

Peut-on voir le son ?

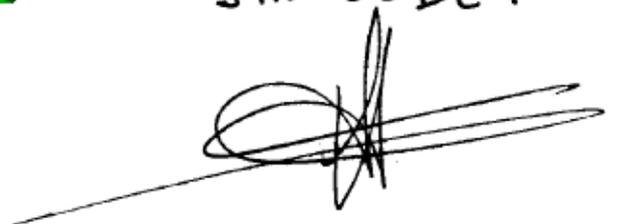


Professeur encadrant : M.Patrice MICHEL
Classe de terminale S-SVT. Lycée Douanier Rousseau, LAVAL

En partenariat avec le laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

LAUM

Le Proviseur
J.N. GODET





Maude

Nicolas

Maëva

Résumé

Les ouvrages scientifiques présentent des photographies d'ondes se propageant le long d'une corde, d'un ressort ou à la surface de l'eau. Aucun ouvrage ne présente de photographie d'une onde sonore dans l'air, excepté un livre de vulgarisation scientifique dans lequel apparaît une petite photographie intrigante prise par un ingénieur Américain, Winston Kock, en 1950.

Soutenus par des chercheurs de l'université du Maine, nous nous sommes interrogés sur cette photographie : **Peut-on voir le son ?** 60 ans après W.Kock dont les travaux semblent avoir été oubliés, nous avons relevé le défi de photographier des champs sonores. Au fil des mois, surmontant de nombreuses difficultés, nous avons mis en place un dispositif permettant de les photographier. Profitant de la numérisation de nos images, nous pouvons les analyser et vérifier leurs conformités avec nos attentes pour les situations ordinaires. Actuellement, nous soumettons notre dispositif à des situations plus originales.

Sommaire

- A.** L'origine de notre projet
- B.** Premier dispositif et.. premières difficultés
- C.** Le projet sort du lycée.. et se bonifie
- D.** De nouvelles questions..et de nouvelles améliorations
- E.** Nos plus belles photographies et leurs exploitations
- F.** Nos photographies traduisent-elles la réalité du champ sonore ?

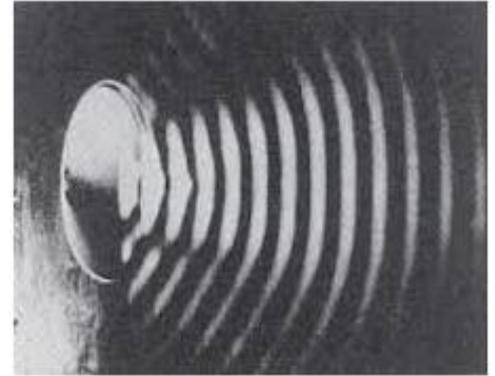
Conclusion -Bibliographie

1. Une petite photo

En septembre 2014, nous avons découvert cette photo, dans le livre de vulgarisation scientifique de B.Valeur. "son ou lumière".

Cette photo nous a beaucoup interpellés...car elle représente le son! La question « **Peut-on voir le son ?** » nous est naturellement venue.

Nous avons alors engagé nos recherches autour de cette interrogation dans le cadre de l'atelier scientifique de notre lycée et en partenariat avec les chercheurs du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine.



Depuis 18 mois, nous nous retrouvons dès qu'une heure de cours se libère dans notre emploi du temps, à la pause du midi, le mercredi après-midi ou le soir après les cours. Heureusement nous étions dans la même classe.

Nos recherches de photographies du son, autres que celles de W.Kock sur internet ont été infructueuses ce qui nous a beaucoup surpris. De plus les chercheurs de l'Université du Mans nous ont dit qu'ils ne connaissaient pas la méthode utilisée ou ce type de dispositif.



W.Kock (1909-1982)

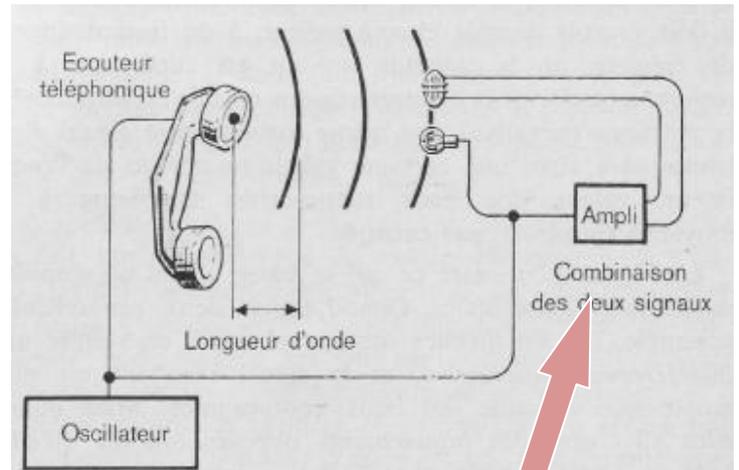
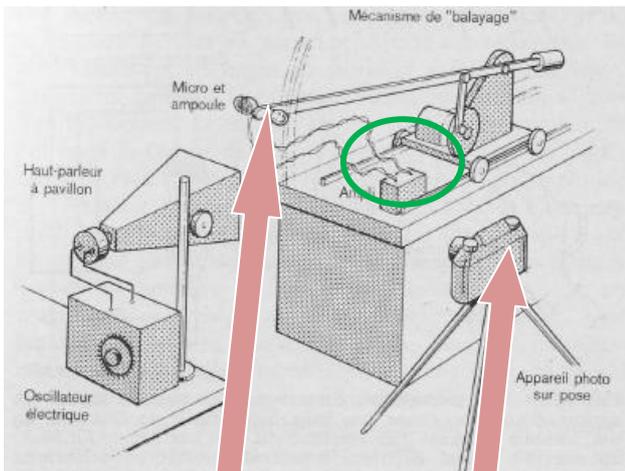
Le fait que 60 ans après les travaux de Kock semblaient avoir été oubliés, a renforcé notre motivation.



Nos recherches bibliographiques nous ont amenés à découvrir et acheter sur internet ce petit ouvrage de Kock.

Le principe du dispositif y est rapidement évoqué. Nous aurions aimé qu'il le soit bien davantage!

Voici les deux schémas qui permettent de saisir le principe et ce que nous en avons retenu en légende :



Photographie en pose longue

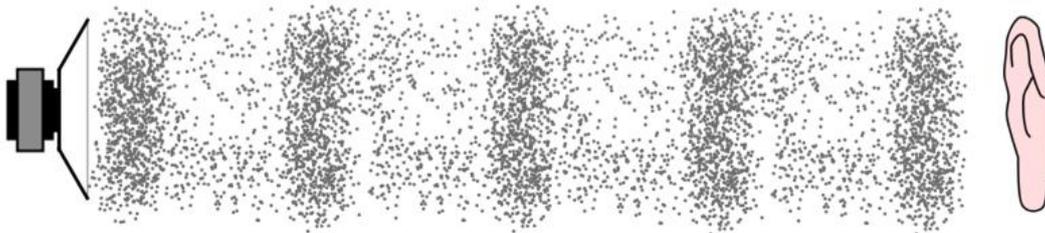
Balayage d'un couple microphone-lampe associée

Le schéma nous indique qu'il faut **additionner deux signaux**

2. Au fait...peut-on voir le son ?

Une question préalable s'impose : Qu'est ce que le son?

« Une onde sonore ou ultrasonore est une onde mécanique de compression-dilatation à trois dimensions. Lors du passage de la perturbation, chaque point du milieu vibre dans une direction parallèle à celle de la propagation de l'onde créant une alternance de zone de compression et de dilatation du milieu. »



Alors..peut-on voir le son?

La réponse est non, bien sûr, car il nous est impossible de voir un gaz transparent tel que l'air. De plus, les zones de compression-dilatation, s'y déplaçant à une vitesse d'environ 1220 km.h^{-1} , nous n'aurions aucune chance de les distinguer.

Seul un micro peut capter les zones de pression et de dépression de l'air créées par notre haut parleur et transformer ces variations de pression en un signal électrique de même forme et de même fréquence.

L'œil, lui, ne peut voir que des objets émetteurs de lumière, telle qu'une petite lampe.

3. Que se passe-t-il si, comme W.Kock, on relie un micro à une lampe ?

L'idée de Kock a été d'associer une petite lampe à un micro. Si on place un tel couple devant un haut parleur, la lampe clignote mais très rapidement, dès que la fréquence atteint 20-30Hz, l'œil ne suit plus le rythme !

Comment Kock procédait-il pour obtenir des photos avec des zones sombres et des zones claires, pour des sons de fréquence bien supérieure ?

