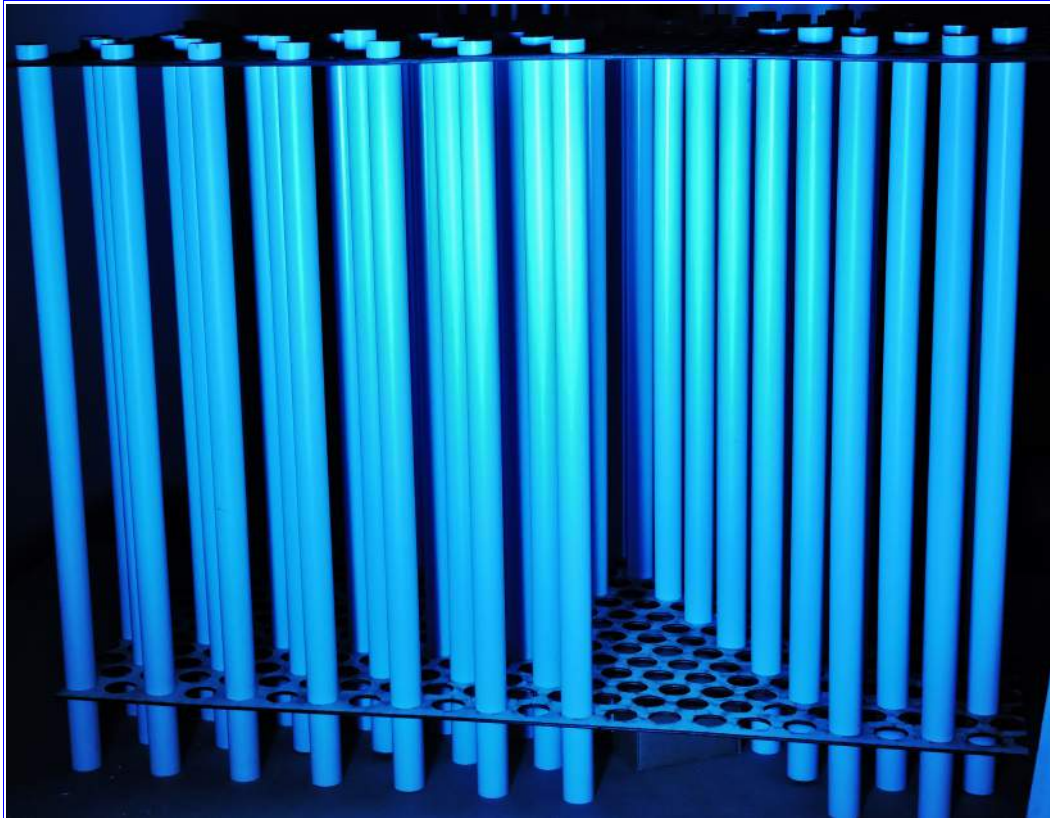


Sculpter les sons



Léa DACCACHE, 1^{ÈRE} S

Lauriane FAU, T^{ALÈ} S

Anysia MOLIÈRE - - DESVAUX, T^{ALÈ} S

Collège Lycée Expérimentale d'Hérouville Saint Clair

Encadrant : Cédric VANDEN DRIESSCHE

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	2
ABSTRACT.....	2
INTRODUCTION.....	3
1. « SCULPTER LES SONS ».....	4
2. EXPÉRIENCE DE LA CUVE À ONDES	5
2.1. Maquette 3D.....	5
2.2. La planche à clous.....	6
3. EXPÉRIENCES ULTRA-SONS.....	8
3.1. Un réseau sonore ?	8
3.2. Approfondissement des expériences.....	11
4. L'ORGUE DE CORTI.....	13
4.1. Structure et configuration.....	13
4.2. Expériences.....	14
CONCLUSION.....	17
SOURCES.....	18
REMERCIEMENTS.....	18

RÉSUMÉ

Nous sommes trois élèves à travailler sur le sujet des ondes sonores et des interférences. Notre projet « Sculpter les sons » est inspiré d'un article de *Pour la Science* qui montre comment une sculpture d'Eusebio Sempere avait la propriété de modifier l'environnement sonore en jouant le rôle de cristal sonore.

Ce sujet nous a toutes attirées car cette vision de la physique mélangée à de l'artistique est rarement abordée dans notre cursus scolaire.

L'objectif de ce projet est de construire un Orgue de Corti à la manière de David Prior et Frances Crow. Mais nous avons dès le départ rencontré des difficultés car pour comprendre la manière dont fonctionne cette structure il nous fallait étudier les interférences. Pour nous familiariser avec le sujet nous avons illustré le principe visuellement avec une cuve à ondes et travaillé à une plus petite échelle avec des ultrasons. Nous avons fabriqué une maquette de ce que nous voulons réaliser et commencer à faire des tests avec afin de mieux comprendre son fonctionnement, mais un nombre infini d'expérience s'offrent à nous.

ABSTRACT

We are three students of the Experimental Middle and High School of Hérouville (all following a scientific track) working on the topic of soundwaves and interferences. Our project "Sculpt the sounds" is inspired by an article from *For Science* showing how the Spanish artist Eusebio Sempere's structure had the property to change the sound environment as a sonic cristal. This subject attracted us all since this outlook of physics mixed with art is rarely taught this way in our school curriculum.

The objective is to build an Organ of Corti in the manner of David Prior and Frances Crow. However, we experienced difficulties from the beginning to understand the way this structure works, we had to study the interferences. To familiarize with the topic we illustrated the principle visually with a wavetank and worked with a smaller scale using ultrasounds. We made a mock up about that's we want to realise. We began to do tests for have more understanding about the Organ's operation, but we have an infinity number of experiences possible.

INTRODUCTION

Nous travaillons sur la manière dont l'orgue de Corti affecte le son environnant. Avant de réaliser notre propre structure nous devons étudier les interférences et les ondes.

Comment une structure telle l'Orgue de Corti provoque des interférences sonores ?

Nous expliquerons donc ce que sont les interférences, le phénomène de diffraction et le type d'ondes que sont les ondes sonores.

Notre travail se découpe en trois parties :

- Une matérialisation visuelle à l'aide d'une cuve à ondes,
- Des expériences à l'aide d'ultrasons et d'obstacles pour tester des maquettes sur une plus petite échelle
- La construction et l'expérimentation d'une sculpture sonore type Orgue de Corti.

