Concours C-Génial 2018

« On a découvert les ondes gravitationnelles »

Emilien Alzingre, Théo Bedez, Emma Fasoli, Léo Fillon, Aul Henry, Pauline Planson

Elèves de Terminale S du lycée Aragon d'Héricourt

Avec l'aide de Alain Froidurot leur professeur de physique.

LYCÉE ARAGON
Métiers de l'énergie et du développement durable
TERRE DE RÉUSSITES

FONDATION CGENIAL

Sciences à l'École

Résumé

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles américains LIGO et européen VIRGO ont alimenté tout dernièrement l'actualité scientifique.
Cette année, le club scientifique du lycée décide de partir à la découverte de ces ondes et de leur détection.

Sur le principe des interféromètres LIGO et VIRGO, nous simulons tout d'abord un détecteur d'ondes gravitationnelles en utilisant un faisceau d'ultrasons plutôt qu'un faisceau laser.
Nous simulons le passage d'ondes gravitationnelles et les oscillations de l'espace-temps induites en utilisant le mouvement des membranes de deux haut-parleurs.

Notre interféromètre ARAGO étant au point, nous partageons le club en 2 équipes :

- L'une produit une « déformation de l'espace-temps » comparable à celle générée par la fusion de trous noirs. Des paramètres correspondant à la masse des trous noirs et à leur distance à la Terre sont introduits.
- L'autre équipe doit détecter cette déformation et en déduire les deux paramètres de la fusion.

Pour coller à la réalité, les signaux produits seront de plus en plus faibles ce qui nécessitera l'utilisation de techniques d'analyse similaires à celles utilisées réellement.

Nicolas Arnaud, chercheur CNRS à l'European Gravitational Observatory sur VIRGO a été notre référant scientifique. Tout au long de nos travaux, il nous a apporté son aide dans la compréhension des phénomènes et dans la mise au point de nos expériences.

Sommaire

Introduction

Principe du détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

Notre détecteur interférométrique : Arago

- Interféromètre à ultrason
- Les miroirs paraboliques
- Le support
- La séparatrice
- Essai de transmission et réflexion
- Test de l’interféromètre

Détection des ondes gravitationnelles

- Une onde gravitationnelle dans notre laboratoire
- Point de fonctionnement de l’interféromètre

Vibration de l’espace-temps, quelle fonction mathématique ?

Détection de la vibration

Détermination des caractéristiques de l’onde gravitationnelle

- Modélisation
- Résultats

Analyse spectrale

- Nécessité
- Méthode utilisée

Conclusion

Introduction

En 1916, Albert Einstein émet une hypothèse : lorsque des masses subissent une accélération, elles font vibrer l'espace-temps, produisant une onde comparable aux rides qui se propagent à la surface de l'eau lorsqu'une pierre la frappe. La fameuse onde gravitationnelle. Toutefois, la déformation de l'espace- temps est infime : dix mille fois plus petite que la taille d'un proton (10^{-18} à 10^{-19} m). Les ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées sur Terre proviennent donc d'événements cataclysmiques, mettant en jeu de très grandes masses subissant de fortes accélérations.

Le 14 septembre 2015, les deux détecteurs de l'expérience Ligo installés aux États-Unis ont réagi au passage d'une onde gravitationnelle ayant pris sa source à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre correspondant à la fusion de 2 trous noirs de masse est environ 30 fois la masse du Soleil.

D'où notre problématique :

Comment les scientifiques ont-ils pu détecter le phénomène et déduire ses caractéristiques ?

Nous allons tenter d'y répondre en simulant le phénomène, en le détectant et en l'analysant tout comme les équipes de Ligo et Virgo l'on fait.

Principe du détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

Tout commence avec un interféromètre de Michelson géant permettant de détecter la très faible oscillation de l'espace-temps (Ligo aux Etats-Unis ou Virgo en Italie) : soit une variation de 10^{-18} m sur 3 km de longueur !

De gauche à droite : les deux détecteurs LIGO (à Hanford et Livingston, États-Unis) et le détecteur Virgo (Cascina, Italie).
LIGO Laboratory et Virgo / Nicola Baldocchi 2015

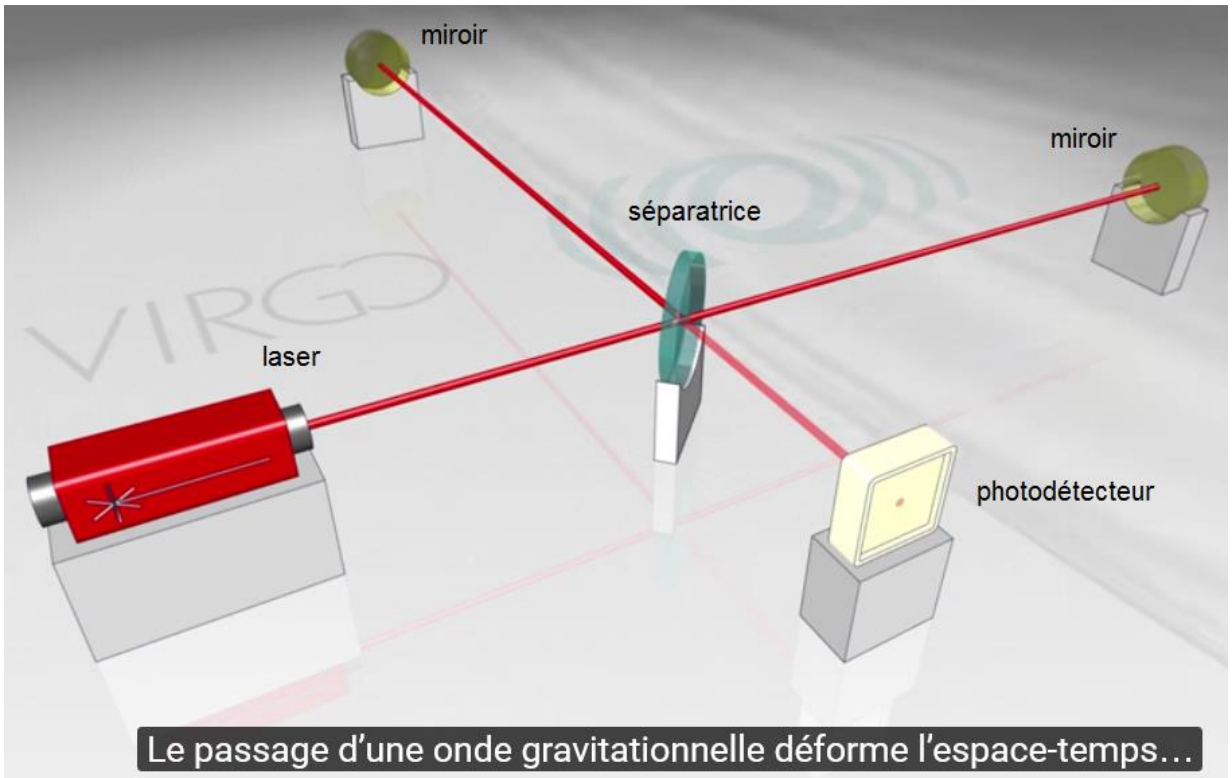


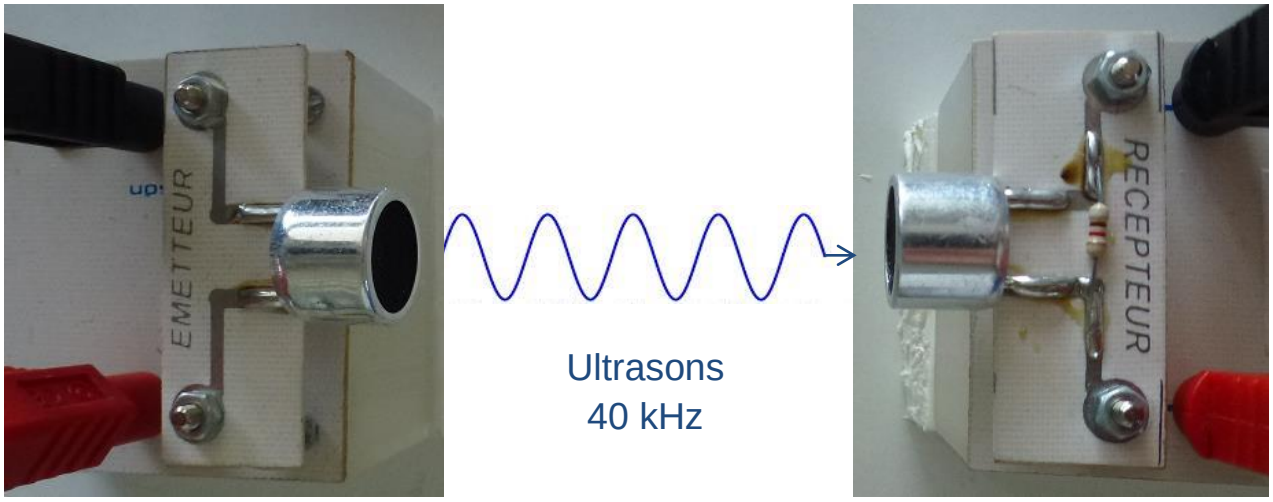
Schéma de base d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles. (Animation Virgo)

Nous allons réaliser un tel interféromètre. Nous le baptiserons ARAGO !