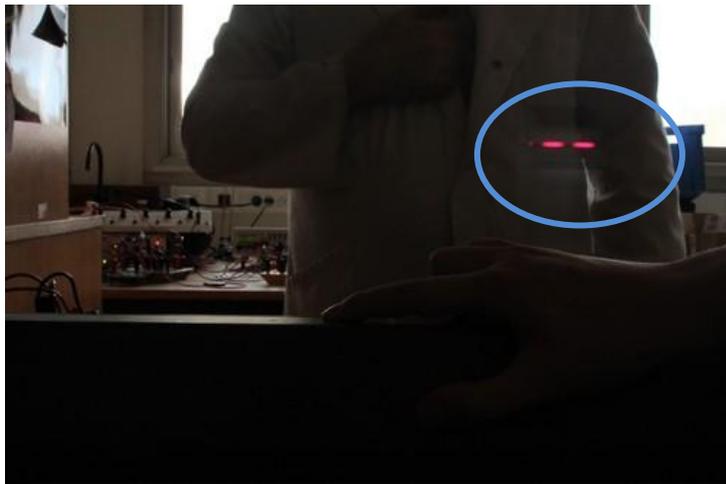
Grâce à la figure ci dessus, nous avons compris qu'il additionnait le signal reçu par le micro et le signal d'alimentation du haut parleur et que c'est leur somme qu'il envoyait sur la lampe. Si ces deux signaux sont en phase, la somme est de grande amplitude et la lampe éclaire fortement. S'ils sont en opposition de phase, la somme est quasi nulle et la lampe est éteinte.

D'où l'alternance des zones noires et éclairées.

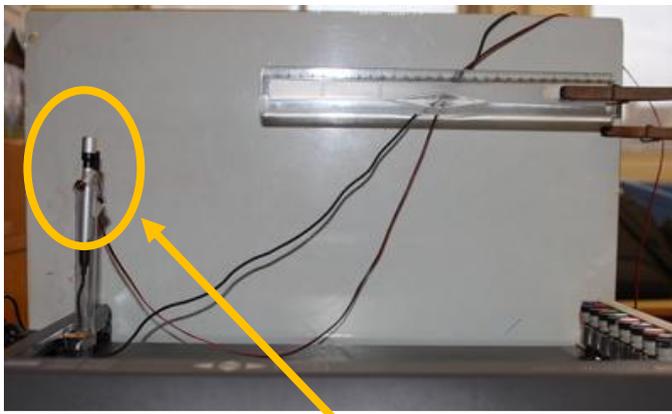
B- Premier dispositif et premières difficultés

oct 2014 – fév 2015

Nous avons associé un micro à une Del et mis en place notre premier dispositif. Nos premières photos ont été prises. Ce fut le début d'une succession de problèmes auxquels nous n'aurions jamais songé.



Notre première photo et nos premières traces du son (entourées)



Notre premier couple micro-lampe



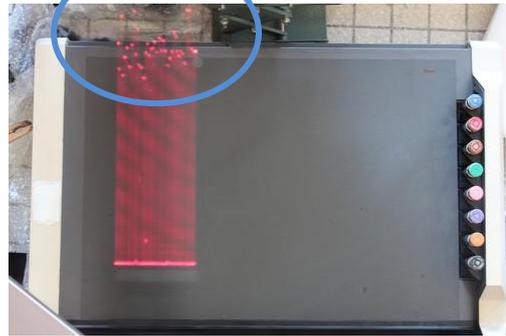
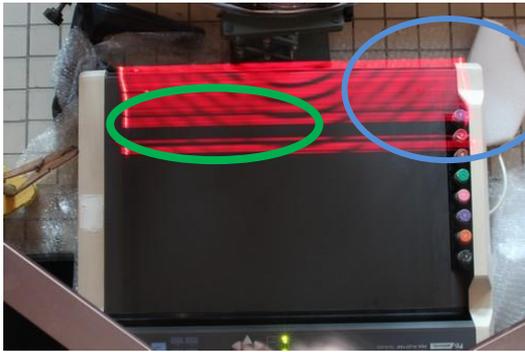
Notre première installation

Nous ne pouvons ici que survoler les nombreuses difficultés rencontrées :

Les difficultés de mise en place du dispositif : stabilité du dispositif, déclenchement automatique de l'appareil photo, réglages pour limiter les erreurs de parallaxe.

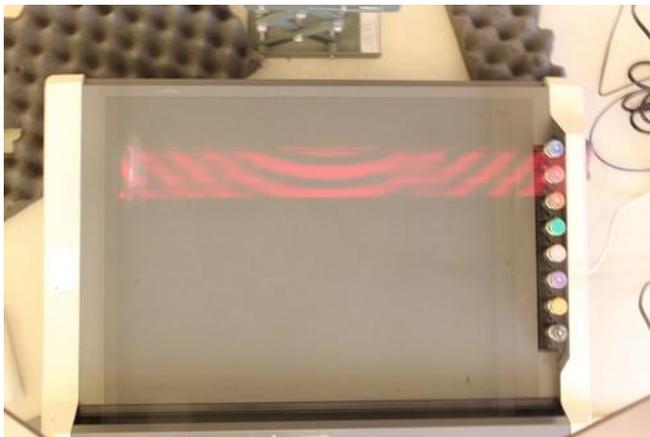
Le problème du balayage

Notre couple micro-lampe doit balayer l'ensemble du champ sonore. Le dispositif de balayage de Kock nous semblait compliqué, aussi avons-nous utilisé une vieille table traçante pour pouvoir rendre le balayage régulier. Nous avons disposé notre couple micro-lampe sur un support à crayon et balayé en actionnant les interrupteurs poussoirs. Les premiers balayages furent mauvais car ils étaient manuels. Nous étions pendant environ 20 minutes assis par terre dans le noir à se concentrer pour ne pas rater une ligne !



Des défauts liés aux erreurs de parallaxe (bleu) et aux difficultés de balayage (vert)

Le problème de l'obscurité. Dès lors que le temps d'exposition dépassait quelques secondes, la photo était saturée par la lumière ambiante. La prise d'une photo complète durant environ 20min, nous avons dû bâcher toutes les fenêtres de la salle avec du plastique noir. L'obscurité était complète mais.. déprimante. Depuis septembre 2014, nous avons installé une chambre noire.



Un exemple de photographie en semi-obscurité



Notre chambre « noire »

Les problèmes en électronique..

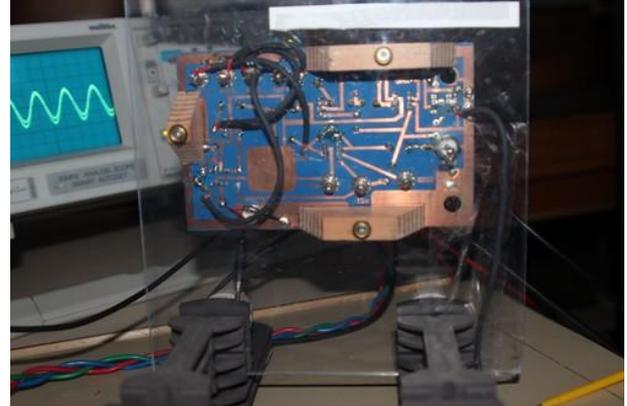
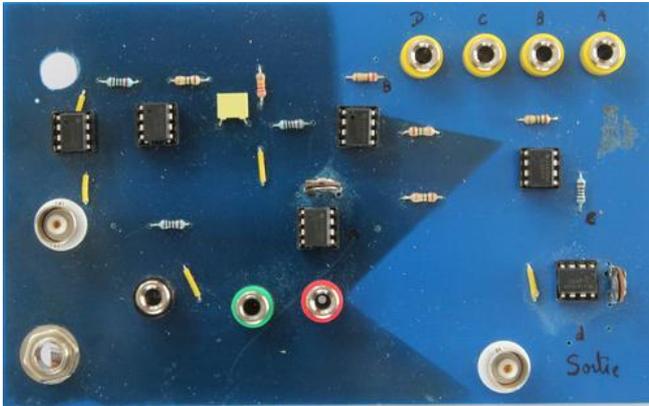
Pour additionner deux signaux, il fallait se lancer dans l'électronique. Nos débuts furent difficiles car étant élèves en S-SVT nous n'avions aucunes connaissances dans ce domaine.

Après une initiation, nous avons voulu comme Kock additionner les deux signaux. Nos difficultés ont été nombreuses : parasites, effets d'antennes, sons indésirables reçus par le micro (nos voix, la sonnerie du lycée), signaux très faibles..

et nos solutions..

Nous avons surmonté ces difficultés au fil des mois :