A la fin de ce mémoire nous présentons les résultats auxquels nous avons aboutis pour l'instant ainsi que nos perspectives de recherche.

1. « SCULPTER LES SONS »



Órgano de Eusebio Sempere
Exposé à *Juan March*
Foundation à Madrid

Notre travail a été guidé par l'article «*Sculpter les Sons*» de *Pour la science* écrit par Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK. Eux-même partant de l'œuvre d'art d'Eusebio Sempere, un réseau de tige semblable à un cristal sonore. Une onde de fréquence donnée qui arrive dans le réseau de tige ou du cristallin sera diffracté dans un certaines direction et pas dans d'autres provoquant des interférences.

L'Organ of Corti, de son nom français Orgue de Corti, est un cristal sonore, inventé et fabriqué par l'architecte Frances Crow et l'artiste David Prior. Il n'émet aucun son en lui même, mais transforme les sons présents à leur passage.

Nous avons contacté l'architecte Frances Crow par mail et avons effectué plusieurs échanges, elle semble très intéressée par notre projet et compte même mettre nos résultats sur le site internet de ses recherches sur l'Orgue de Corti. Nous avons pu lui poser beaucoup de questions, afin d'avancer dans notre projet de sculpture sonore. Nous lui avons demandé pourquoi et comment avait-elle choisi le diamètre des tubes utilisé, l'espacement entre les tubes, la matière des tubes, etc.

Frances Crow a accepté de nous donner le plan 3D d'une maquette de l'Orgue. Nous l'avons incluse dans les expériences de la cuve à ondes. En effet, cette structure serait trop petite pour que les effets soient audibles

Nous avons envoyé à Frances Crow les mesures choisies pour notre maquette de sculpture sonore, afin de savoir si elles étaient pertinentes. Notre échelle est trop petite pour que l'effet s'entende, cependant elle nous a vivement conseillé de le faire, elle en a fait une aussi.

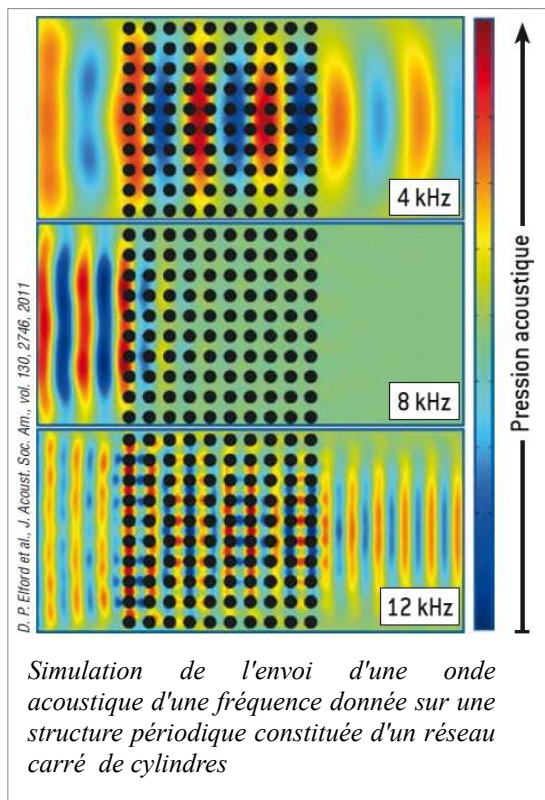


2. EXPÉRIENCE DE LA CUVE À ONDES

Il s'agit d'illustrer le principe des interférences de manière visuelle dans l'eau, à l'aide d'une maquette 3D de l'Orgue de Corti qu'on pose dans une cuve à ondes. Nous souhaitons étudier l'effet de cette structure sur les ondes générées par la cuve afin d'obtenir des images comparables à celles obtenues grâce aux calculs numériques dans la publication « *Sculpter les sons* » de *Pour La Science* . En **observant ou non le passage** de l'onde transversale à travers la maquette

L'intérêt de faire des expériences avec une cuve à ondes réside dans son aspect pédagogique : sans schéma ni calcul, en voyant l'onde on comprend le phénomène de propagation et celui des interférences (si par exemple l'on pose un obstacle). L'observation étant visuelle, on saisit tout de suite que c'est la mini-structure qui interfère ou non dans le passage de l'onde mécanique qui la traverse si par exemple l'on a un résultat comme celui obtenu à 8 kHz dans l'article.

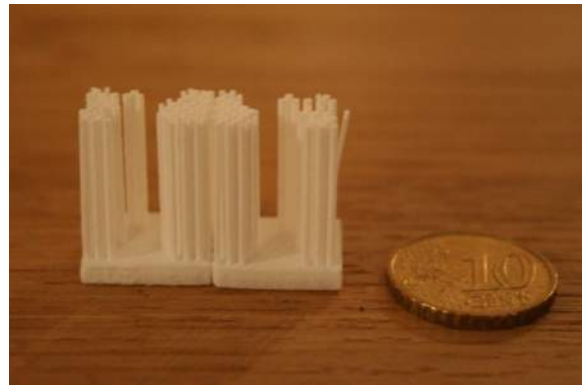
2.1. Maquette 3D



Pour fabriquer une maquette de notre structure, nous avons pensé à contacter l'architecte et le physicien anglais, qui nous ont fourni les plans d'une de leurs structure, car il est trop difficile pour nous de faire ces calculs. De cette manière, nous sommes sûres que l'organisation des tubes aura un effet sur l'onde. Cependant, les plans étaient en 2D, nous avons donc coopéré avec un architecte, Yves TELLIER, qui nous a passé les plans en 3D. Ainsi, ils étaient imprimables à l'imprimante 3D, ce qui garantit une certaine exactitude. Nous avons projeté d'imprimer cette maquette au Fablab de Colombelles, qui dispose de ce matériel. Malheureusement ,

le temps d'impression est estimé à 56 heures, ce qui nous empêche de rentrer dans les créneaux horaires. Nous avons tenté de la faire imprimer autre part, mais le problème reste le même, de plus, nous n'avons pas les moyens financiers.

Nous avons tout de même obtenu une maquette, mais elle est loin d'être dans les bonnes dimensions.

