, (après que le laser soit stabilisé), on peut observer et mesurer un écart entre les tensions des photodiodes 1 et la 2, augmente lorsque le scotch est chauffé.

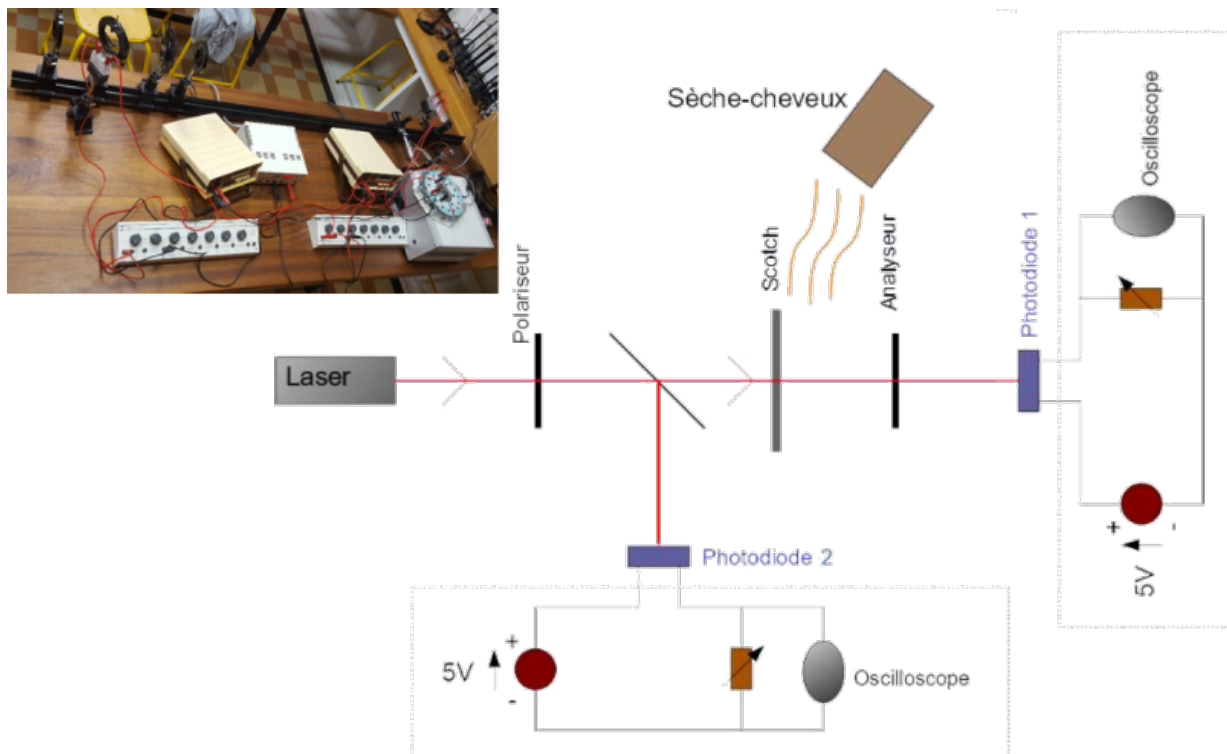


FIGURE 11 – Montage mesurant l'intensité entre deux photodiodes

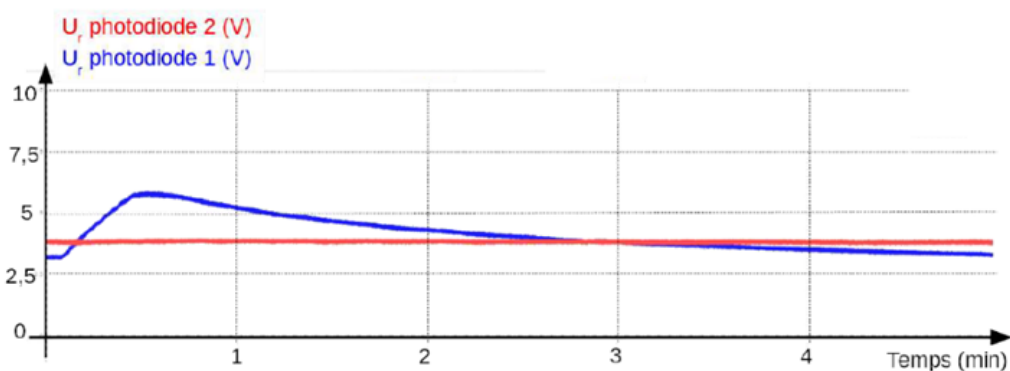


FIGURE 12 – Intensité entre photodiodes selon des changements de température

Subséquentement, nous avons réalisé cette expérience de façon plus « pratique », en collant notre morceau de scotch sur une bouteille contenant de l'eau chaude. Toutefois, afin de récupérer

le rayon au niveau de la photodiode, nous avons rajouté un matériau réfléchissant (le mylar) afin que le rayon soit réfléchi. Mais, le mylar (qui est similaire au papier d'aluminium) est étiré au cours de sa fabrication, il devient strié. Ceci provoque une diffraction de la lumière incidente et donc une perte d'intensité lumineuse captée. Cette dernière n'est alors plus suffisante, la tension mesurée étant trop faible pour être pertinente. Afin de pallier ce problème, nous avons remplacé le mylar par une fine feuille d'or issu d'une couverture de survie. L'intensité captée est alors suffisante.