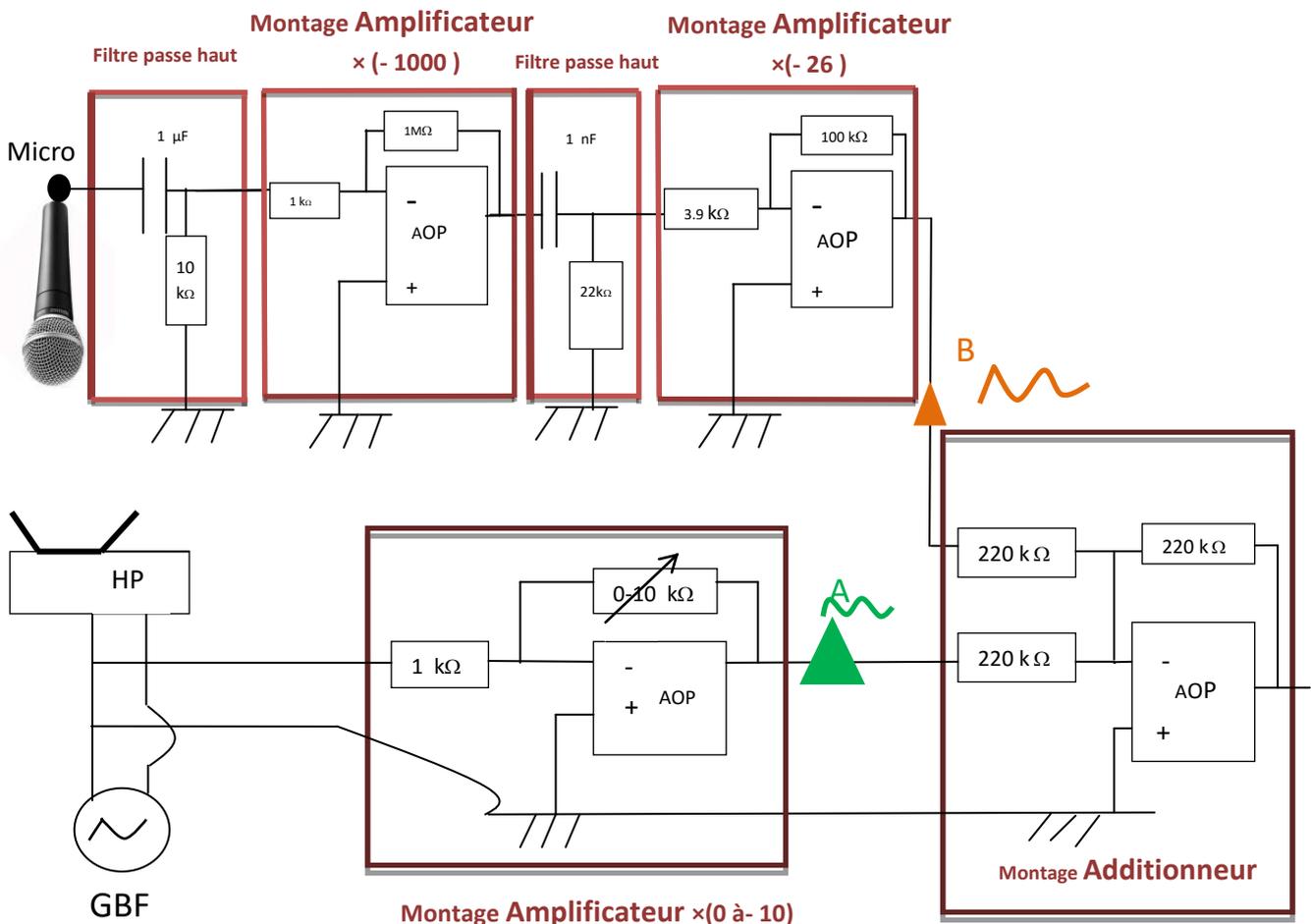
- En réalisant des montages « AOP » afin d'amplifier les signaux
- En installant des filtres électroniques pour « ignorer » les sons indésirables
- En blindant nos fils pour limiter les effets d'antennes
- En réalisant des circuits imprimés afin de limiter les signaux parasites et gagner de la place



Notre circuit imprimé actuel (recto/verso)

Actuellement, après plusieurs versions de cette carte imprimée, nous utilisons celle dont le schéma est ci-dessous. On y retrouve des filtres passe-haut, des montages amplificateurs et bien sûr le montage additionneur.

Le montage amplificateur à la sortie du GBF a un gain variable. En effet, lorsque le microphone est devant le HP, avant de lancer le balayage, nous égalisons les amplitudes afin que la somme des tensions soit nulle. Cela constitue en quelque sorte une référence.



1. Visite chez notre partenaire

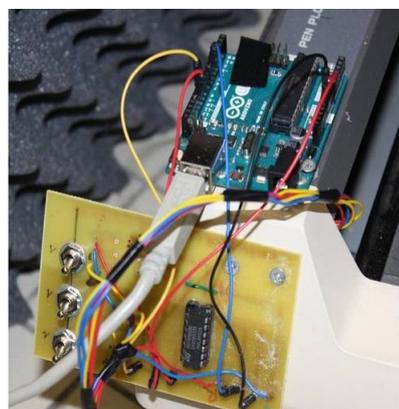
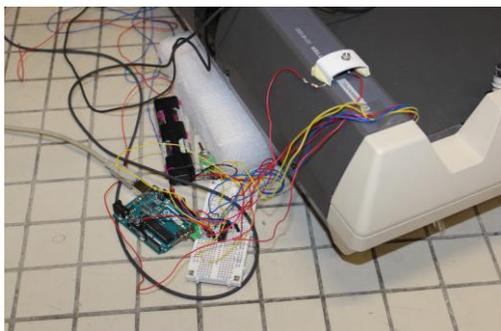
Dès nos premières photos obtenues, et très imparfaites, nous nous sommes rendus au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine pour rencontrer des chercheurs. Nous leur avons présenté le montage dont ils ne connaissaient pas le principe et leur avons présenté l'état actuel de nos travaux ainsi que nos difficultés. Ils nous ont écoutés avec beaucoup d'intérêts puis nous avons longuement échangé. Ils ont vite compris, qu'en l'absence de logiciel de commande (la table est très ancienne) il fallait absolument trouver une solution pour rendre le balayage automatique et régulier.

L'un des chercheurs Nikolay Chigarev (**sur la photo**) a alors démonté la table pour voir si les interrupteurs poussoirs étaient directement accessibles afin de les actionner directement. Ils l'étaient. Nous pouvions donc espérer commander notre table en agissant directement et automatiquement sur ces boutons ! Nous sommes retournés au lycée avec ce nouveau défi... sans oublier de faire une petite visite à la chambre « sourde » du Laum qui nous inspira par la suite.

De retour nous avons mis en œuvre, un microcontrôleur Arduino. En écrivant un programme informatique, nous avons « demandé » à cette carte d'envoyer des 0 et 5V sur trois sorties. Ces sorties sont reliées à des interrupteurs électroniques eux-mêmes reliés aux interrupteurs de la table traçante. Après des essais (à gauche ci dessous), nous avons mis en forme le montage en réalisant un nouveau circuit imprimé (à droite) .



Nous pouvons enfin commander notre table traçante et balayage régulier! Ce fut une avancée majeure pour notre



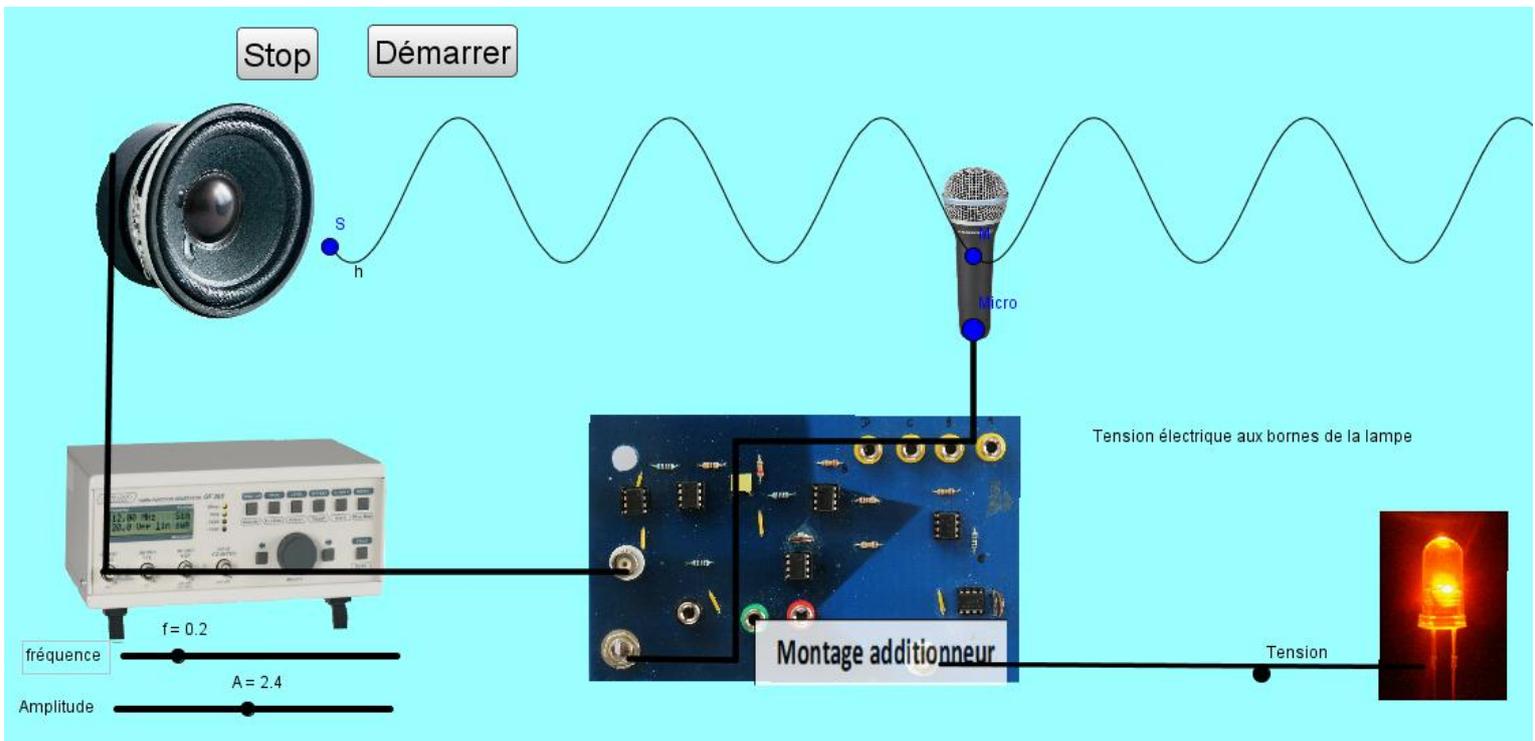
assurer un projet.