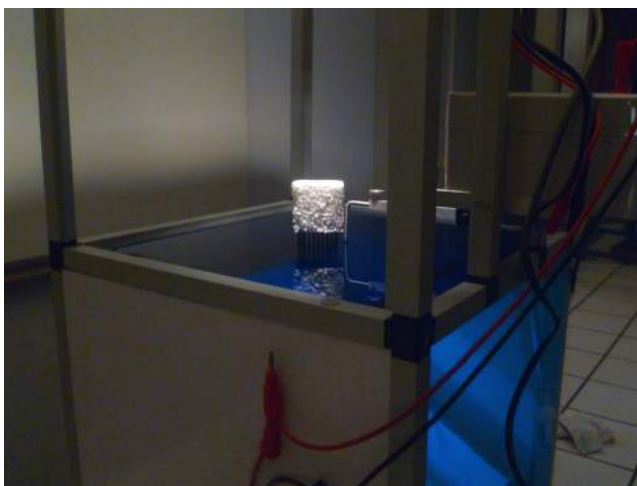


Face à ces contretemps, nous sommes allées vers une idée plus simple : planter des clous dans une planche, la retourner dans la cuve et faire nos expériences avec.

2.2. La planche à clous

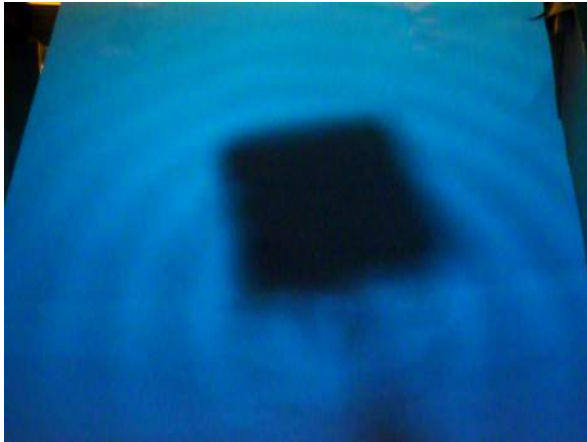
On utilise donc un carré de polystyrène expansé dans lequel on plante de fins clous espacés d'environ 1cm. Elle consiste à envoyer une onde d'une fréquence donnée sur une structure constituée de cylindres. On remplace l'onde acoustique par une onde mécanique et la maquette 3D par une planche à clous.

Nous avons simplement coloré l'eau avec du bleu de Méthylène pour mieux voir.



Il était presque impossible de distinguer l'onde en regardant à la surface c'est pourquoi sur le miroir de la cuve, nous avons placé une feuille blanche pour observer les ombres

des maxima et minima de l'onde. Ensuite, on fait varier le fréquence de l'onde et on observe son état à l'entrée et à la sortie : on vérifie si elle arrive à passer ou si elle est bloquée par la structure.



A 10 Hz, l'onde passe sans problème (les petits semblants d'atténuation sont sans doute dus à un défaut de l'image).



Mais à 15 Hz environ, sur un des côtés de la structure l'onde est presque complètement atténuée à sa sortie : l'a structure l'a quasiment bloquée dans son passage.

Conclusion : Selon sa fréquence l'onde peut être arrêtée dans son passage. Notre structure permet donc bien d'interférer avec l'onde qui la traverse. Ce sont des résultats porteurs d'optimisme : nous avons réussi à avoir des résultats similaires à ceux de l'article, mais avec un type d'onde qui est différent (onde acoustique dans l'article et onde mécanique dans la cuve). Notre objectif est atteint !

Nous projetons d'améliorer le plus possible les conditions de l'expérience pour avoir une meilleure visibilité, et observer plus de phénomènes. Nous essayons toujours de trouver un moyen d'imprimer la maquette 3D.

Cette expérience n'est pas d'une grande précision, mais cela fait partie de la démarche avec la cuve à ondes : sans aller loin dans la précision, on obtient des résultats pourtant très évidents, qu'on pourra améliorer par la suite.

3. EXPÉRIENCES ULTRA-SONS

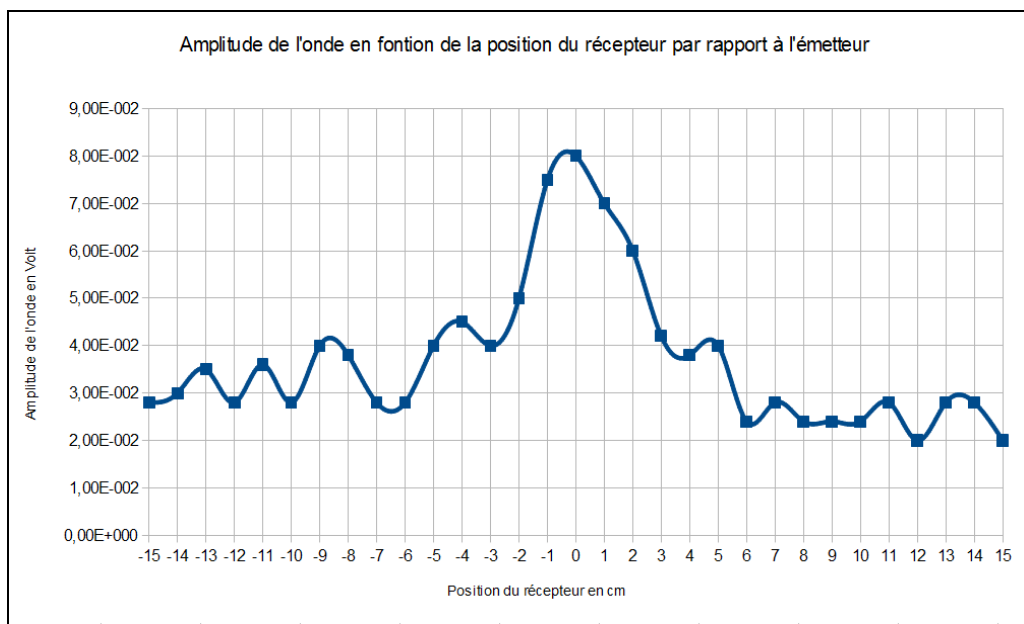
Afin d'étudier le comportement du son à plus petite échelle, nous avons fait des expériences avec des ultrasons. En effet, pour observer des interférences, on doit utiliser des obstacles et des espacements de l'ordre de grandeur des ondes étudiées. Pour le faire avec des ondes réellement audibles, nous devons avoir des distances proches de 30cm, les ultrasons nous permettent de travailler avec des structures de l'ordre du cm. De plus, le matériel disponible à leur étude est assez précis.