Notre détecteur interférométrique : Arago

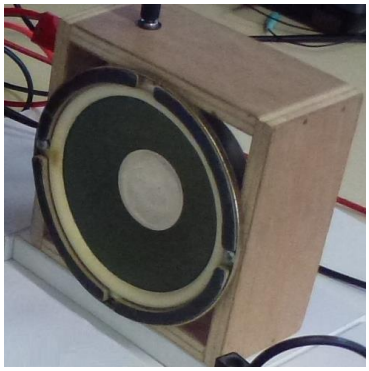
Interféromètre à ultrason

Nous ne disposons pas d'interféromètre de Michelson au lycée. Aussi, pour réaliser notre interféromètre, nous remplaçons le faisceau laser par un faisceau d'ultrasons. Un émetteur d'ultrason est alimenté par un générateur que l'on ajuste le plus près possible de 40kHz prend la place du laser et un détecteur d'ultrason relié à une carte d'acquisition Latispro celui du photodétecteur.



Les miroirs paraboliques

Deux haut-parleurs dont les membranes sont coniques font l'affaire :

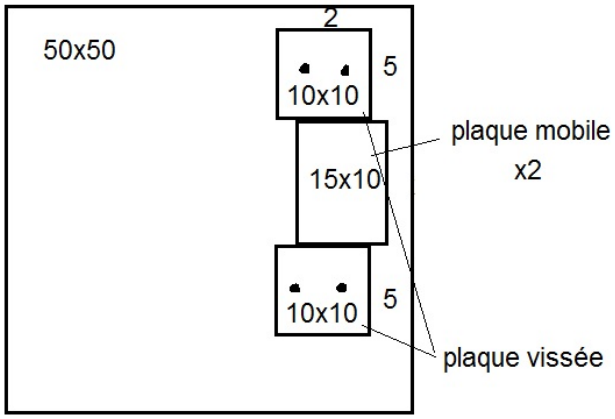


Le support

Voici le plan de notre support commandé à Ludovic Py ouvrier au lycée.

Nous comptons rajouter une vis permettant de déplacer la plaque mobile plus doucement.

Pouvez vous nous faire ce support en bois de 2cm d'épaisseur environ en double exemplaire

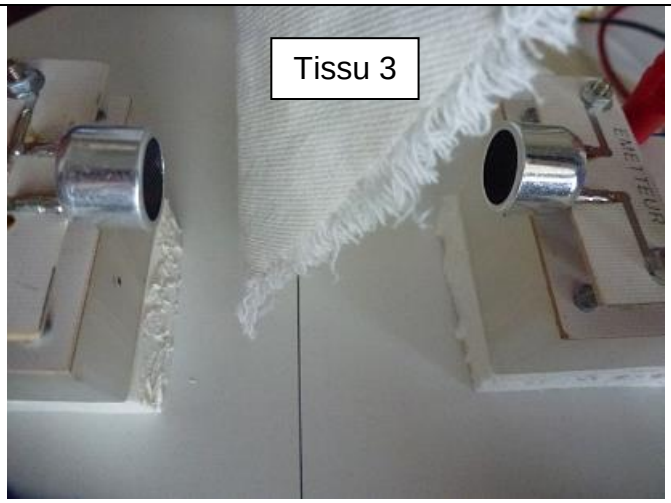
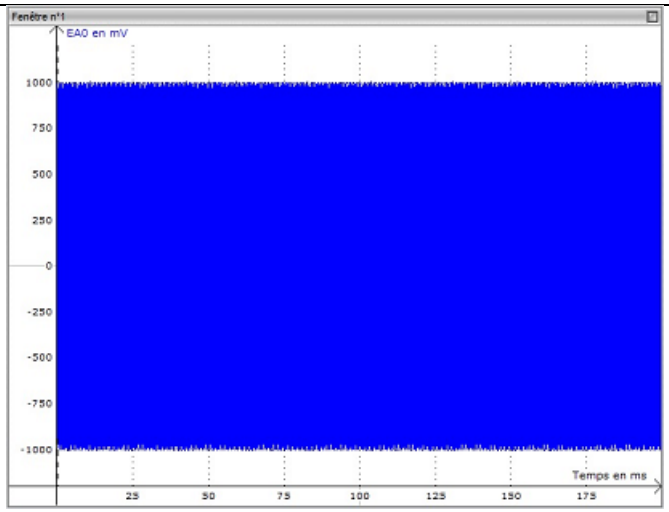
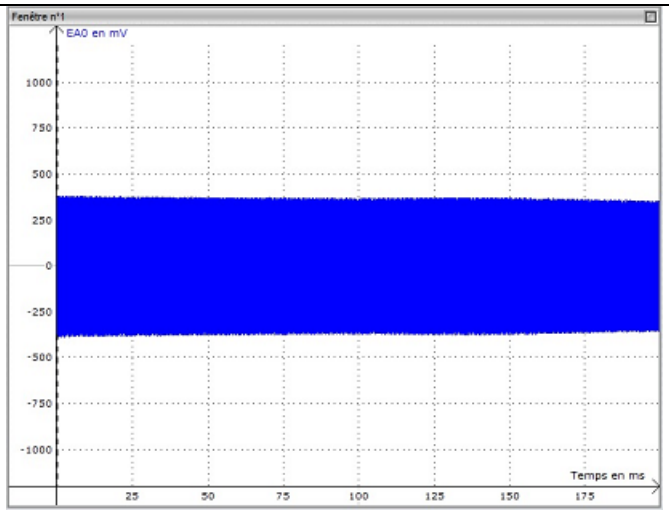


la plaque mobile doit pouvoir glisser entre les 2 plaques fixes sans tourner, mais elle ne doit pas coincer !

Merci !

La séparatrice

Il faut trouver un matériau partiellement transparent pour les ultrasons. Nous testons plusieurs matériaux (film étirable, divers tissus) de façon à ce qu'environ 50% des ultrasons le traverse. L'autre partie étant réfléchie, nous supposons.
Finalement, quasiment tous pourraient convenir.

	
On règle la distance pour avoir une amplitude de 1V	On détecte une amplitude de 320mV
	

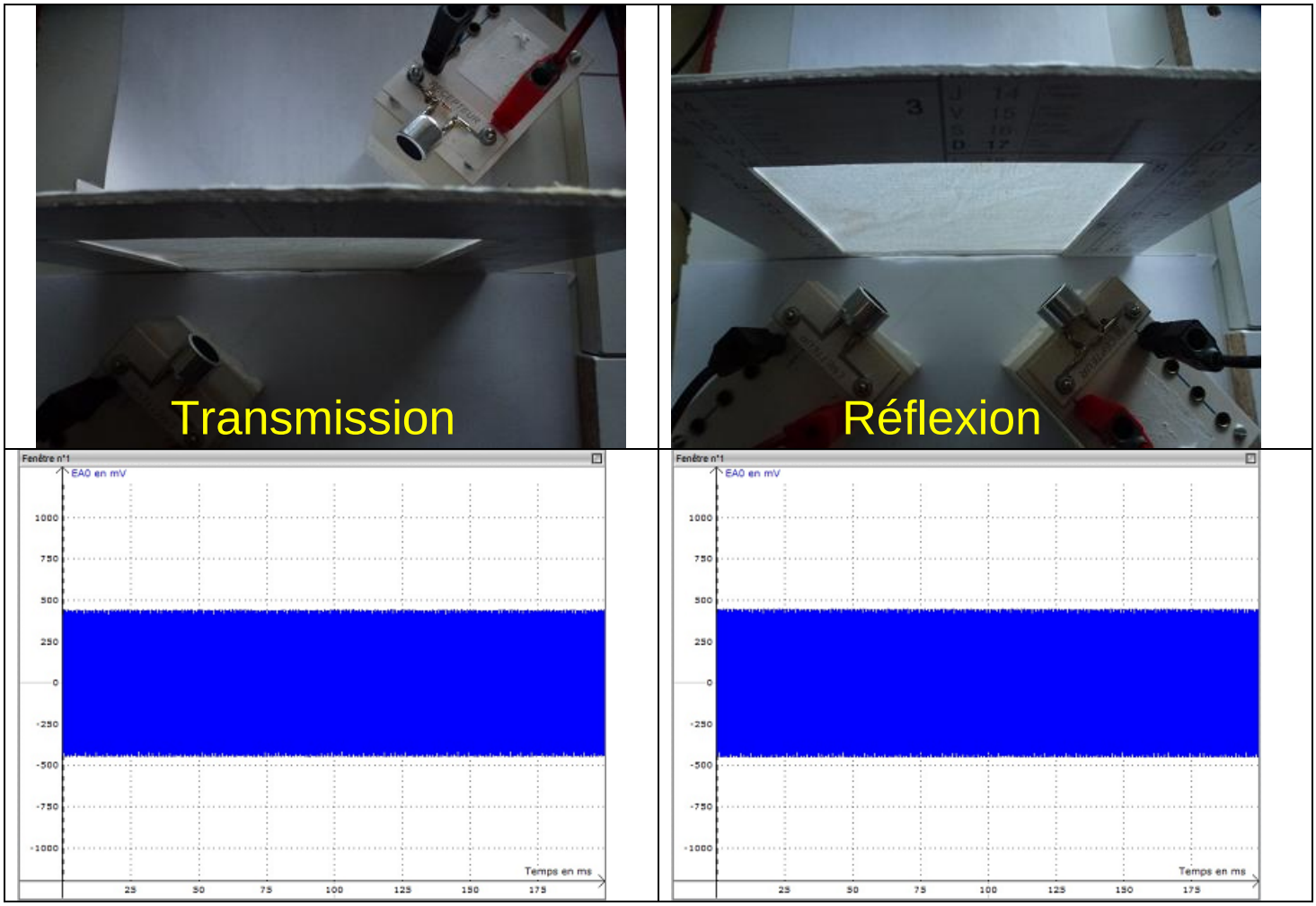
matériau	Film étirable	Tissu 1	Tissu 2	Tissu 3
Pourcentage de transmission	30%	63%	48%	32%

Nous choisissons le tissu 2 qui donnent un pourcentage transmission le plus proche de 50%. Nous le collons sur un cadre en carton (voir ci-dessous).