2. Participation aux « exposciences » et aux concours scientifiques.

Cette aventure nous a conduits à participer à différentes expositions et concours scientifiques.

Faire partager nos travaux a toujours été un réel plaisir d'autant plus que notre projet a beaucoup intrigué... Au début, nous avons rencontré des difficultés pour expliquer « avec les mains » le principe de notre montage au grand public, notamment l'astuce de W.Kock.

Il nous est venu alors l'idée pour faciliter nos explications de créer une simulation avec le logiciel Géogébra. Celle-ci présente les photos des différents éléments de notre dispositif. L'onde sonore est représentée par une courbe sinusoïdale qui traduit la pression acoustique. Elle se « propage » vers la droite.



On peut régler l'amplitude et la fréquence de l'onde. En déplaçant le microphone, on peut observer les différentes situations notamment celle qui conduit à l'extinction de la lampe.

Cette simulation informatique, que nous avons améliorée au fil de mois, a réellement facilité nos explications.

D. De nouvelles questions..et de nouvelles améliorations

oct 2015- janv 2016

1. Et l'effet Doppler?

C'est en fait une question des chercheurs du LAUM ? De fait, lorsqu'une onde est émise à une fréquence f_e , elle est perçue avec une fréquence f_r différente lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement relatif.

Dans notre dispositif, le microphone s'éloigne du haut parleur avec une vitesse v . La fréquence reçue par le microphone est alors $f_r = f_e \times \left(\frac{c}{c+v}\right)$ avec c la célérité du son dans l'air ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Nous avons évalué la vitesse du couple micro-lampe à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pour $f_e=18 \text{ kHz}$, nous avons ainsi

$f_r = 18000 \left(\frac{340}{340+0,1}\right)$ soit $17\,995 \text{ Hz}$ et donc un écart par rapport à la fréquence émise par le haut

parleur de 5 Hz . L'écart relatif est de $\frac{5}{18 \times 10^3} = 2,77 \cdot 10^{-4}$ soit $0,03\%$ environ. Cet effet peut donc être négligé. La fréquence émise par le haut parleur peut être assimilée à celle reçue par le micro.

2. Et le niveau sonore?

Lors de nos travaux, pour avoir des longueurs d'ondes sonores de quelques centimètres, nous utilisons des sons très aigus et désagréables; d'où cette question. Le sonomètre du lycée étant inefficace à ces fréquences (bande passante 0-8 kHz), nous avons cherché à déterminer ce niveau par le calcul.

En utilisant l'amplitude de la tension à la sortie du micro (au maximum 5V après amplification) et la sensibilité de celui-ci (5,6 mV.Pa⁻¹ d'après la notice), nous sommes parvenus à déterminer la pression acoustique efficace $p_{ac,eff}$ au niveau du micro soit $2,4 \cdot 10^{-2}$ Pa, puis le niveau sonore.

En effet

$$L_{(dB)} = 10 \log \frac{I}{I_0} \Leftrightarrow L(dB) = 10 \log \frac{cste \times p_{ac,eff}^2}{cste \times p_0^2} = 10 \log \frac{p_{ac,eff}^2}{p_0^2} = 10 \log \left(\frac{p_{ac,eff}}{p_0} \right)^2 = 20 \log \frac{p_{ac,eff}}{p_0}$$

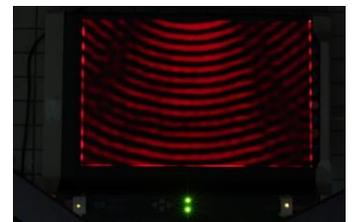
Avec p_0 est la pression acoustique efficace correspondant au seuil d'audition.

$$L = 20 \times \log \frac{2,4 \times 10^{-2}}{2,0 \times 10^{-5}} = 62 \text{ dB}$$

Cette valeur est bien inférieure au seuil de danger (90 dB à 1kHz). De plus notre oreille est bien plus éloignée du HP que ne l'est notre micro !

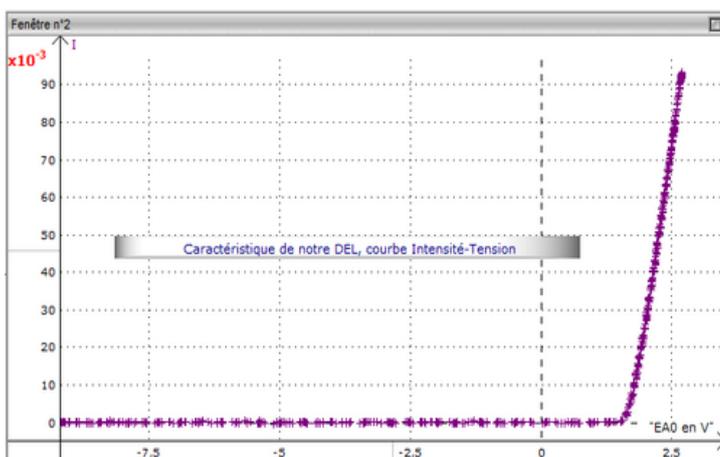
3. Quelle source de lumière?

Sur nos premières photos, nous nous attendions à voir la luminosité de notre source de lumière diminuer avec la distance. Or ce n'était pas le cas et nous savons que l'intensité sonore doit diminuer quand la distance à la source augmente !



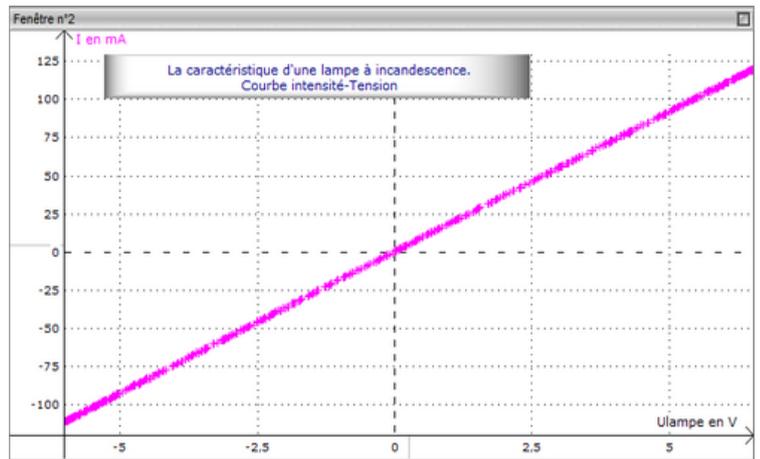
Nous avons alors remis en cause la Del que nous avons adoptée jusque là comme source de lumière pour sa petite taille.

Nous avons tracé sa caractéristique électrique $I=f(U)$



On s'aperçoit que la Del fonctionne en « tout ou rien ». Tant que la tension à ses bornes est inférieure à environ 1,8V, elle n'est pas traversée par du courant, donc ne s'éclaire pas. Pour des valeurs au dessus de 1,8V, l'intensité atteint rapidement sa valeur maximale (90mA). Nous alimentons notre Del avec une tension alternative, la Del ne va donc s'allumer que lorsque la tension dépasse ce seuil.

Nous avons opéré de même pour une lampe à incandescence. Sa caractéristique traduit une proportionnalité entre le courant qui la traverse et la tension à ses bornes. On peut espérer obtenir sur notre photo davantage de nuances de luminosité.



Nous avons donc opté pour une lampe à incandescence. Le problème est que la luminosité de cette lampe est supérieure à celle d'une Del, ce qui provoque facilement la saturation des pixels du capteur photo. Pour y remédier nous avons filtré cette lumière à l'aide de vernis à ongles sur le verre de l'ampoule ou avec des filtres colorés ce qui nous permet de faire varier les couleurs.

4. Et la réflexion?

Longtemps, nous avons sous-estimé la réflexion des ondes. Pourtant nous observons souvent des « zones floues » en périphérie de nos photos. Inspirés par la chambre « sourde » que nous avons visitée au LAUM, nous avons disposé de la mousse acoustique autour de notre table traçante pour limiter toute réflexion. De nouveau, nous avons noté une nette amélioration.