3.1. Un réseau sonore ?

La première expérience est une étude des caractéristiques d'ondes ultra sonores après le passage d'une série de 6 tubes censés simuler le cristal sonore.

Configuration de l'expérience :

- Les tubes sont espacés d'1 cm,
- Le récepteur est déplacé par rapport au reste du montage le long d'une ligne perpendiculaire à l'axe d'émission de l'émetteur, on prend une mesure tous les centimètres (voir schéma en annexe p.1). On obtient le graphique ci-dessous.

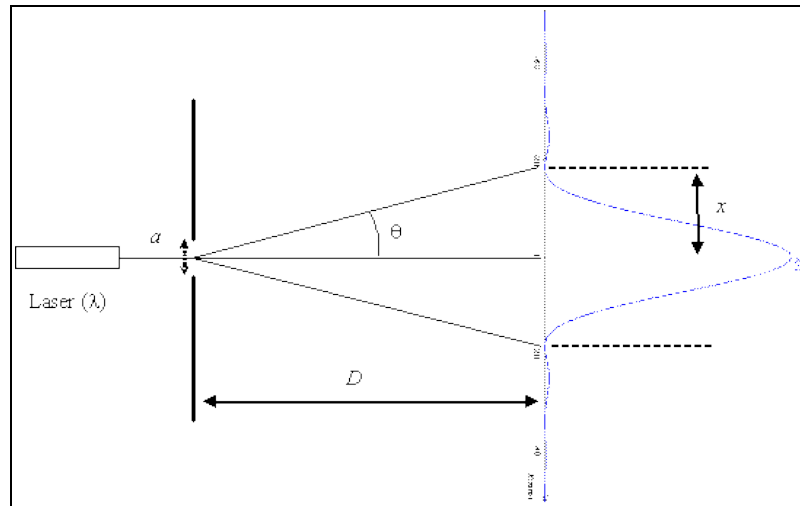


(voir tableau de valeurs en annexe p.1)

Ce graphique ressemble à un phénomène de diffraction (fonction $\left(\frac{\sin(u)}{u}\right)^2$).

La fonction $\left(\frac{\sin(u)}{u}\right)^2$ semble effectivement pertinente pour décrire le phénomène observé.

Par le calcul :



- Sur ce schéma : $\theta \approx \frac{\lambda}{a}$ et $\tan(\theta) = \frac{x}{D}$ or $D \gg x$ donc $\tan(\theta) \approx \theta$, d'où

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{x}{D} \text{ et } x = \frac{\lambda \times D}{a} .$$

- Pour notre expérience, $\lambda = v \times T = 340 \times 20 \cdot 10^{-6} \approx 6,8 \cdot 10^{-3} m$, $a = 1 cm$,
 $D = 12,5 cm$.

Si notre hypothèse est bonne : $x \approx \frac{\lambda \times D}{a} = \frac{6,8 \cdot 10^{-3} \times 12,5 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2}} \approx 8,5 cm$

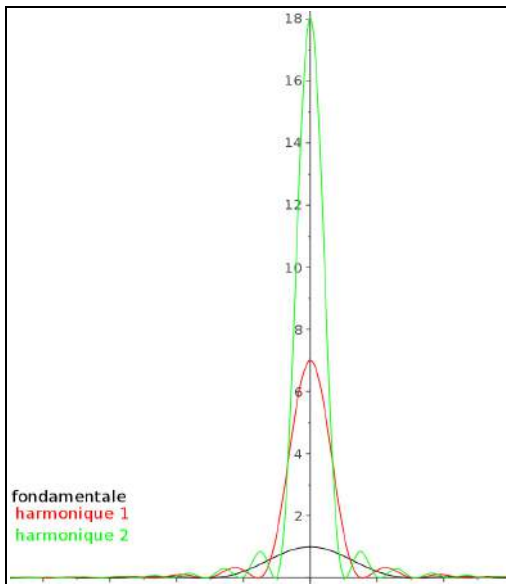
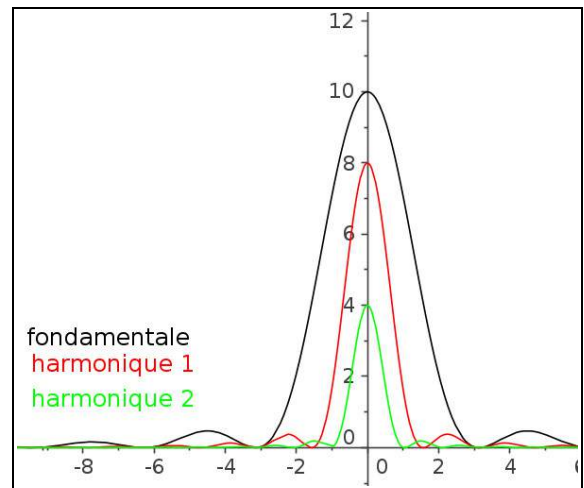
Or sur notre graphique, $x \approx 7 cm$, notre hypothèse est probable, Plusieurs facteurs peuvent expliquer cet écart :

- vitesse des ultrasons non mesurée dans les conditions de l'expérience
- phénomène d'interférences plus complexe qu'une simple diffraction
- non normalisation des résultats

Si cette hypothèse est vraie, nous pouvons faire diffracter un son, par exemple avec une note de musique, nous pourrions alors décomposer toutes les harmoniques de ce son.

Cependant, cette décomposition ne serait pas audible car les différentes harmoniques se superposeraient dans le cas d'un son « naturel ».

Nous avons demandé l'aide d'un physicien et musicien nommé Tangi Miossec, qui pourra nous aider à créer un son parfaitement adéquat à cette expérience, c'est-à-dire contenant des harmoniques d'intensité inversement proportionnelle à la fréquence. On pourrait ainsi avoir un effet sur le son le plus net et audible possible.