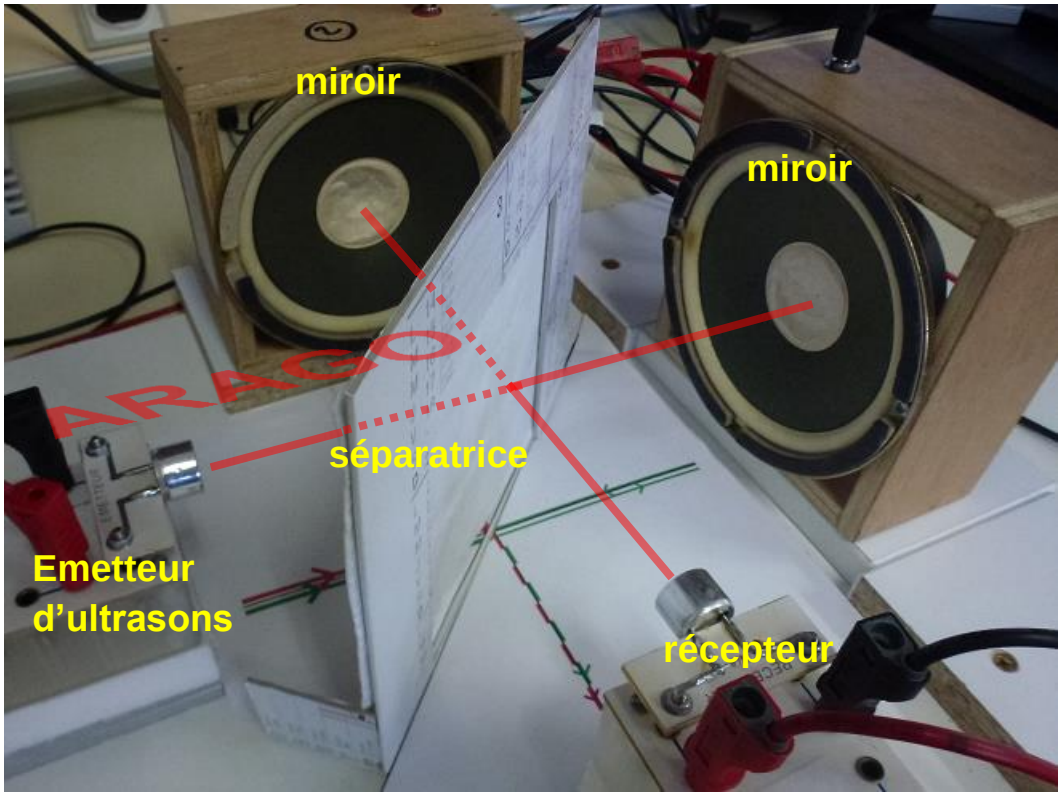
Essai de transmission et réflexion :

Si 50% des ultrasons sont transmis, est-ce que 50% sont réfléchis ?

Nous essayons et le résultat est plus que satisfaisant !



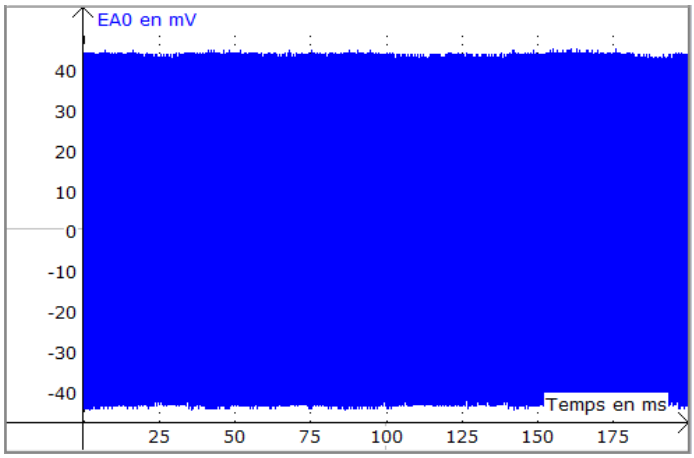
Tout est en place pour réaliser l'interféromètre Arago !



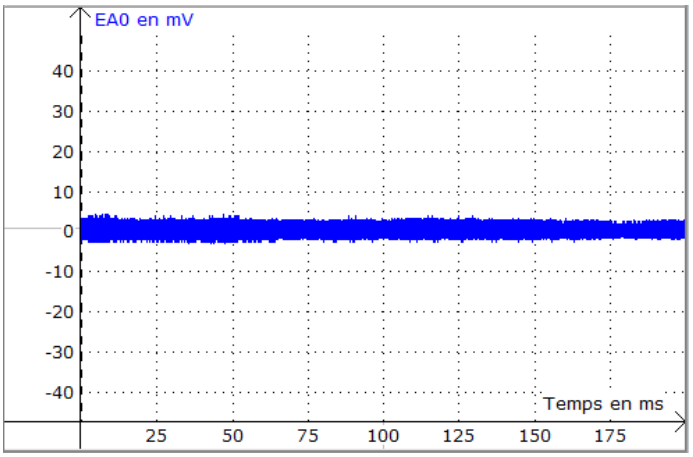
Le faisceau d'ondes ultrasonores est divisé en deux par la séparatrice. Puis les deux faisceaux sont réfléchis par les « miroirs paraboliques » et interfèrent ensuite. Le récepteur ultrasonore est relié à la carte d'acquisition Latispro.

Test de l'interféromètre :

Lorsque nous éloignons un des haut-parleurs, nous observons bien une alternance entre interférences constructives et destructives. Notre interféromètre fonctionne à merveille !