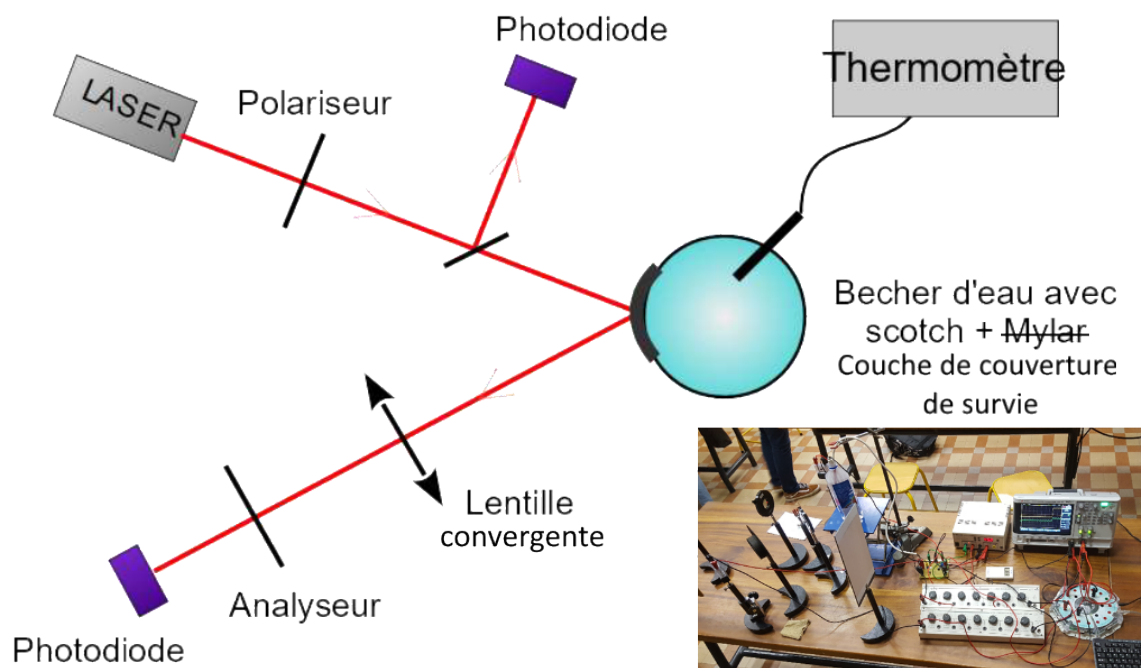


FIGURE 13 – Essais en réflexion

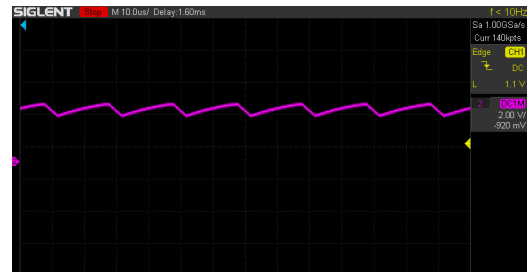
## III Prototype, mesurer températures et vibrations

### III.1 La maquette et son fonctionnement

Dans un premier temps, nous avons dû mettre en place un prototype, « une maquette » de notre montage électrique ainsi que sa boîte. L'élaboration de ce prototype nous a permis de résoudre différents problèmes, tels que l'intensité perçue ou encore la réception du laser après réflexion.

Nous avons dans un premier temps mis en place un circuit électrique avec un générateur de basses fréquences (GBF), un oscilloscope, une alimentation, une photodiode et un multiplieur. Ce montage nous a permis de comprendre comment récupérer efficacement le signal.

Afin de différencier la lumière naturelle de celle du laser, nous émettons ce dernier avec un signal modulant grâce au GBF, ce qui nous permet d'obtenir un signal lumineux émis à fréquence importante (d'environ 50 kHz). Le signal est ensuite capté par la photodiode, comme on peut le voir sur l'oscillogramme ci-contre.



Afin de récupérer le signal intéressant, nous utilisons un multiplieur qui calculera le produit du signal de la photodiode par le signal modulant (GBF). Le signal résultant comporte trois fréquences (dont deux importantes et une quasi nulle).