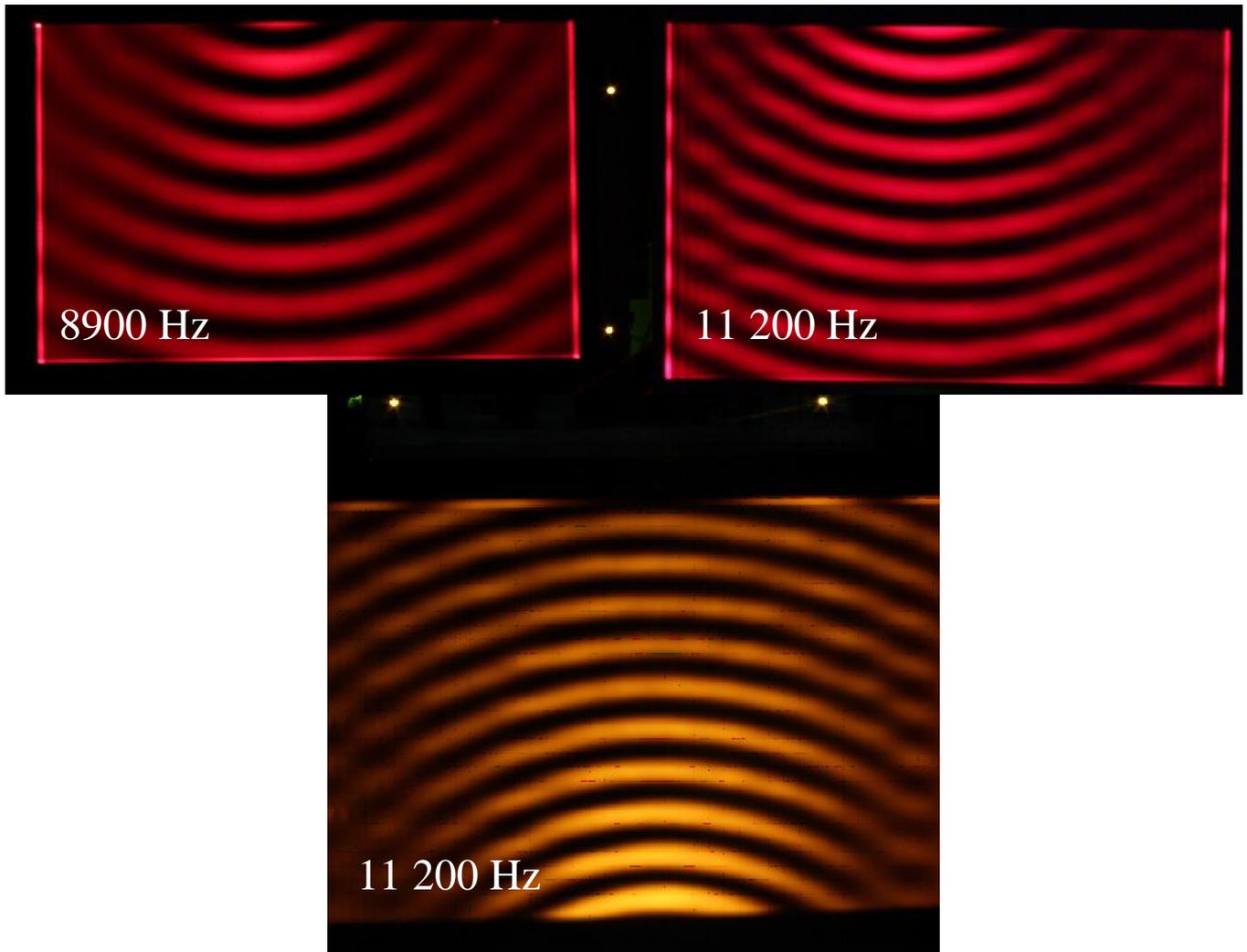


Lié à la réflexion des ondes, un défaut (bleu) que nous limitons désormais grâce à notre mini « chambre sourde »

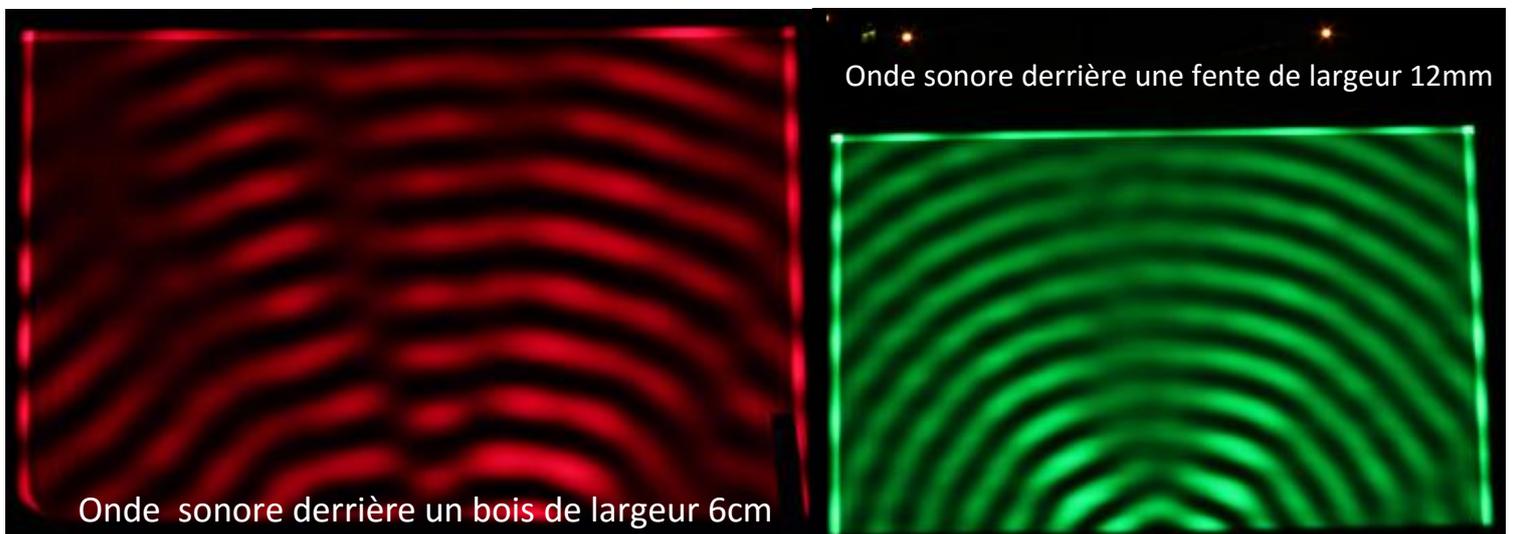
E. Nos plus belles photographies et leurs exploitations

Pas si simple de prendre une photographie du son ! De très nombreuses photos furent ratées malgré la mise au point et le respect méthodique d'un protocole en une vingtaine d'étapes. Après plus d'un an et plus de 1000 photos, voici quelques unes de nos photos les plus réussies :

Ondes sonores à la fréquence de...



Mais aussi..

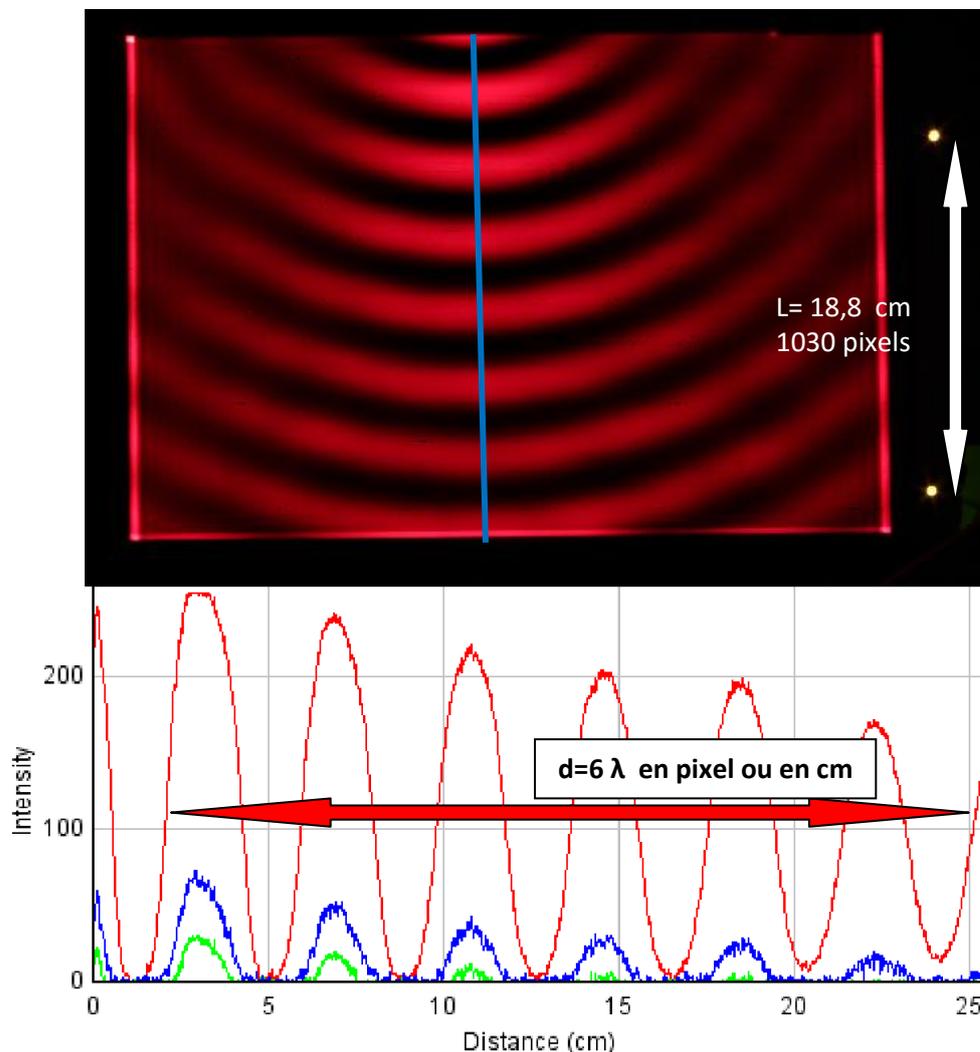


Nous avons également une photo « devinette » à vous proposer

Que représente cette photo ?