Ondes en phase
Interférences constructives

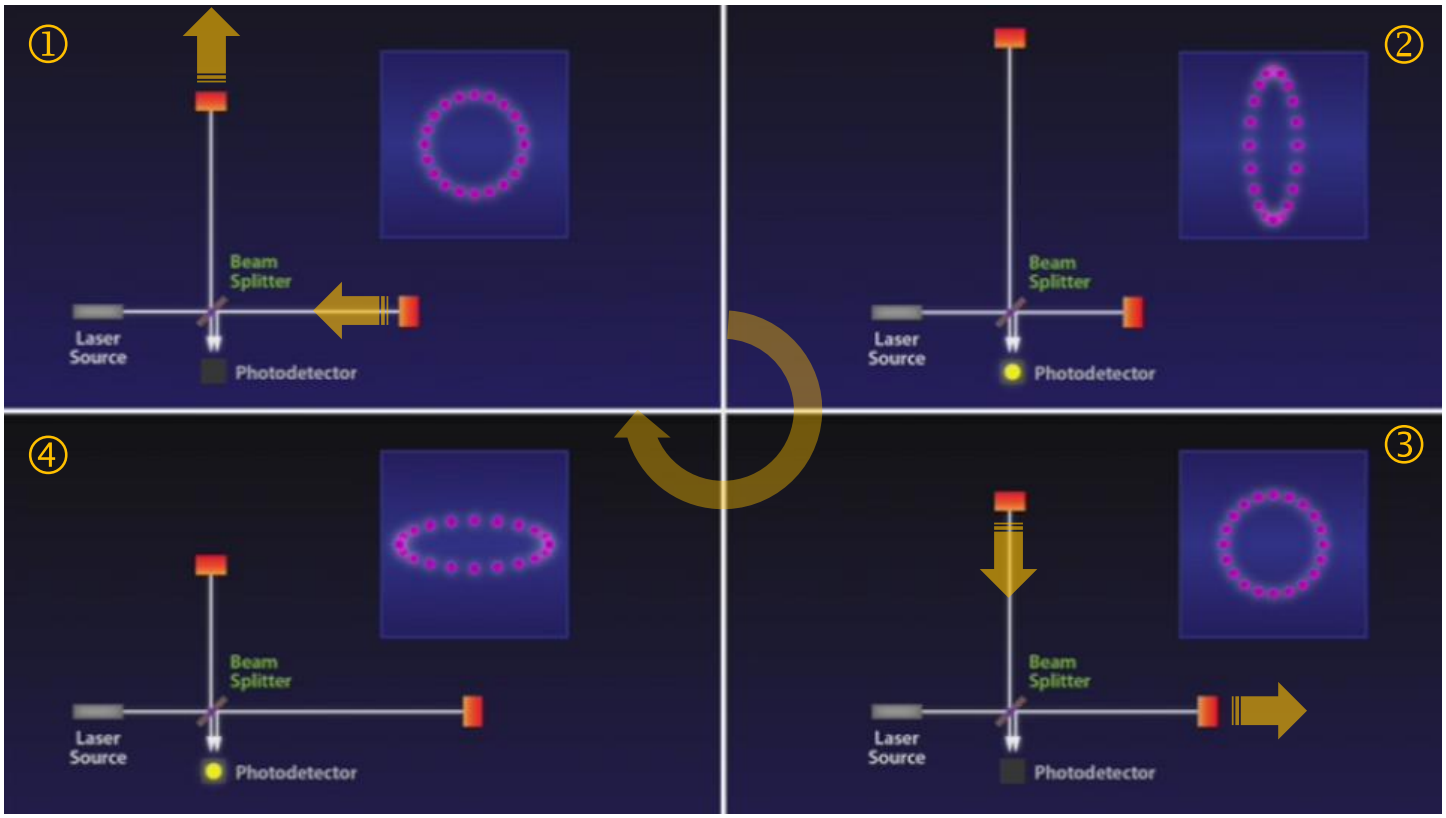


Ondes en opposition de phase
Interférences destructives

Détection des ondes gravitationnelles

Une onde gravitationnelle dans notre laboratoire

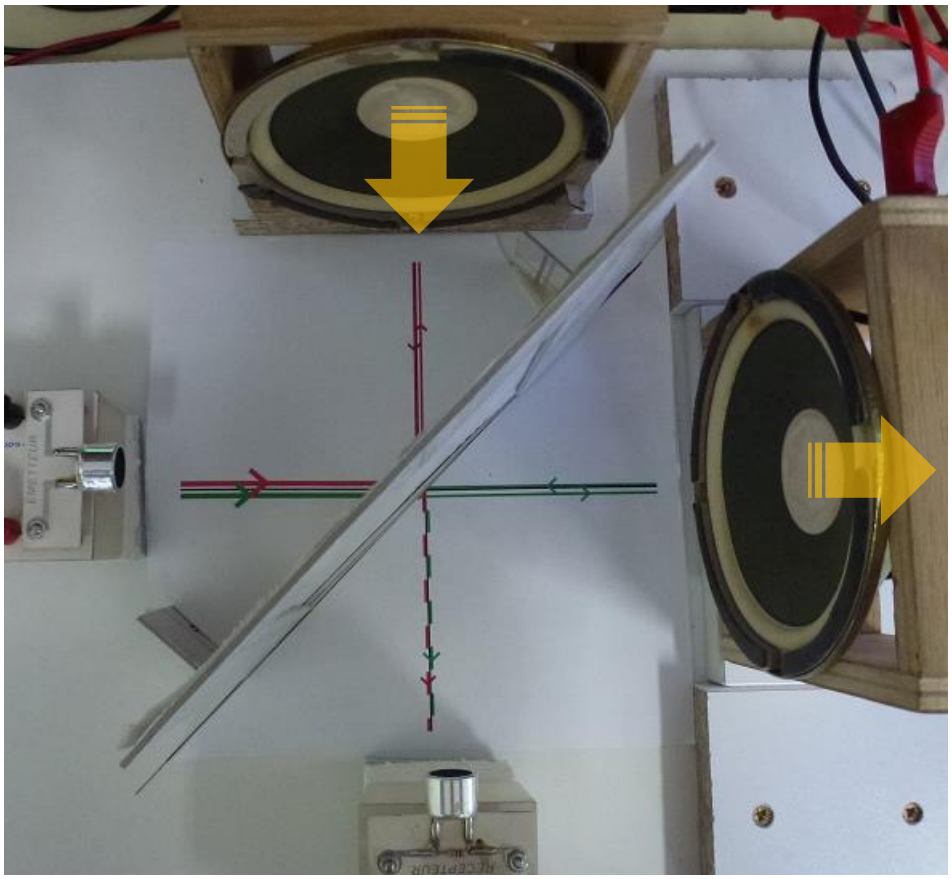
Lorsque les ondes gravitationnelles traversent la Terre, l'espace-temps est alternativement contracté et étiré dans la direction de propagation et inversement dans la direction perpendiculaire comme le montre cette animation :



Source : http://physics.aps.org/assets/8cbf3dfb-7849-485b-8626-1276bc044ddf/video1.mp4

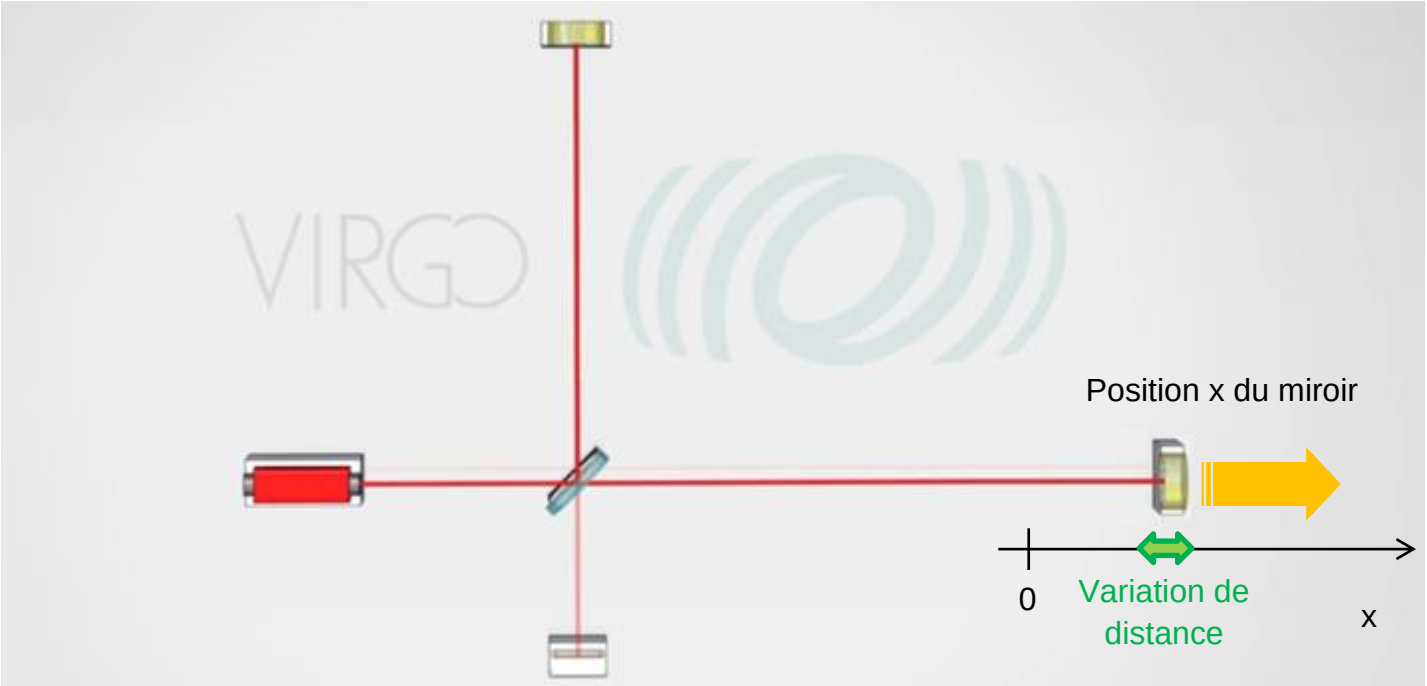
Lors du passage de l'onde dans l'interféromètre, le déphasage des deux faisceaux interférant est modifié, et l'intensité lumineuse reçue par le photo-détecteur change.

Pour simuler le passage d'une onde gravitationnelle dans notre interféromètre, nous avons alimenté les deux haut-parleurs avec deux tensions alternatives inversées. Lorsqu'une membrane se rapproche de la séparatrice, l'autre s'en éloigne et inversement.

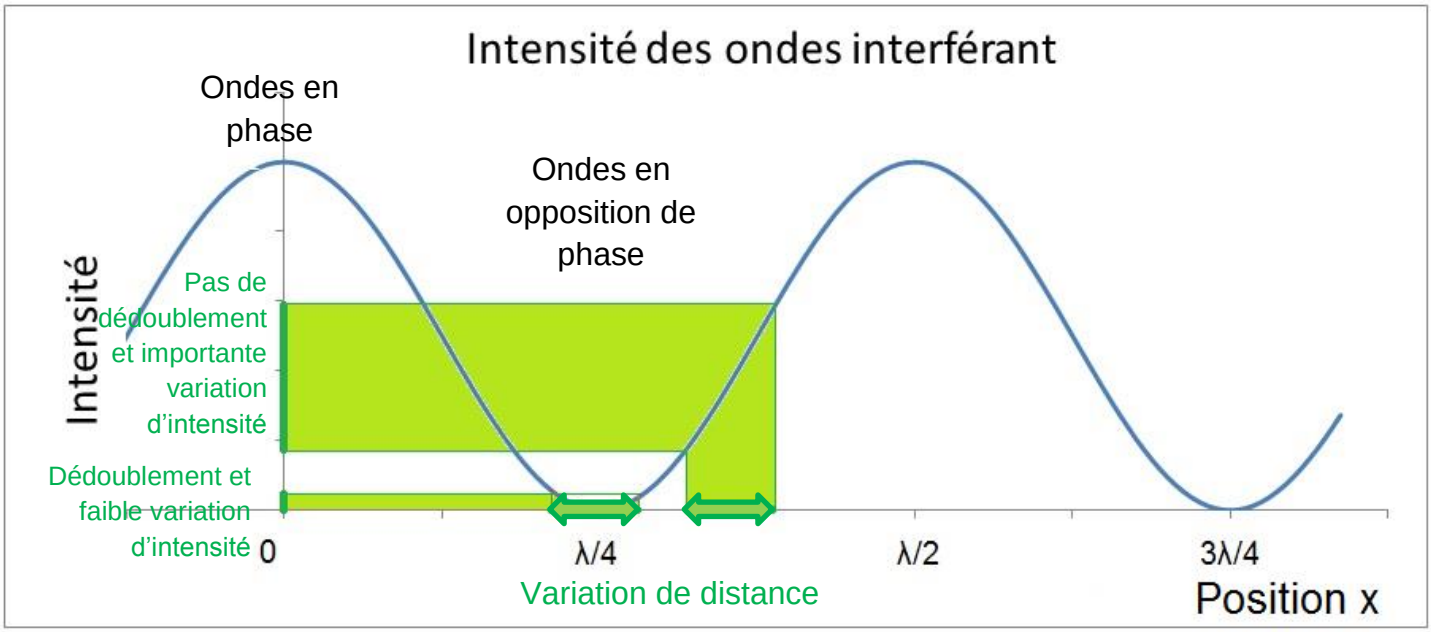


Le capteur ultrason détecte alors une intensité ultrasonore variant avec la même fréquence que celle des haut-parleurs prouvant que notre détecteur Arago est opérationnel.