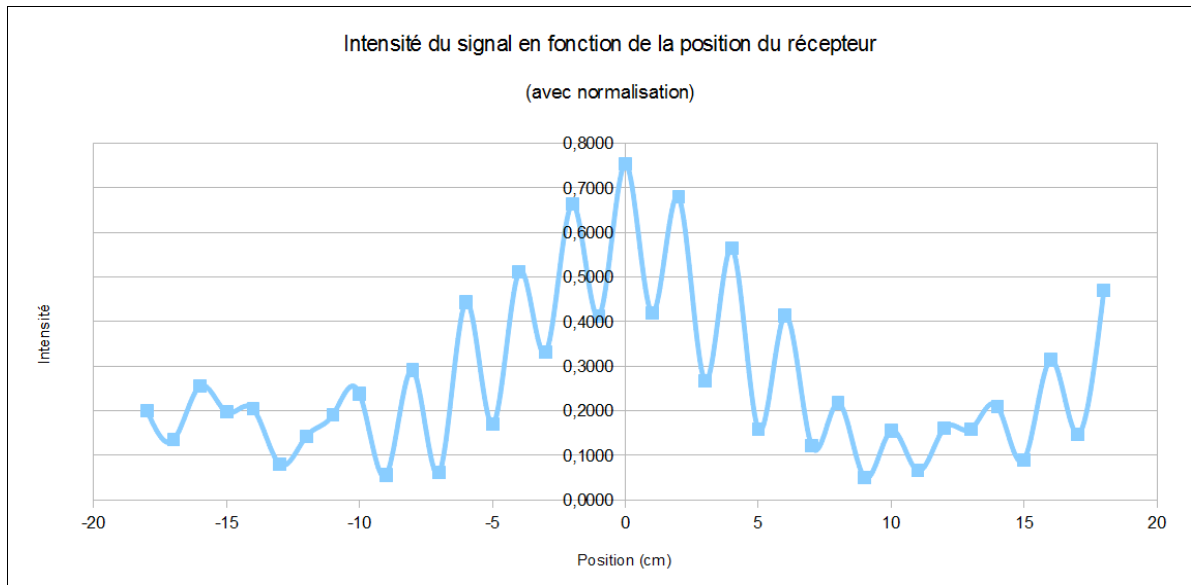


Mais notre courbe ressemble plus à ce type de courbe. Avec le couloir de tube, on ferait donc non seulement une fente, une décomposition du son, mais aussi un filtre sonore, qui atténuerait la fondamentale du son.

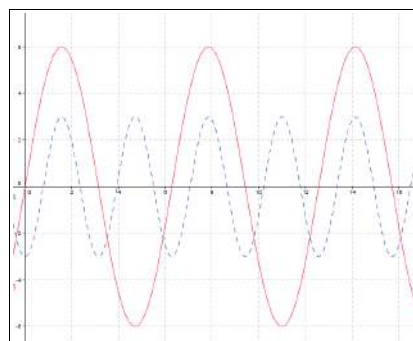
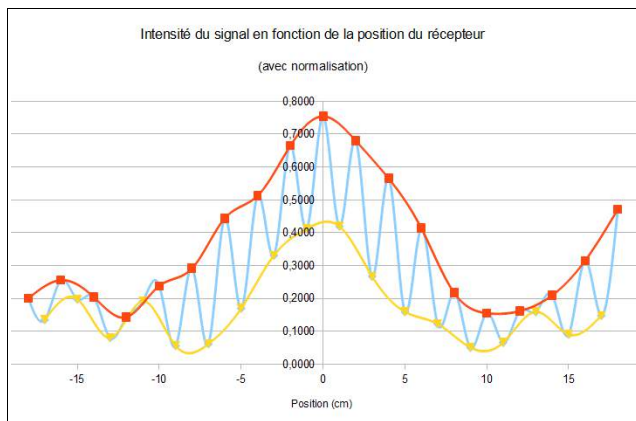
3.2. Approfondissement des expériences

Nous avons par la suite fait une batterie d'expériences similaires en utilisant des outils plus précis et en normalisant nos résultats à l'aide de mesures à vide (voir tableau de valeur des mesures à vide et graphique en annexe p.2).

Expérience 1 : identique à la précédente, mais effectuée avec des outils plus précis (voir tableau de valeurs en annexe p.2). On obtient alors cette courbe :



Si on prend en compte une mesure sur deux, on retrouve la figure de diffraction déjà observée.



L'oscillation observée peut être due :

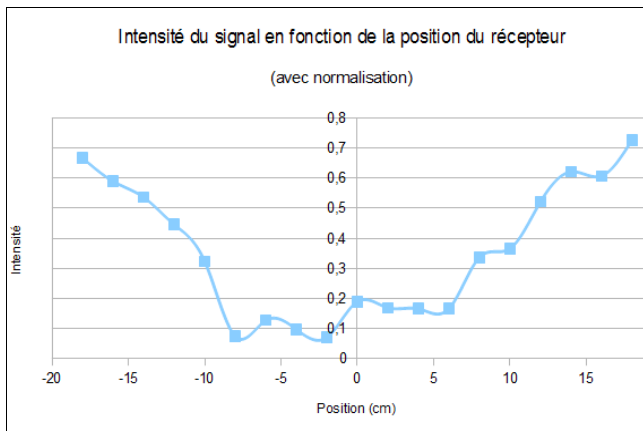
- A un bruit de fond, cependant la batterie de tests a été réalisée dans les mêmes conditions pour chaque expérience. Les oscillations apparaîtraient donc sur les autres graphiques, ce n'est pas le cas.

- A l'utilisation d'un oscilloscope numérique sur courant alternatif.
- A la présence d'une double fréquence dans le son émis par l'émetteur .

←

Expérience 2: similaire à l'expérience 1. Différence : l'émetteur d'ultras sons est positionné plus loin des tubes, et donc du récepteur (voir schéma, tableau de de valeurs à vide et graphique à vide en annexe p.3).

On obtient le graphique suivant (voir tableau de valeurs en annexe p.3).



Les tubes semblent réagir comme un obstacle plein (un cube par exemple). En effet le son est très diminué en face de la structure, et grimpe à environ 15cm (des deux côtés), cela correspond à l'endroit où le récepteur est à côté des obstacle et plus devant.