Numérisées, nos photos présentent un réel avantage par rapport à celles de Kock, car nous pouvons utiliser un logiciel de traitement d'image tel que « Image J ». Nous avons donc posé sur notre table traçante deux petites lampes jaunes que nous photographions également et nous informons le logiciel de la distance qui les sépare afin qu'il puisse faire la conversion « pixel \rightarrow cm ». On peut donc déterminer n'importe quelle distance sur la photo, comme par exemple la longueur d'onde λ et tracer le profil de la luminosité des pixels le long d'une droite comme ci dessous :



1. Longueur d'onde et vitesse du son

Dans l'exemple précédent, à l'aide du profil d'intensité le long d'une droite, nous pouvons déterminer la longueur d'onde. Ainsi avec $d=6\lambda = 23,0$ cm on en déduit $\lambda = 3,83$ cm

$f = 8900$ Hz pour cette photo, on peut donc en déduire une valeur de la célérité $v = \lambda \times f = 341 \text{ m.s}^{-1}$

Quelle incertitude associer à une telle mesure?

$$\text{On a } v = \lambda \times f = \frac{d(\text{pix})}{6} \times \frac{L(\text{cm})}{L(\text{pix})} \times f$$

Les incertitudes sur $L(\text{pix})$ et $d(\text{pix})$ sont liées aux erreurs inévitables des utilisateurs d'image J ; on les estime en utilisant l'outil statistique. Nous avons donc demandé à nos camarades de terminale S d'effectuer des mesures de $L(\text{pix})$ et $d(\text{pix})$ pour une même photographie avec $f = 11320$ Hz et $L = 31,3$ cm.

Pour $L(\text{pix})$, nous avons relevé ainsi 26 valeurs indépendantes. La valeur moyenne est :

$$L_{\text{moy}} = 2715,06 \text{ pix}$$

L'écart-type qui permet d'estimer la dispersion des mesures est :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - L_{\text{moy}})^2} \quad \text{soit } \sigma = \sqrt{\frac{1}{26-1} \sum_{i=1}^n (L_i - 2715,06)^2} = 5,96$$

L'incertitude-type élargie est :

$$\Delta L = 2 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 2 \times \frac{5,96}{\sqrt{26}} = 2,338 \text{ pix soit au final } L_{(\text{en pixel})} = (2715 \pm 2) \text{ pixel}$$

Pour mesurer les incertitude sur d on procède de même et on obtient : $d = (1571 \pm 9) \text{ pix}$

L'incertitude sur la mesure de $L(\text{cm})$ est à la fois liée à notre instrument de mesure graduée au mm et à l'expérimentateur. Après quelques mesures indépendantes, nous pouvons écrire :

$$L_{(\text{en cm})} = (31,3 \pm 0,1) \text{ cm}$$

L'afficheur de notre GBF indiquant trois chiffres après la virgule (11,320 kHz), nous pouvons donc écrire :

$$f_{(\text{Hz})} = (11320 \pm 1) \text{ Hz}$$

Au final , on utilise la formule qui donne l' incertitude sur la vitesse du son

$$\Delta v = v \times \sqrt{\left[\frac{\Delta d}{d} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_{(\text{cm})}}{L_{(\text{cm})}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_{(\text{pixel})}}{L_{(\text{pixel})}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta f}{f} \right]^2}$$

$$\Delta v = 341,7 \times \sqrt{\left[\frac{9}{1571} \right]^2 + \left[\frac{0,1}{31,3} \right]^2 + \left[\frac{2}{2715} \right]^2 + \left[\frac{1}{11320} \right]^2} = 2,2 \text{ m.s}^{-1}$$

La vitesse du son dans l'air est donc d'après notre photographie $(341,7 \pm 2,2) \text{ m.s}^{-1}$

La précision relative est $2,2 / 341,7 = 6,4 \cdot 10^{-3}$ soit 0,6%

Commentaires, autocritique et conclusion

Pour une telle mesure, nous avons une idée de la valeur attendue soit $340,5 \text{ m.s}^{-1}$ à 15°C et $343,4 \text{ m.s}^{-1}$ à 20°C . Nous avons oublié de mesurer la température lors de la prise du cliché. Nous l'estimons à un peu moins de 20°C . La valeur « vraie » de la vitesse du son lors de notre prise de photographie est certainement comprise dans notre plage d'incertitude $[339,5-343,9] \text{ m.s}^{-1}$.

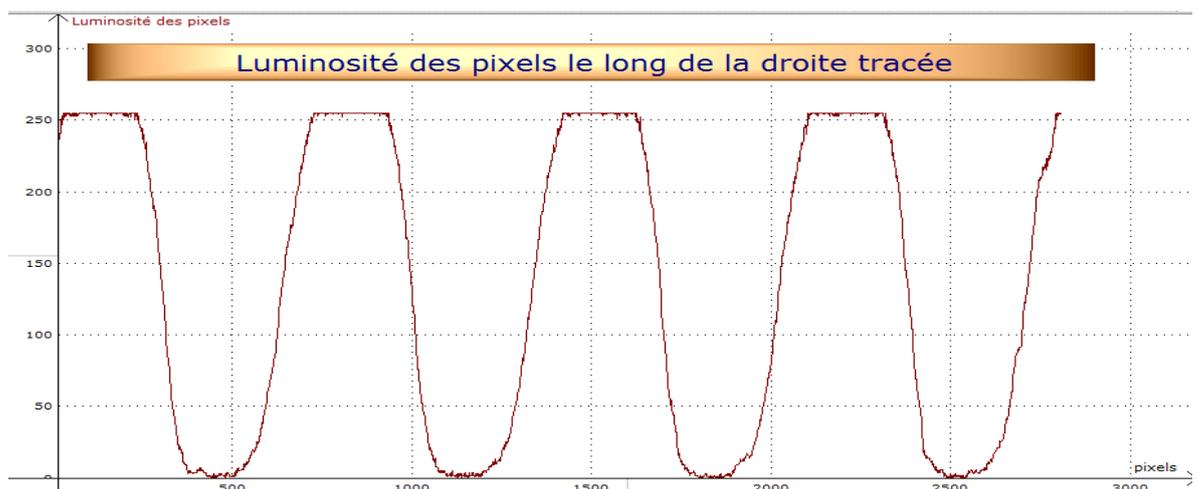
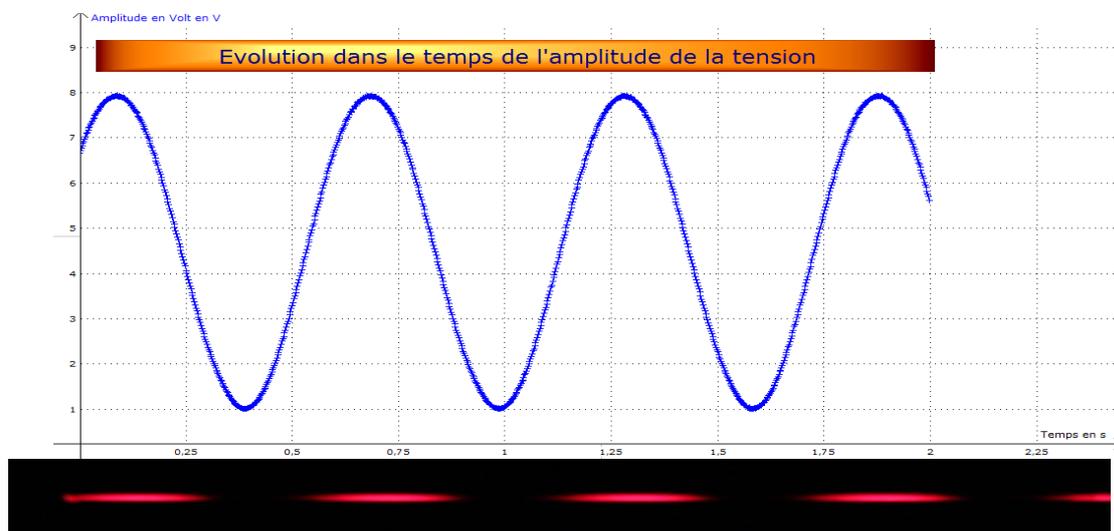
Le travail précédent a été réalisé pour une même photographie. Si nous prenons garde d'éviter les erreurs systématiques (erreurs de parallaxe par exemple) nous sommes assurés d'une mesure de la vitesse du son avec une très bonne précision.

2. Que traduit la luminosité des pixels ?

Le maximum de luminosité des pixels décroît lorsqu'on s'éloigne du haut parleur.