Point de fonctionnement de l'interféromètre :



Lorsque les 2 bras ont même longueur (x = 0), les 2 ondes sont en phase et les interférences sont constructives, l'intensité est maximale. Si un miroir est éloigné de x = λ/4, lors de l'aller et retour, une des 2 ondes parcours λ/2 de plus que l'autre, les 2 ondes sont en opposition de phase et les interférences sont destructives, l'intensité est nulle.

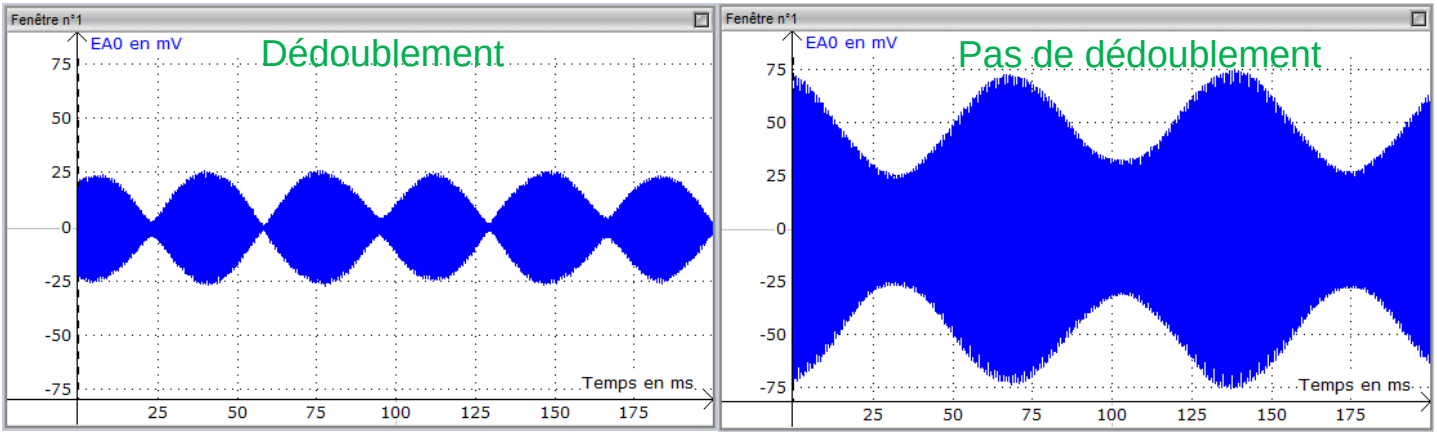


Représentation de l'intensité lumineuse ou sonore en fonction de la position x d'un des miroirs.

On constate qu'il vaut mieux se placer au milieu de la sinusoïde pour obtenir la plus grande variation d'intensité lors d'une petite variation de distance des bras. Mais ce n'est pas forcément ce qu'il faut rechercher car le détecteur serait « ébloui » et les faibles variations d'intensité difficiles à détecter. Un faible signal peut toujours être amplifié, ce que nous ferons d'ailleurs par la suite.

Toutes les animations (Virgo, CEA …) montrent les deux ondes en opposition de phase avant le passage de l'onde gravitationnelle. Ceci nous interpelle, en effet :
Dans ce cas la faible variation des distances des bras de l'interféromètre (⟺ sur le schéma) doit conduire à une très faible variation de l'intensité lumineuse du faisceau laser, indétectable ! De plus, on devrait observer un dédoublement des variations de distance ce qui compliquerait l'analyse.

Tout ceci est observé avec notre interféromètre :



Nous avons alors contacté Nicolas Arnaud qui travaille sur Virgo. Il nous félicite pour notre analyse et nous explique qu'effectivement les 2 faisceaux ne sont pas tout à fait en opposition de phase pour la raison que nous avons évoquée. Le point de fonctionnement est légèrement décalé du creux de la sinusoïde et déterminé de façon à avoir le meilleur rapport signal / bruit.

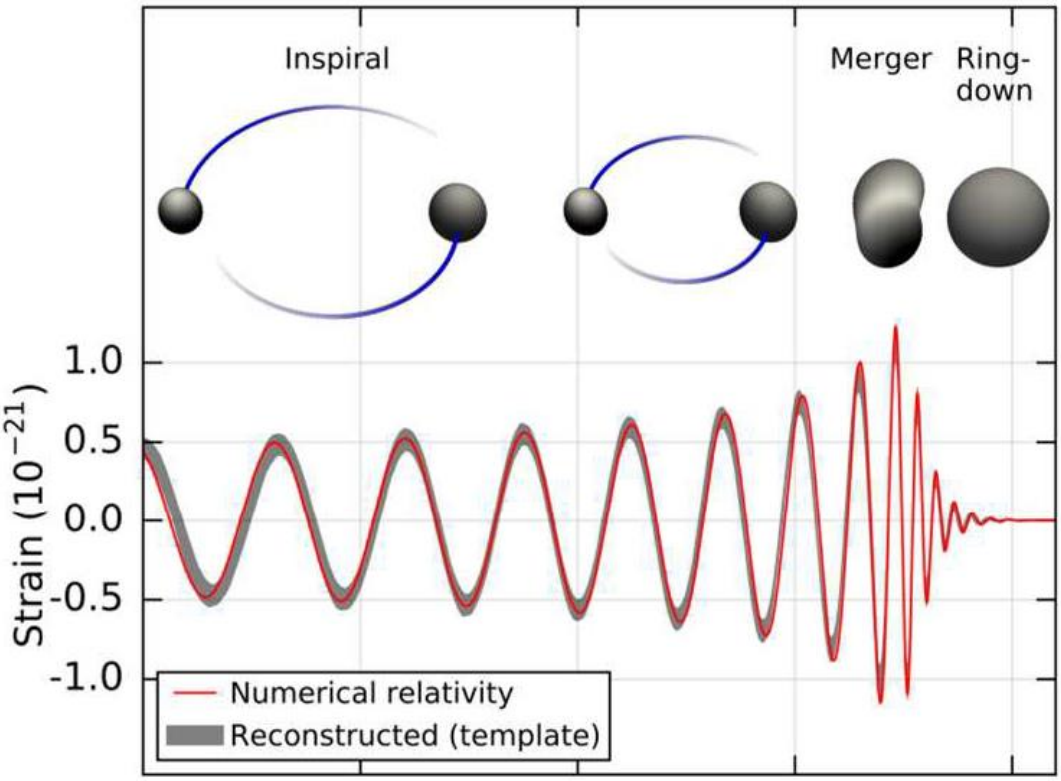
Vibration de l'espace-temps, quelle fonction mathématique ?

Il nous reste à créer une onde gravitationnelle et à ensuite la détecter à l'aide de notre interféromètre.

Mais quelle fonction mathématique correspond à la vibration de l'espace-temps due à la fusion de 2 trous noirs par exemple ?

Nous utilisons la publication PHYSICAL REWIER LETTER du 12 février 2016 qui donne l'allure de la fonction. Au cours de la fusion, les trous noirs tournent à une certaine fréquence, ils se rapprochent et tournent de plus en plus vite jusqu'à fusionner. Le phénomène s'arrête alors.

La vibration de l'espace-temps correspond à une fonction sinusoïdale dont la fréquence et l'amplitude augmentent comme l'indique ce schéma :

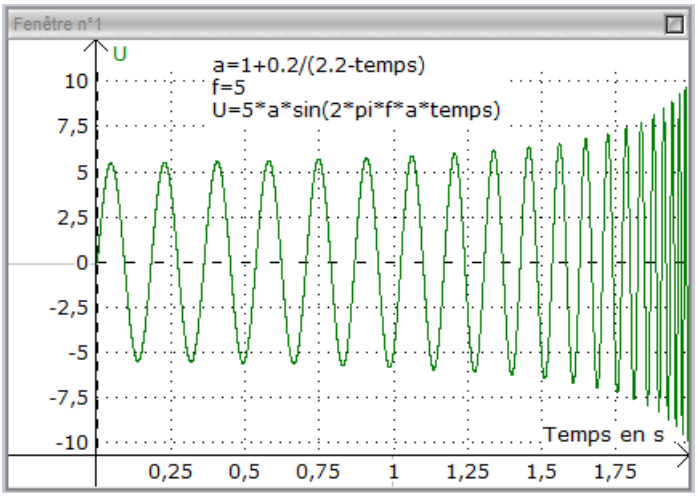


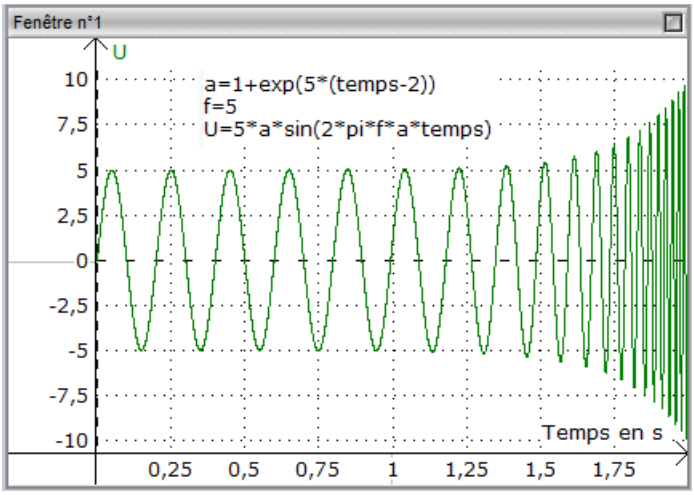
Source : PHYSICAL REWIER LETTER 12 février 2016

Pour simuler l'onde gravitationnelle, il nous faut une fonction ayant l'allure précédente. On choisit une durée du phénomène de 2 s.