Après traitement par un filtre passe-bas<sup>1</sup>, cette fréquence nulle est la seule qui parviendra à l'oscilloscope.

Dans un second temps, nous avons ajouté en amont du circuit (en sortie de la photodiode) un suiveur, un passe-haut et un amplificateur. Le suiveur est destiné à permettre l'adaptation d'impédance entre deux étages successifs d'un circuit (on peut le voir comme une porte étanche entre deux parties du circuit). L'amplificateur permet d'augmenter par un facteur 10 l'amplitude du signal tandis que le filtre passe-haut ne garde que les fréquences importantes (ceci permet de supprimer plus efficacement la composante solaire du signal car sa fréquence est nulle).

---

1. un filtre passe-bas est un filtre qui permet de ne garder que des fréquences basses



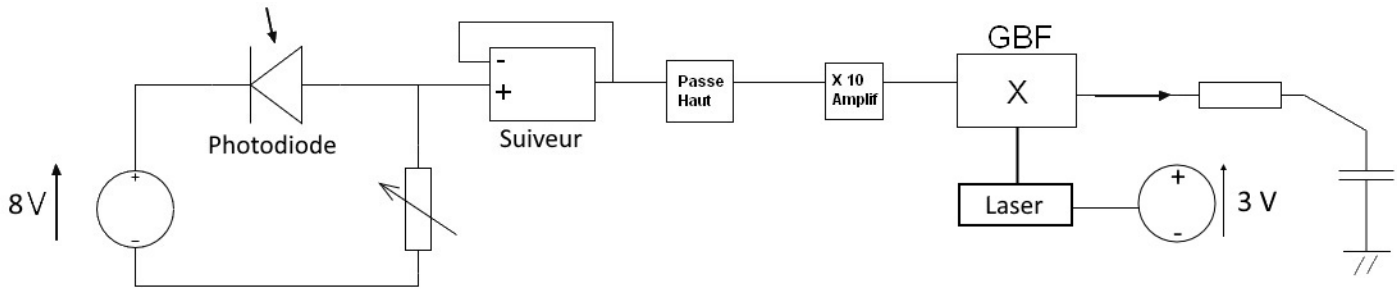


FIGURE 14 – Schéma circuit électrique

De plus, notre laser ayant une longueur d'onde  $\lambda = 534 \text{ nm}$ , nous avons utilisé un filtre vert posé à l'avant de notre maquette pour bloquer la lumière ambiante. Par la suite, le circuit sera connectée à un Arduino qui affichera les données voulues à l'extérieur de la boîte via un écran.

## III.2 Les Applications

Notre prototype est capable de déterminer la variation de température d'un objet situé à une distance de plusieurs mètres, mais également de capter les vibrations qu'une surface pourrait ressentir et transmettre au scotch. Ces deux applications différentes sont possibles car elles influent respectivement sur deux paramètres liés à la biréfringence, la différence d'indice entre les deux lignes neutres (soit  $\Delta n$ ) pour la température et l'épaisseur pour les vibrations<sup>2</sup>.

Subséquentement, les applications potentielles sont nombreuses : on peut par exemple imaginer mesurer la température d'un objet dont l'accès est ardu, comme du matériel toxique situé derrière une vitre. Il peut également être intéressant de suivre l'évolution de la température lors d'une expérience (réaction chimique, culture in vitro...).

En effet, notre système est particulièrement sensible à des écarts relativement faibles de température ; en choisissant le nombre d'épaisseurs de scotch adapté à une température de consigne  $T_0$ , on peut ensuite détecter une variation de température et commander ainsi un asservissement en température par exemple.

Ou encore, déterminer les forces de contrainte subies par à un objet, comme par exemple un pont, où il pourrait être compliqué et coûteux d'installer de nombreux détecteurs, contrairement au scotch qui est résistant, presque gratuit, et dont l'installation est relativement aisée. En outre, cette méthode est également applicable à l'étude des vibrations d'un solide, et constitue une

2. On rappelle qu'elles interviennent dans le calcul de la différence de marche :  $\delta = e\Delta n$

démarche simple afin d'observer voire peut être même de mesurer ses vibrations, comme nous allons le voir.

### III.2.1 Mesure de vibration sur une vitre

Lors d'une première expérience, nous avons pu mettre en évidence des vibrations sur une vitre dues à un son, délivré par un haut-parleur placé derrière la vitre, comme on peut le voir sur la photo ci-après.