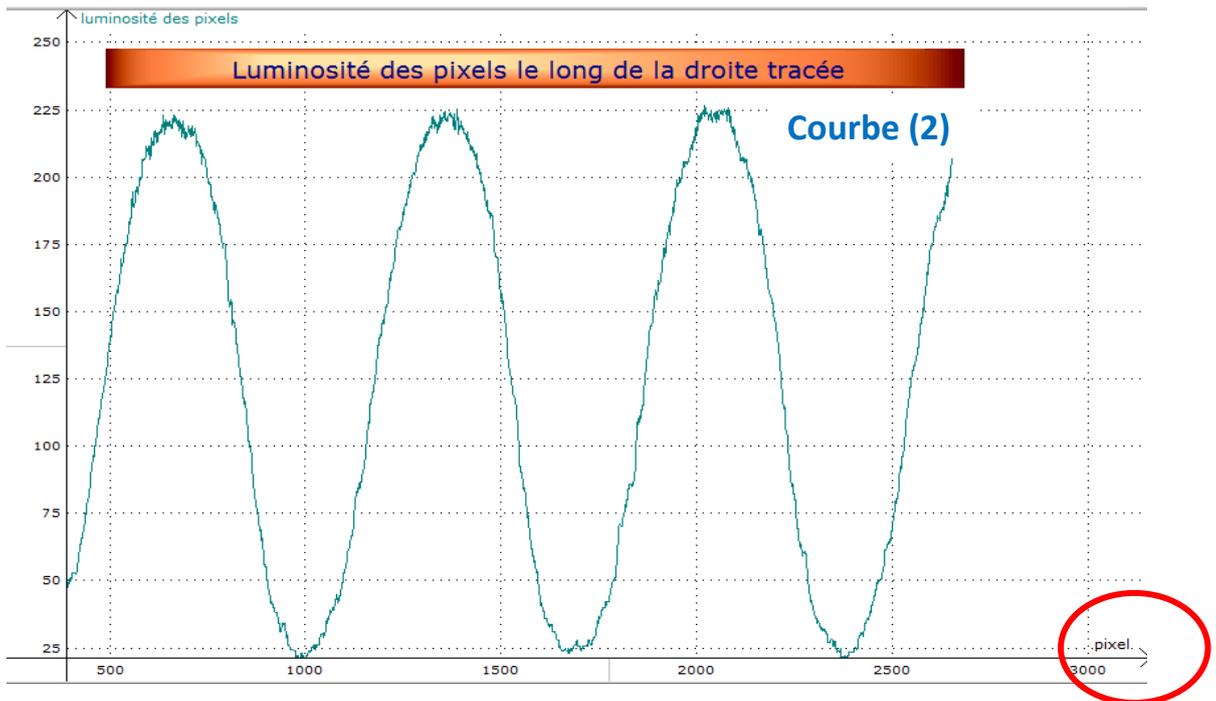
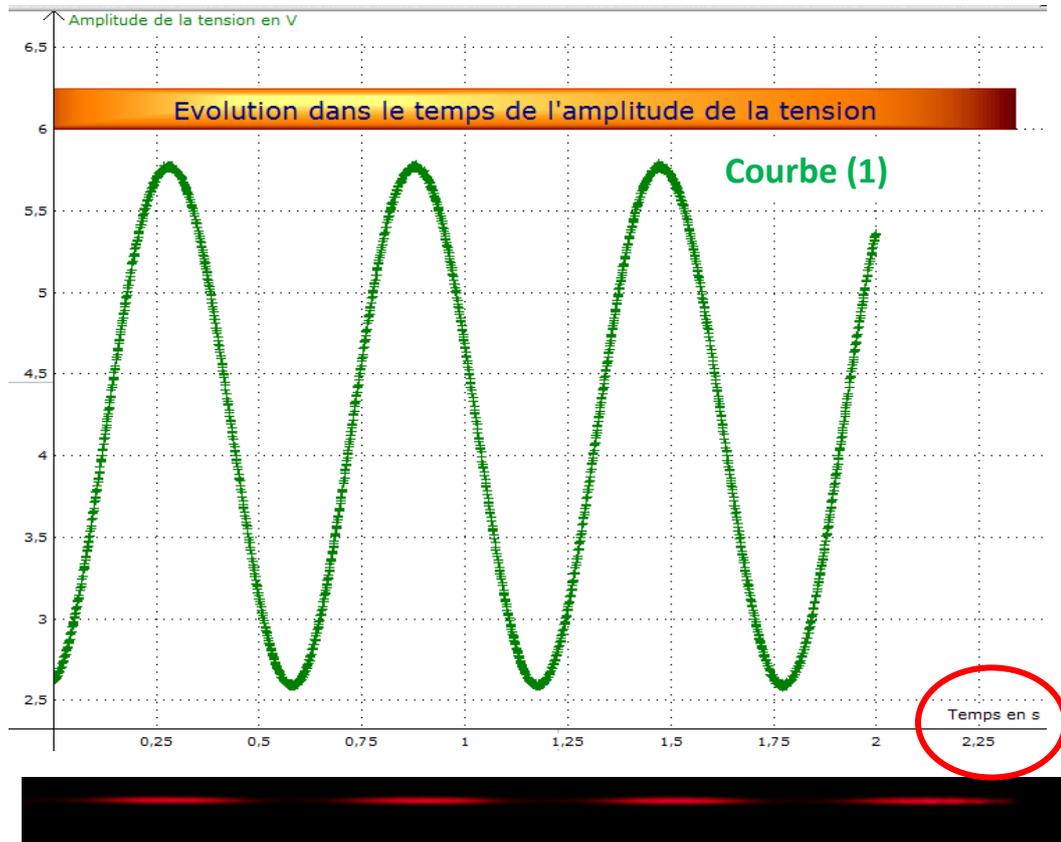
En alimentant directement notre lampe à l'aide d'une tension modulée en amplitude dont nous pouvons faire varier facilement les caractéristiques, nous sommes parvenus à tracer pour un balayage de la lampe sur une seule largeur (photo au centre) :

- l'évolution de l'amplitude de la tension d'alimentation de la lampe en fonction du temps
- l'évolution de la luminosité des pixels le long de la photographie



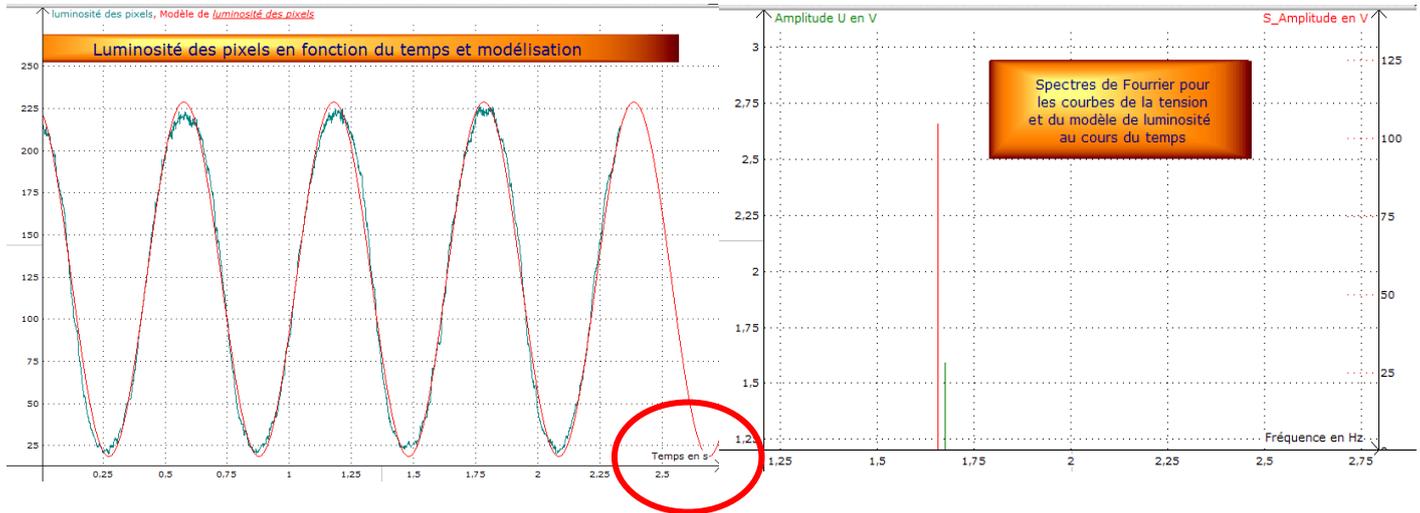
On remarque que si l'amplitude de la tension dépasse un certain seuil (environ 6V), alors les pixels sont saturés.. De plus, si l'amplitude est de 1V, on constate que la luminosité des pixels est nulle : La lampe n'éclaire pas !

Nous avons refait ce travail en limitant l'amplitude de la tension d'alimentation de notre lampe entre 2,6V et 5,8V. Nous obtenons les courbes suivantes.



Cette fois ci, il n'y a plus saturation. Les deux courbes sont sinusoïdales, mais la courbe (2) ne représente pas une évolution dans le temps mais selon une droite graduée en pixels.

Après avoir déterminé avec précision, la vitesse du couple micro-lampe à l'aide d'une chronophotographie placée en annexe (on trouve $13,2 \text{ cm}^{-1}$), nous sommes parvenus à transformer les pixels en temps, ce qui permet de comparer réellement les deux courbes. Nous avons alors modélisé la courbe (2) en fonction du temps (à gauche) puis comparé les deux fréquences des fonctions (1) et (2) à l'aide d'un spectre de Fourier.



Les deux courbes (1) et (2) sont donc toutes deux sinusoïdales et de même fréquence, comme en atteste le spectre de Fourier pour ces deux courbes (un écart de 0.02Hz pour 1.67Hz !)

Conclusion et prolongement à venir

Si on évite la saturation des capteurs (tension trop élevée) ou une trop faible luminosité (tension inférieure à environ 2V), la luminosité des pixels est proportionnelle à l'amplitude de la tension d'alimentation de la lampe. Elle-même dépend du niveau sonore reçu par le microphone.