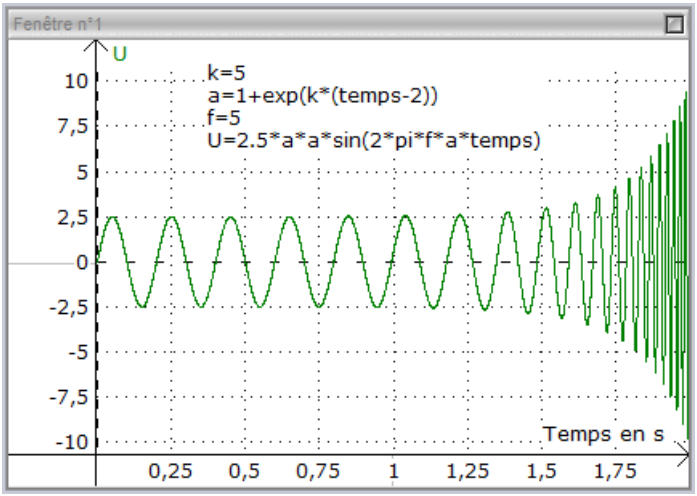
Nous soumettons le problème à notre professeur de mathématique M.Laurent. D'autres s'y intéressent et nous obtenons plusieurs solutions, qu'il faudra adapter aux contraintes de l'émission d'une tension par Latispro pendant 2s !

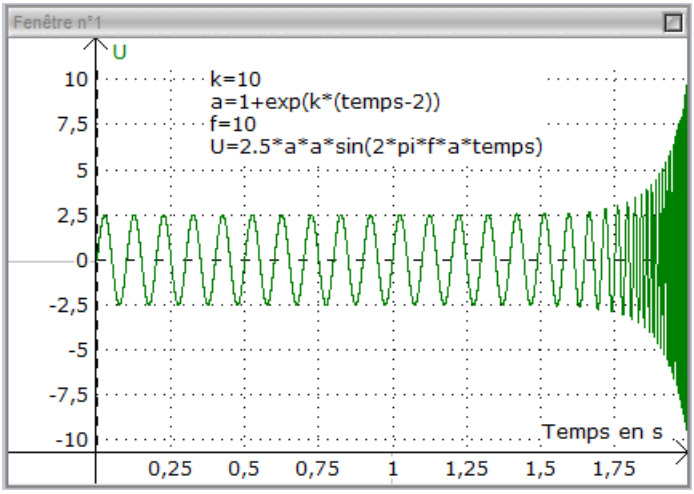
Voici 3 types de fonction ou "chirp" ("gazouillis" en référence au son que produisent ces signaux) :





Nous opterons pour la fonction suivante dans laquelle on peut glisser facilement des paramètres k et f dont on parlera plus loin.





Fonction retenue pour générer une onde gravitationnelle :

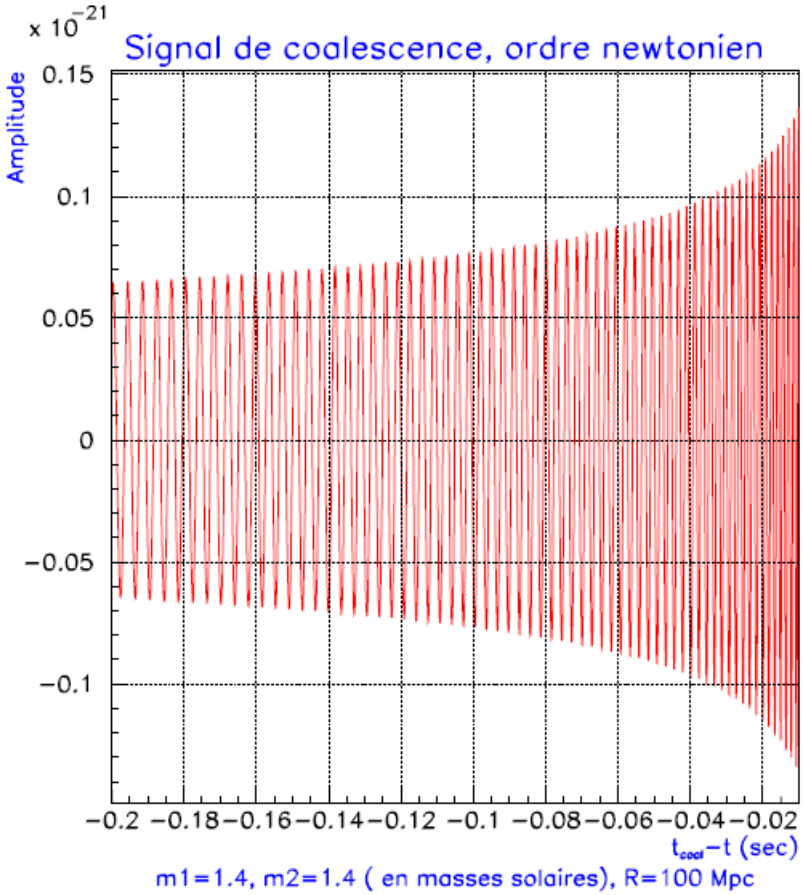
$$U = U_0 \times a^2 \times \sin(2\pi \times f \times a \times t) \quad \text{avec} \quad a = 1 + \exp(k \times (t - 2))$$

U_0 est l'amplitude initiale, on la diminuera le plus possible pour simuler les conditions réelles où l'intensité du signal égale celui du bruit !

Pour simuler le principe, F et k sont des paramètres dépendant de la masse des trous noirs et de leur distance à la Terre.

Et dans la réalité :

Voici le signal type que nous a fourni Nicolas Arnaud correspondant à la fusion de 2 étoiles à neutrons ;



Ondes gravitationnelles émises lors de la fin de la phase de spirale
d'un système binaire de deux étoiles à neutrons situé à 100 Mpc

Source : Thèse de Nicolas Arnaud

On s'aperçoit un peu tard à partir des équations fournies par Nicolas Arnaud que le 1er type aurait été plus approprié !

Les signaux émis pour moduler les ultrasons étant dans le domaine des ondes audibles, notre laboratoire se transforme en forêt amazonienne remplie de chants d'oiseaux exotiques : surnommés "chirps" par les spécialistes !

Détection de la vibration

Cette fonction est envoyée aux haut-parleurs afin de créer une onde gravitationnelle, à nous de la détecter.

Pour cette partie, il faut réaliser un montage électronique permettant de récupérer le signal modulant les ultrasons. Il comporte 5 parties :

- **Un amplificateur**
  L'amplitude de la tension d'entrée est d'environ 40mV et le détecteur d'enveloppe ne fonctionne pas avec une si faible amplitude. Une amplification par 10, avec R_2 =10kΩ et R_1 =1kΩ donne de bons résultats.

- **Un détecteur d'enveloppe**
  Wikipédia notre ami nous indique que la constante de temps τ = RC doit satisfaire :

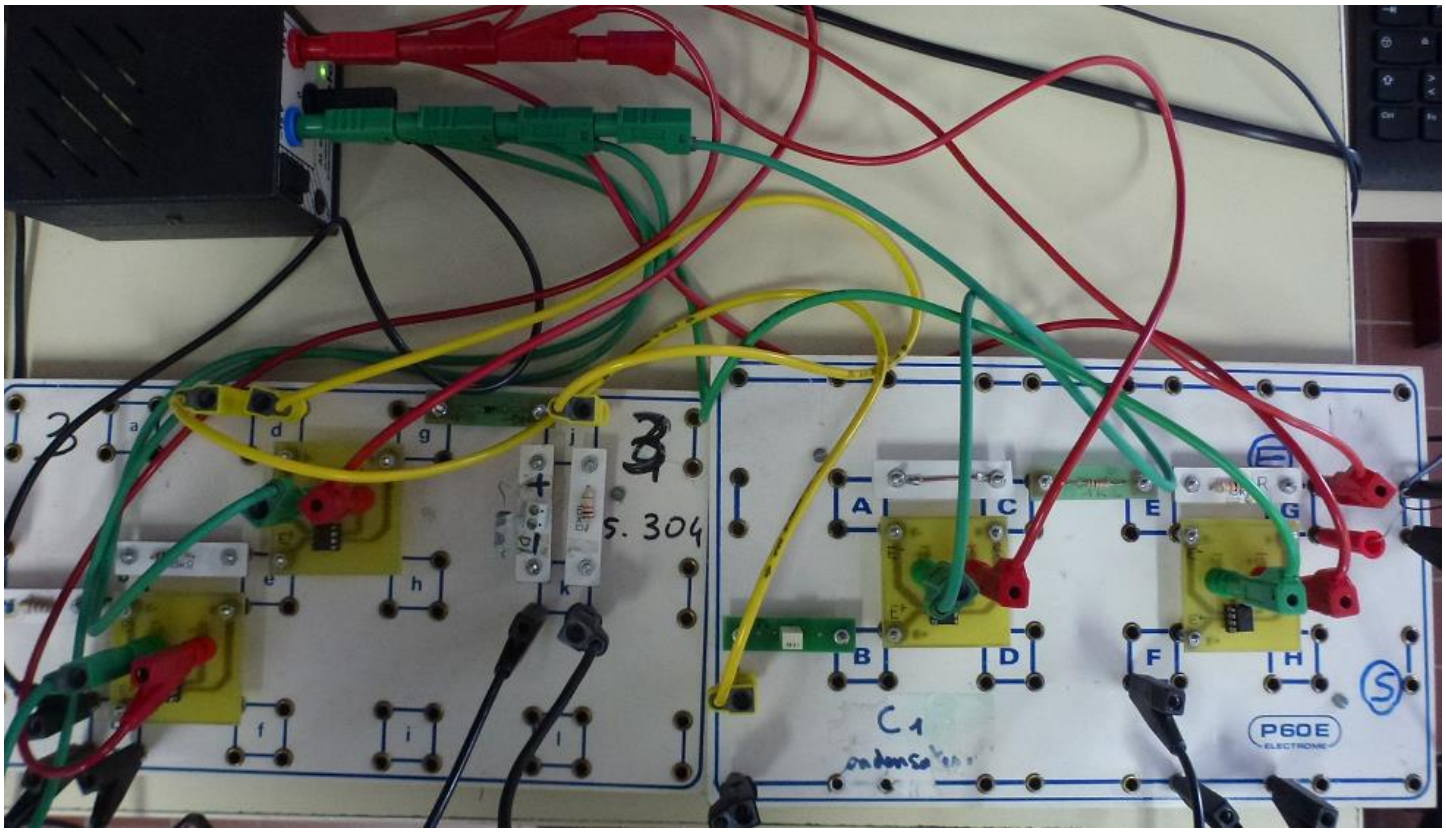
$$\frac{T_{minmodulation}}{10} > \tau > 10 \cdot T_{porteuse}$$