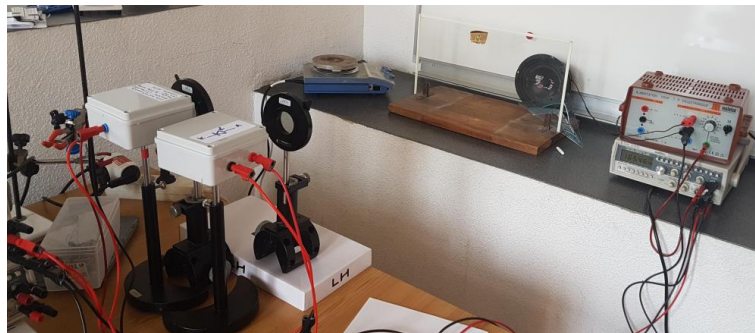
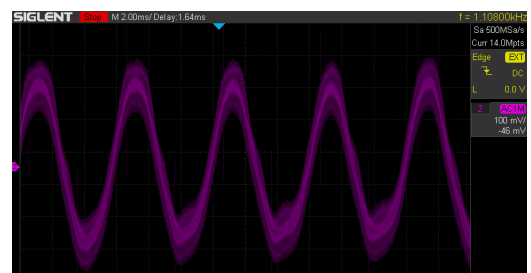
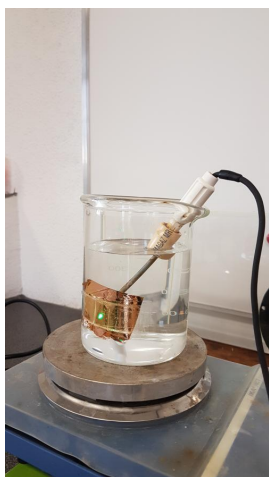


FIGURE 15 – Dispositif expérimental permettant de mettre en évidence les vibrations sur une vitre.

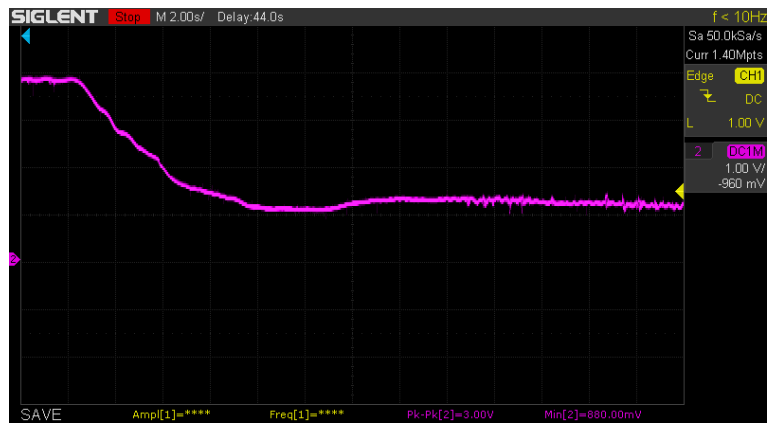
Nous avons appliqué le principe de la mesure en réflexion à cette détection des vibrations sur la vitre : au repos, en l'absence d'onde sonore, le signal détecté sur la photodiode est constant. En présence du son, le signal est modifié, voici un exemple de détection.



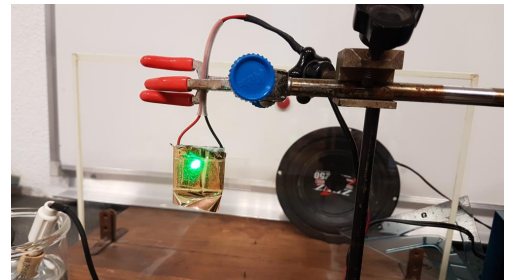
### III.2.2 Mesure d'une variation de température



De façon très précise, on peut analyser une variation de température. Nous avons effectué une expérience de principe : nous avons mis de l'eau à température ambiante dans un bécher (comme sur la photo ci-contre), puis nous avons ajouté de l'eau chaude, en ajoutant l'ensemble et simultanément nous avons enregistré la tension en sortie de notre chaîne de mesure. On voit l'évolution sur l'oscillogramme suivant



Enfin, nous avons renouvelé l'expérience à l'aide d'une cellule Peltier qui présente l'avantage de pouvoir générer une augmentation, comme une diminution de température. Selon le même principe, nous avons pu observer une variation de tension aux bornes de notre chaîne de détection, analogue à celle présentée plus haut.



Notre projet doit encore être perfectionné et permettra à terme d'afficher la température et/ou la variation de température via une interface Arduino.

# Sitographie

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/cannelure.html>

<http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~phyexp/pmwiki.php/LeDamierMagique/LeDamierMagique/tocanchor1>

<http://rennes.udppc.asso.fr/IMG/pdf/dossier46.pdf>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/biref.html>

[materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20DOC%20V%204%20/Disk%202/TEXTES/1984/06620823.PDF](http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20DOC%20V%204%20/Disk%202/TEXTES/1984/06620823.PDF)