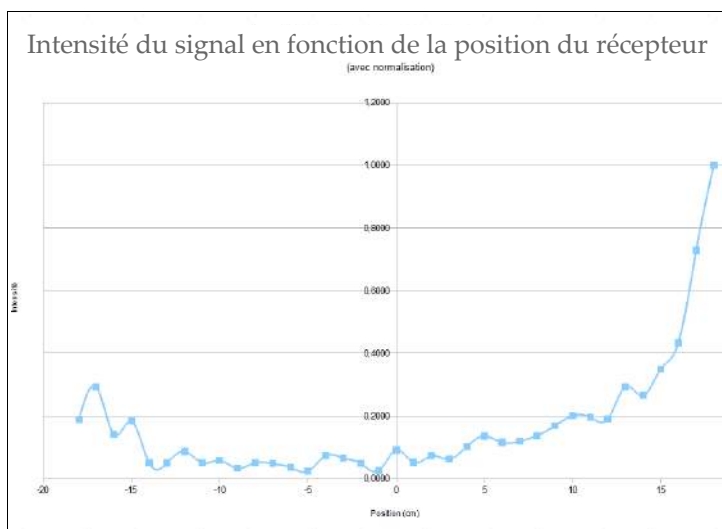
L'augmentation qui suit après 15cm

peut être expliquée par le phénomènes de réflexion présent au niveau des bords. La quasi symétrie du graphique confirme cette théorie.

Expérience 3 : 5 tubes sont placés en quinconces entre l'émetteur et le récepteur, l'émetteur est collé aux tubes (voir schéma en annexe p.4).

On obtient le graphique suivant (tableau de valeur en annexe p.4).

Les tubes font aussi obstacles, l'intensité diminue lorsqu'ils sont devant le récepteur. La



zone où le son est atténué est plus importante que lors de l'expérience 2.

En effet, $I < 0,2$ pour

- - $8\text{cm} < p_{\text{position}} < 6\text{cm}$, dans l'expérience 2,

- - $16\text{cm} < p_{\text{position}} < 9\text{cm}$, dans l'expérience 3.

Cependant, la symétrie est cassée par les deux dernières mesures.

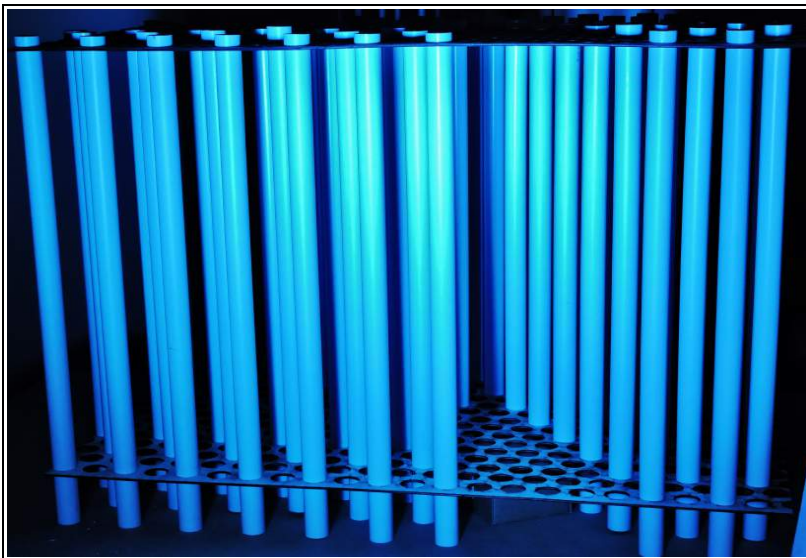
Lors de la batterie de tests, beaucoup d'autres expériences ont été réalisées, mais elles n'étaient pas toutes pertinentes et nous n'avons pas eu le temps nécessaire pour faire l'étude de chacune d'elles. Cependant, nous continuons ces études afin de donner un sens à nos résultats.

4. L'ORGUE DE CORTI

La Fabrication d'un Orgue de Corti est l'un des objectifs principal de notre projet (duquel a découlé le travail sur les interférences et les ultra-sons). Proche de celui de Frances Crow et David Prior, notre Orgue a nécessité un travail de mesures et de configurations important. Cela afin d'arriver à une reproduction proportionnellement plus petite de l'orgue de référence mais ayant une action sur les sons alentours similaire à un Orgue de Corti de plus grande taille.

4.1. Structure et configuration

Notre structure sonore de **60 cm** de haut, **50 cm** de large et **80 cm** de long est faite :



- d'un réseau de tubes en PVC et de deux plaques trouées configurées pour accueillir les tubes et stabiliser l'ensemble.

La configuration des plaques est basée sur les plans de l'Orgue de Corti de Frances Crow et David Prior que ces derniers nous ont envoyés : tubes de **22 cm** de diamètre, distance inter-tubes de **30 cm**, placement des tubes en « nid d'abeilles » (voir en annexe p.5).

Dans notre sculpture sonore, on a : des tubes de **25 mm** de diamètres, une distance inter-tubes de **34 mm** et un placement des tubes en « nid d'abeilles » avec un saut de 1 trou et 1 lignes (voir en annexe p.5).

La distances inter-tubes est un élément important de Orgue de Corti, il va jouer sur les fréquences qui sont amplifiées ou atténuées. Pour notre structure, les fréquences affectées sont de l'ordre de 10^4 Hz et les longueurs d'ondes proches de 34mm.

4.2. Expériences

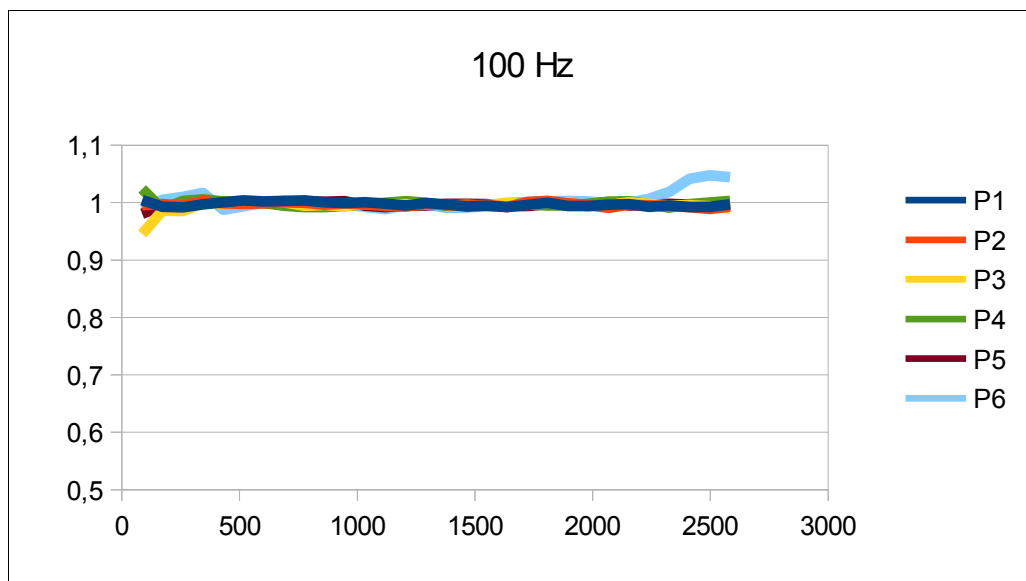
Pour certifier la présence d'interférences supposée par une simple écoute, une expérience plus aboutie a débuté.