  $T_{minmodulation} = 1/f_{vibration} \approx 1/100Hz \approx 10^{-2}$ s
  $T_{porteuse} = 1/f_{ultrason} = 1/40kHz = 2{,}5\times10^{-5}$ s
  RC = 10^{-4} est optimum
  Avec C = 0,1 µF = 10^{-7} F il faut R = 10^{-4} / 10^{-7} = 10^{3} Ω = 1kΩ

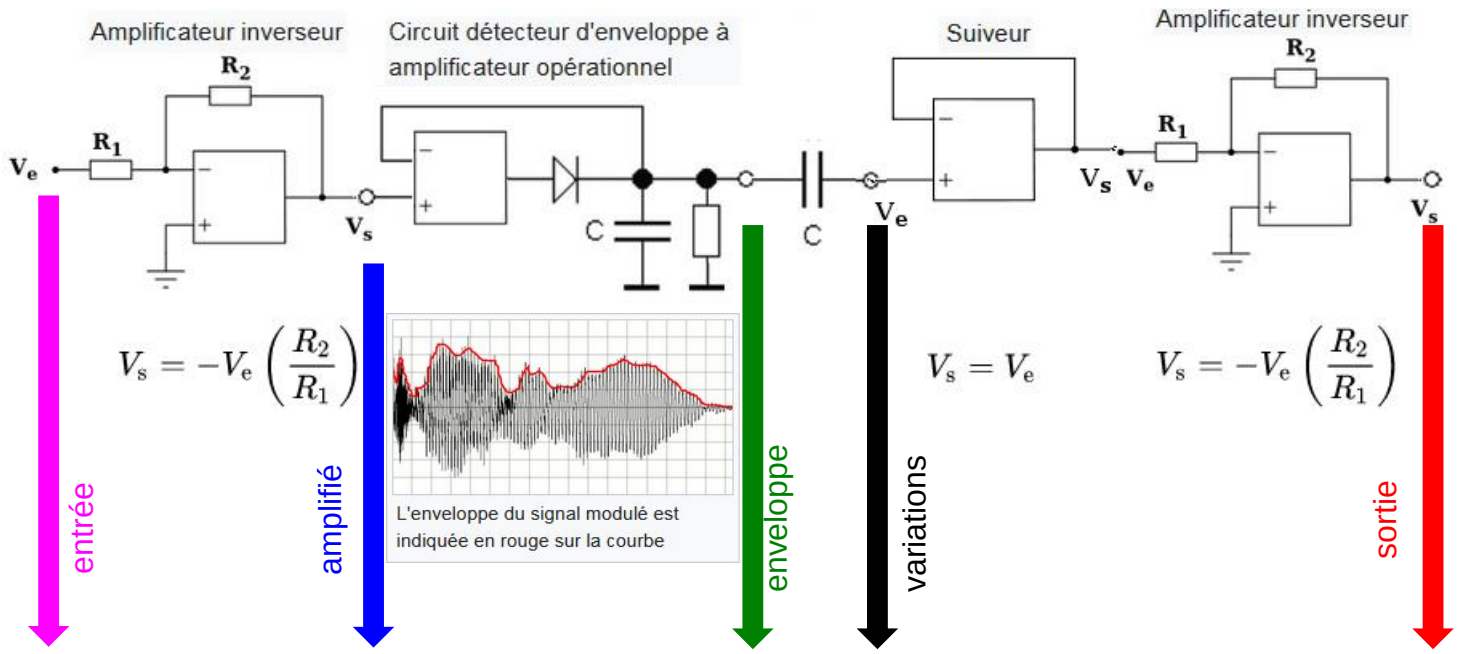
- **Un détecteur de variation**
  Un condensateur de 1µF ne transmet que les variations de tension.

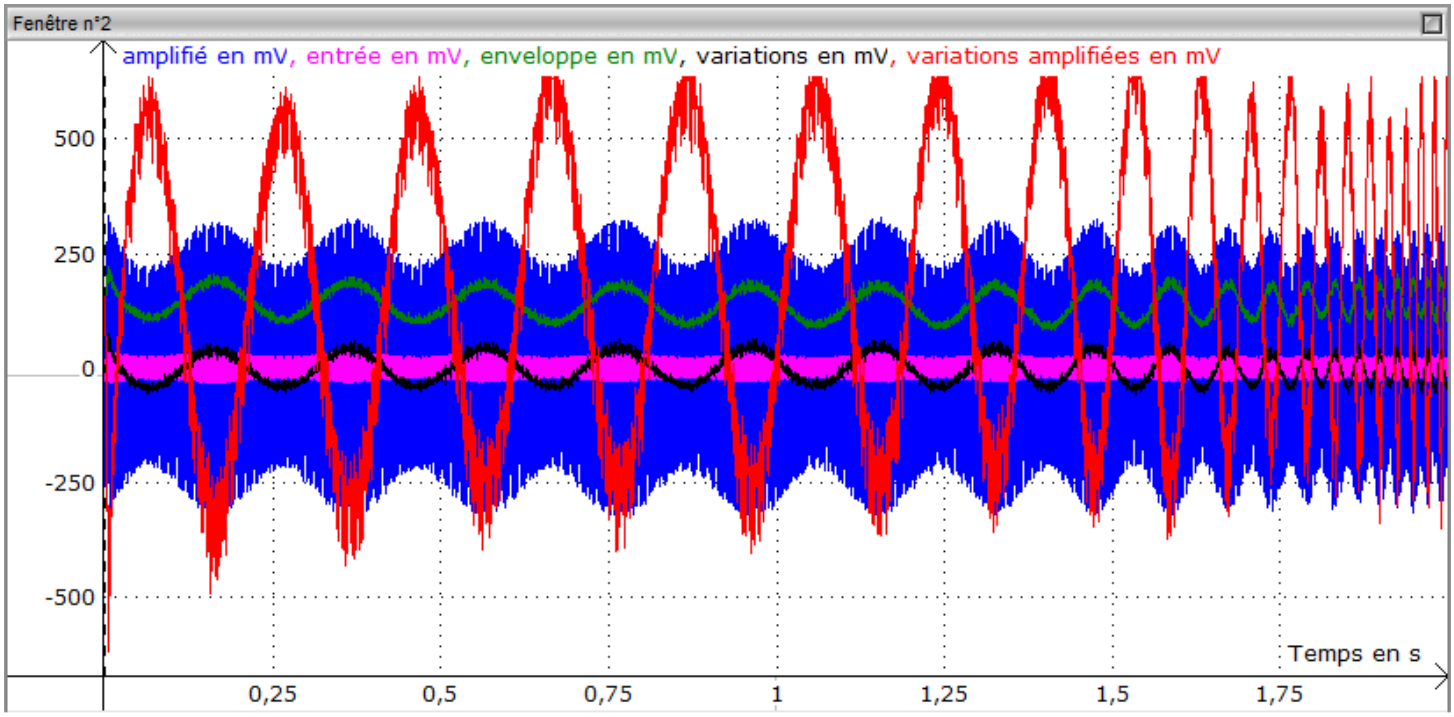
- **Un suiveur**
  Pour isoler le condensateur de l'amplificateur suivant qui en modifie le fonctionnement.
- **Un amplificateur**
  Pour multiplier par 100 la tension et obtenir quelques volts d'amplitude.

Voici le circuit



Et son schéma :





On constate que notre dispositif présente une anomalie pour générer les ondes gravitationnelles : l'amplitude n'augmente pas !