Nous cherchons actuellement à relier directement la luminosité des pixels au niveau sonore du son reçu par notre microphone.

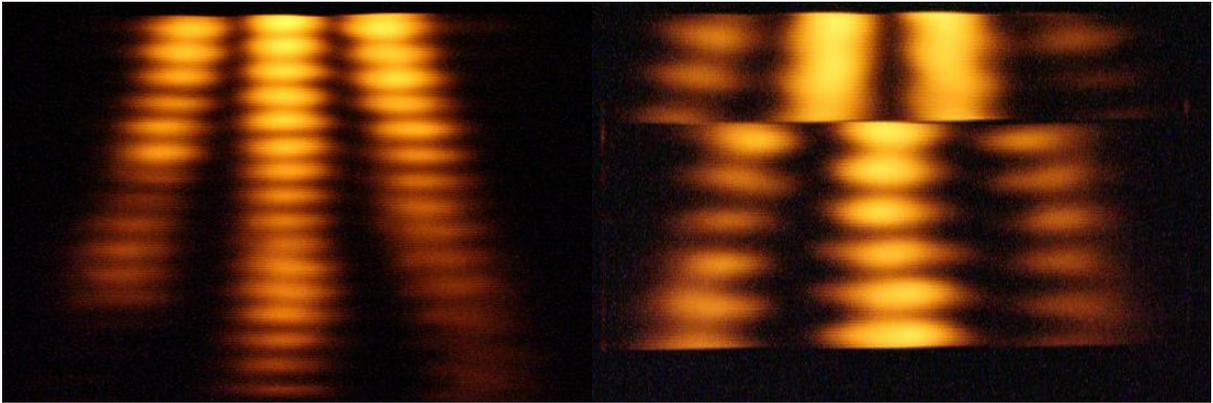
CONCLUSION

Notre projet a beaucoup interpellé pendant ces 18 mois, comme nous l'avons-nous-mêmes été en regardant la petite photo de Kock la première fois. Nous l'avons fait évoluer en faisant appel aux différentes disciplines scientifiques qui se sont présentées sur notre parcours.

Alors peut-on voir le son ?

Non.. mais nous pensons avoir mis en place un dispositif, fiable et peu coûteux qui nous permet de reproduire la réalité du champ sonore. Notre dispositif nous permet de répondre à de nombreuses questions répondants à notre curiosité.

A ce propos, voici pour remercier les lecteurs parvenus jusqu'à ces dernières lignes, une dernière devinette. Que représentent selon vous ces clichés ?



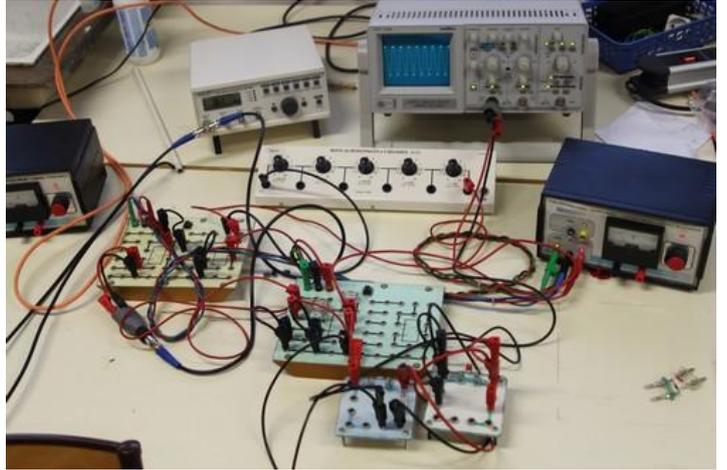
Bibliographie

- « Ondes sonores et ondes lumineuses », W.Kock, *Dunod*
- « Sons et lumière », B. Valeur, *Belin*
- « Initiation à l'acoustique », A.Fischetti, *Belin*.
..et sites internet

Annexes

Quelques photos de nos activités à l'atelier

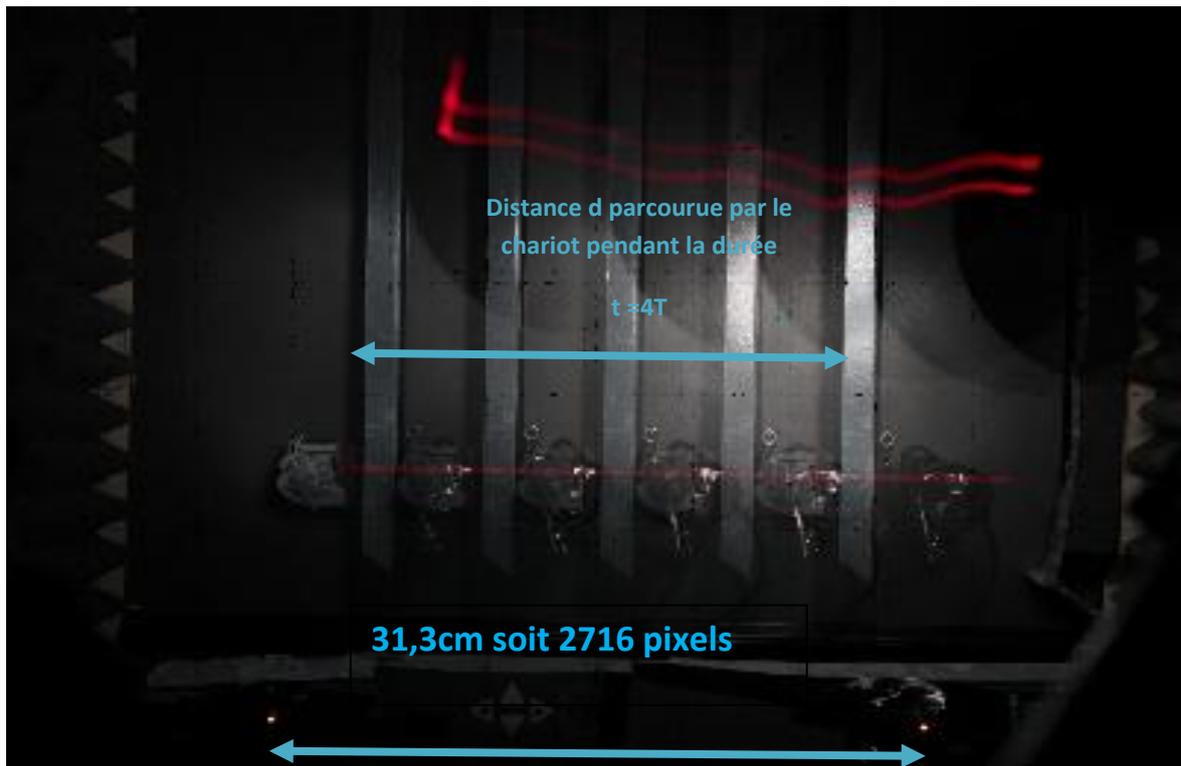
Nos premiers montages en électronique..



..avant la réalisation d'une carte imprimée



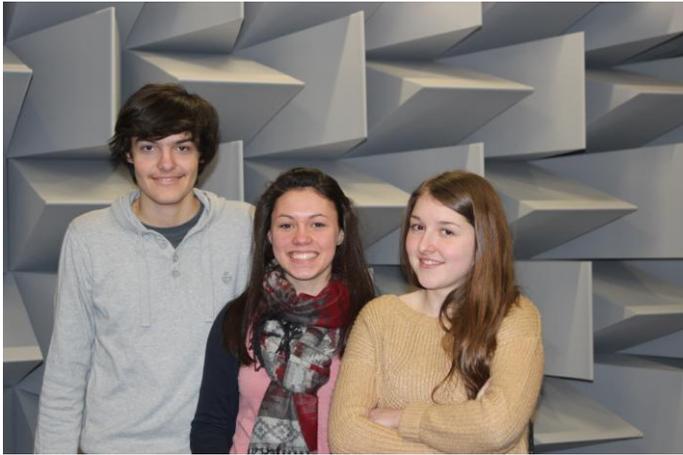
Notre chronophotographie (paragraphe F.2)



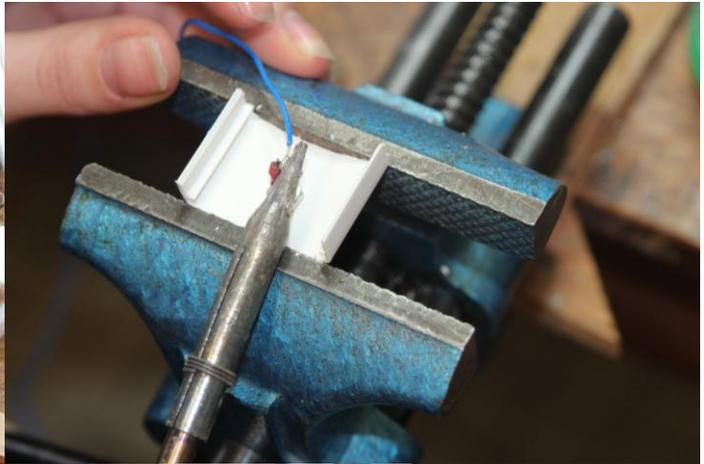
A l'exposcience; Nicolas en pleines explications...



Avec nos « collègues » de l'atelier



Dans la chambre sourde du LAUM



Confection des lampes repères