Expérience : étude des transformations de Fourier d'ondes d'une fréquence donnée après le passage à travers notre structure. Les ondes sont émises par un haut-parleur, réceptionnée par un micro et retranscrites sur un logiciel de traitement de son. On fait varier la position du micro (voir schéma annexe p.5).

Nous avons fait cette expérience sur quatre fréquences : 100Hz, 500Hz, 1000Hz et 1500Hz. Nous avons fait des mesures à vide, afin de pouvoir normaliser nos résultats.

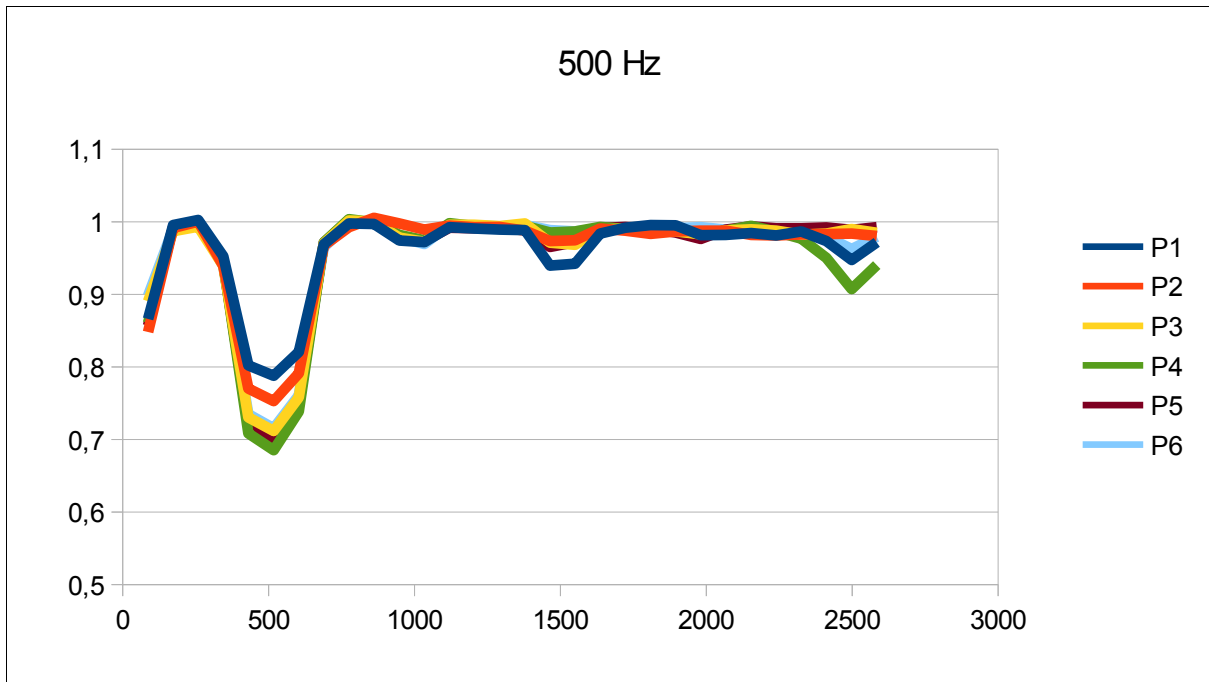
100 Hz :

Les courbes représentent le pourcentage d'absorption en fonction de la fréquence. Chaque position du micro est représentée par une courbe.



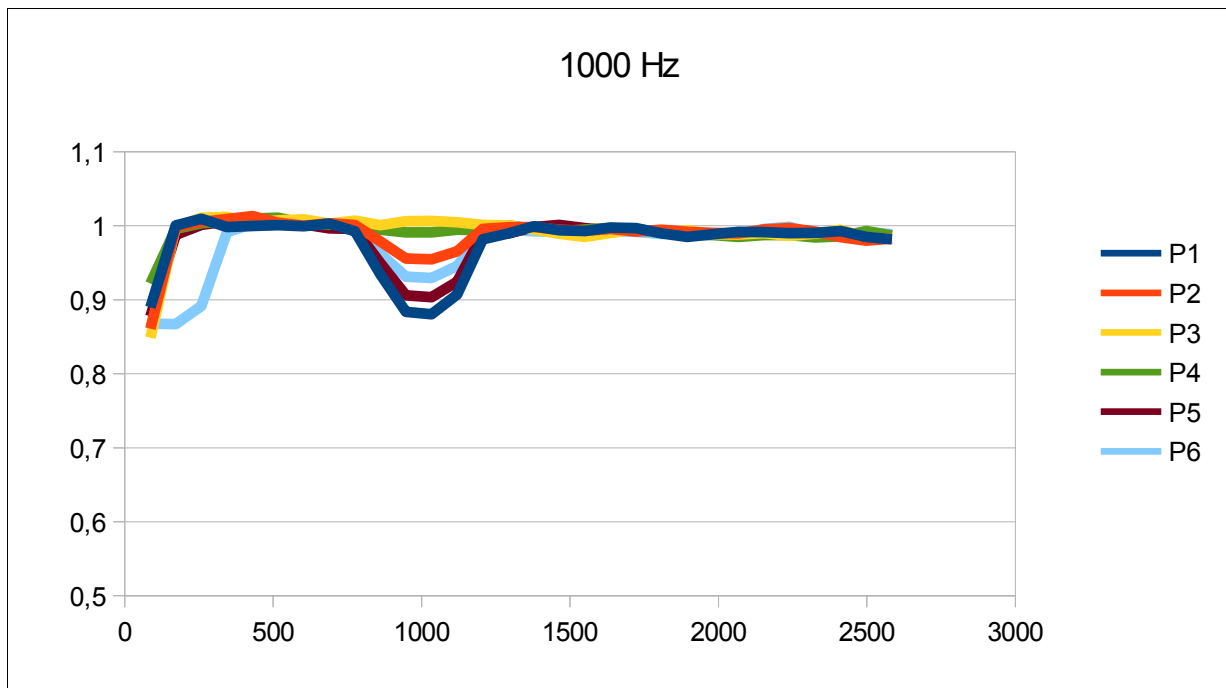
Sur ce graphique, 100% du son passe, la structure n'a aucun effet sur le son qui la traverse. Cela confirme nos suppositions faites après une simple écoute.

500Hz :



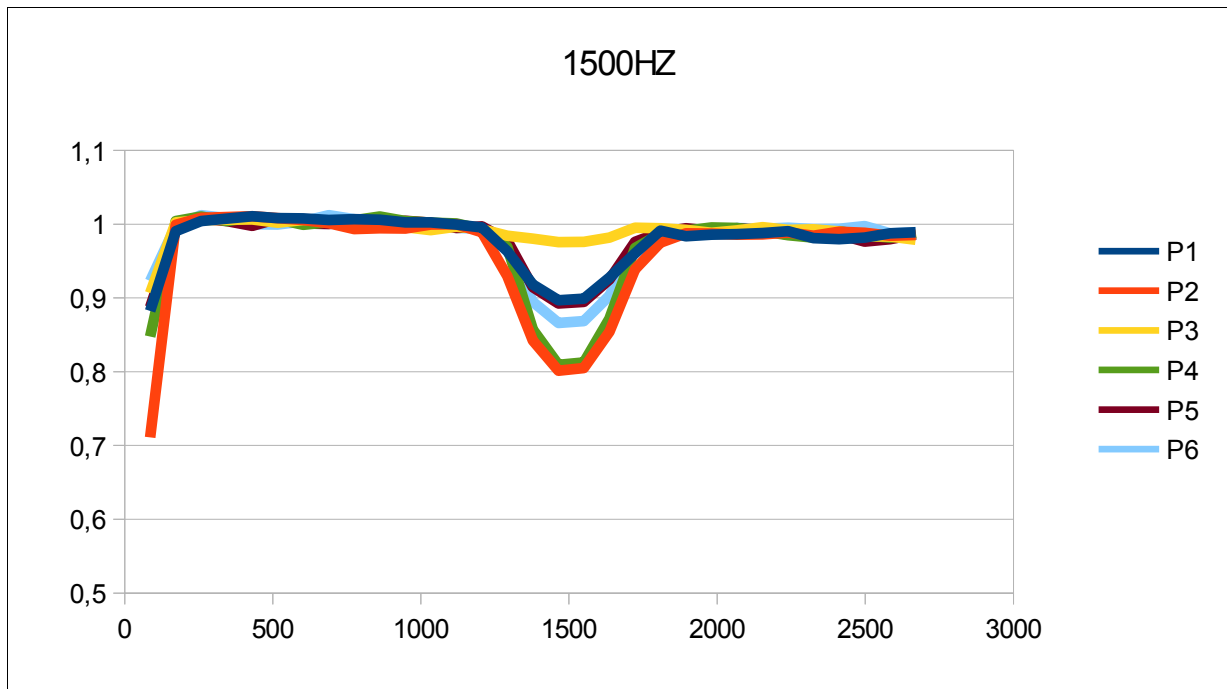
Sur ce graphique, on voit qu'il y a une absorption de 20% à 30% pour **toutes** les positions.

1000 Hz :



Sur ce graphique, on voit qu'en P3 et P4, 100% du son est reçu par le micro, alors qu'en P1 et P5 par exemple, 10% du son est absorbé. Les positions P1 et P5 correspondent à aux extrémités de la structure (voir schéma annexe p.5), on peut en déduire que le son est légèrement atténué sur les bords et non au centre.

1500 Hz :



Le son n'est quasiment pas atténué au centre encore une fois. On voit 10% d'absorption en P1 et P6, 20% pour P4 et P2.

Les courbes ont un comportement différent en fonction de la fréquence. Ces tests confirment nos suppositions lors de nos écoutes. Nous avons envoyé un bruit blanc à travers la structure. Au centre, le son paraissait plus aigus. En effet, les graphiques confirment que les sons les plus aigus passent au centre contrairement aux plus graves, notamment celui à 500 Hz.

Conclusion : Le but de notre sculpture sonore, opérer des interférences sonores perceptibles et analysable est donc atteint. Mais même avec cette réussite, notre projet futur est de construire un Orgue de Corti à taille humaine qui opérerait des changements sur tout les sons alentours, sur de plus larges fréquences. Des recherches ont déjà été entreprises pour la réalisation d'une telle structure.

CONCLUSION

Les expériences avec la cuve à ondes sont pour le moment terminées. Nous ne pouvons qu'améliorer la qualité d'observation et rêver à l'impression de notre maquette 3D.

Avec les tubes et les ultrasons, nous tenterons de faire l'analyse complète de tous nos graphiques et de faire d'autres expériences, il y a une infinité de possibilités.

Nos expériences sur notre Orgue de Corti sont très concluantes, nous allons faire des tests avec d'autres sons (bruit blanc par exemple). Mais nous ne perdons pas de vue notre objectif premier : construire une structure sonore à taille humaine, agissant sur les sons du quotidien.

C'est pourquoi nous continuerons la collaboration avec Frances Crow et David Prior, l'architecte et le physicien anglais qui ont eux aussi réalisé plusieurs structures sonores

SOURCES

- *Sculpter les sons*, Courty, Jean-Michel, Kierlik, Édouard. *Pour la science*. Février 2014, n°436, P.88-90.
- *Fundamentals of Physics*, 9th Edition, Halliday, David
- *A Guide to Organ of Corti*, Prior, David, Crow, Frances.

REMERCIEMENTS

- Antoine MANIER, professeur de Mathématiques
- Cédric VANDEN DRIESSCHE, professeur de Physique
- François FRÉMONT, professeur à l'université de Caen
- Loan HOURLIER, professeur d'Anglais
- Quentin SALLIOT, lycéen volontaire
- Frances CROW, architecte anglaise
- Le Fablab de Colombelles
- Étienne SAMSON, professeur de Technologie
- Tangi MIOSSEC, physicien et musicien
- Yves TELLIER, architecte
- Émilien BASSET, lycéen volontaire
- Christophe LABBE, professeur à l'ENSI Caen
- Nathalie ANNE, technicienne de laboratoire du CLE
- Olivier VENARD, Professeur en école d'ingénieur à Paris