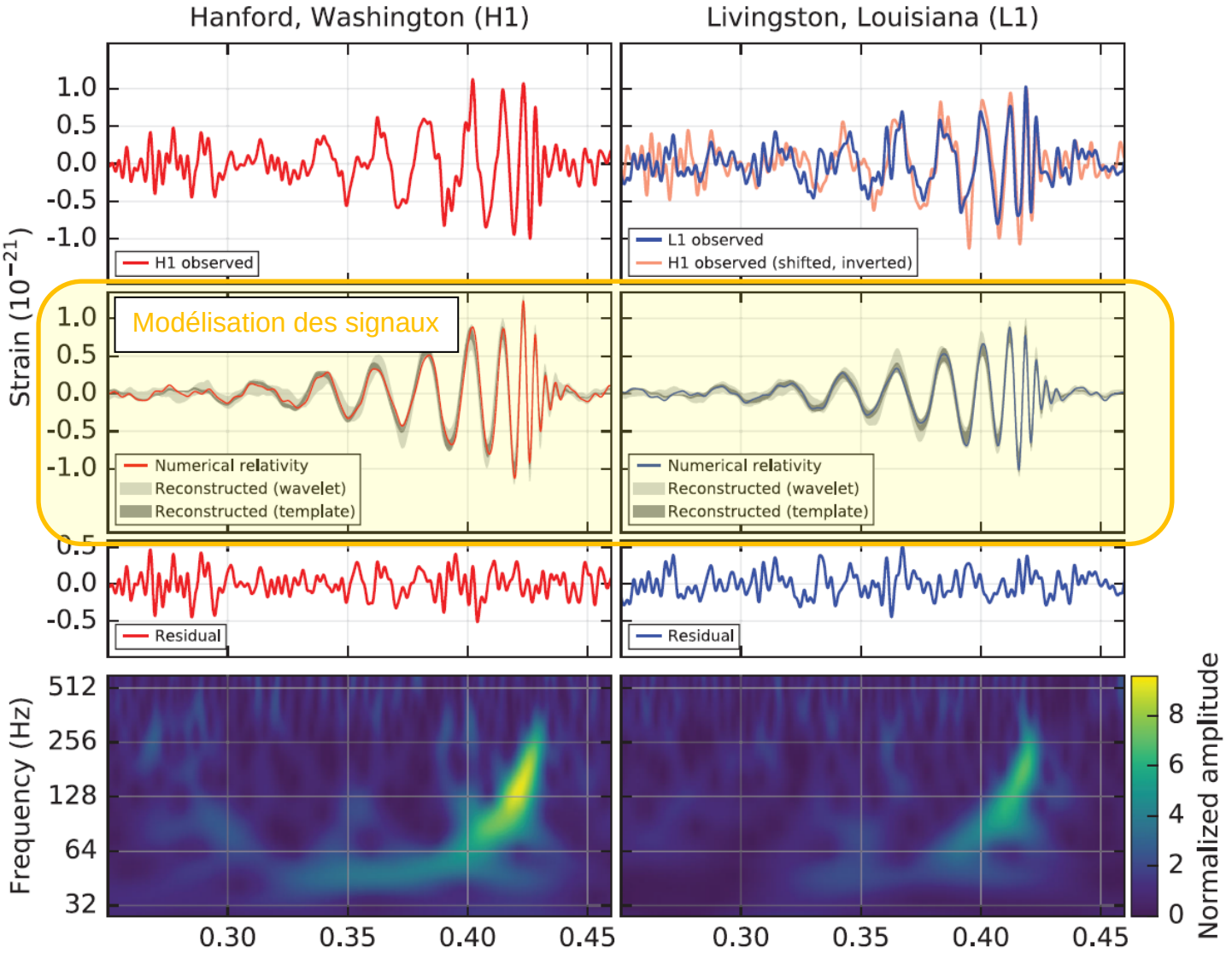
La cause vient du fait que le déplacement des membranes des haut-parleurs dépend de la fréquence. Lorsque celle-ci augmente, les membranes se déplacent moins, le phénomène est visible à l'œil nu.

On s'est aperçu que l'on peut corriger ce phénomène en supprimant le montage suiveur dans la détection. C'est une coïncidence qui manque de rigueur scientifique, mais qui sera bien pratique pour modéliser le signal reçu, par contre cela ajoutera du bruit !

Détermination des caractéristiques de l'onde gravitationnelle

Modélisation

Voici les signaux détectés le 14 septembre 2015 par les détecteur LIGO :



Source : PHYSICAL REWIER LETTER 12 février 2016

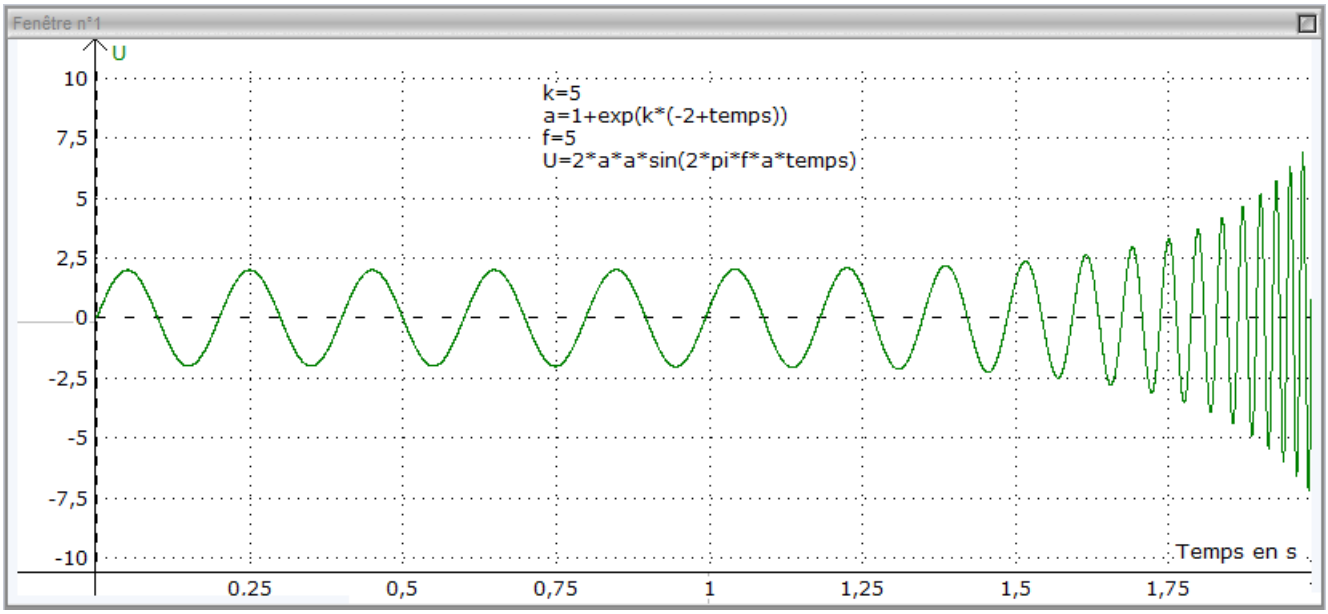
Pour déterminer les paramètres de « l'événement cataclysmique » (taille des trous noirs, distance à la Terre), les scientifiques ont modélisé les signaux reçus (Numerical relativity). On se propose de faire de même.

On divise notre club en 2 groupes :

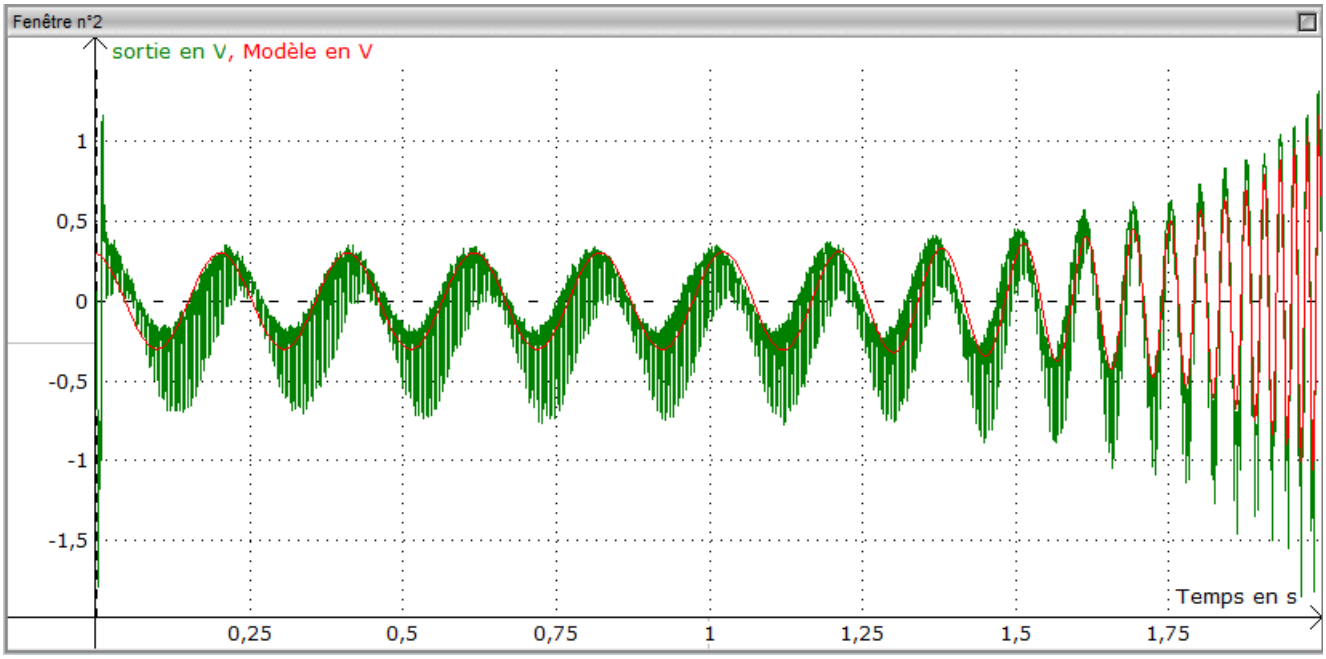
- Paul, Emma et Pauline génère l'onde gravitationnelle en choisissant 2 paramètres k et f caractéristiques des masses et de la distance des trous noirs.
- Théo, Léo et Emilien doivent déterminer ces paramètres sans les connaître !

Essais :

Voici la forme de l'onde générée, les paramètres sont k=5 et f=5Hz :



Après passage dans notre détecteur ARAGO, voici les résultats :



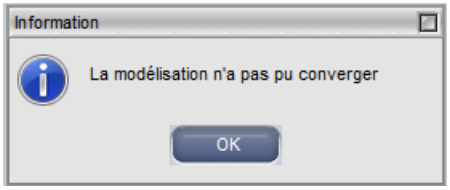
En vert le signal détecté et traité, en rouge son modèle.

On choisit comme modèle la fonction :

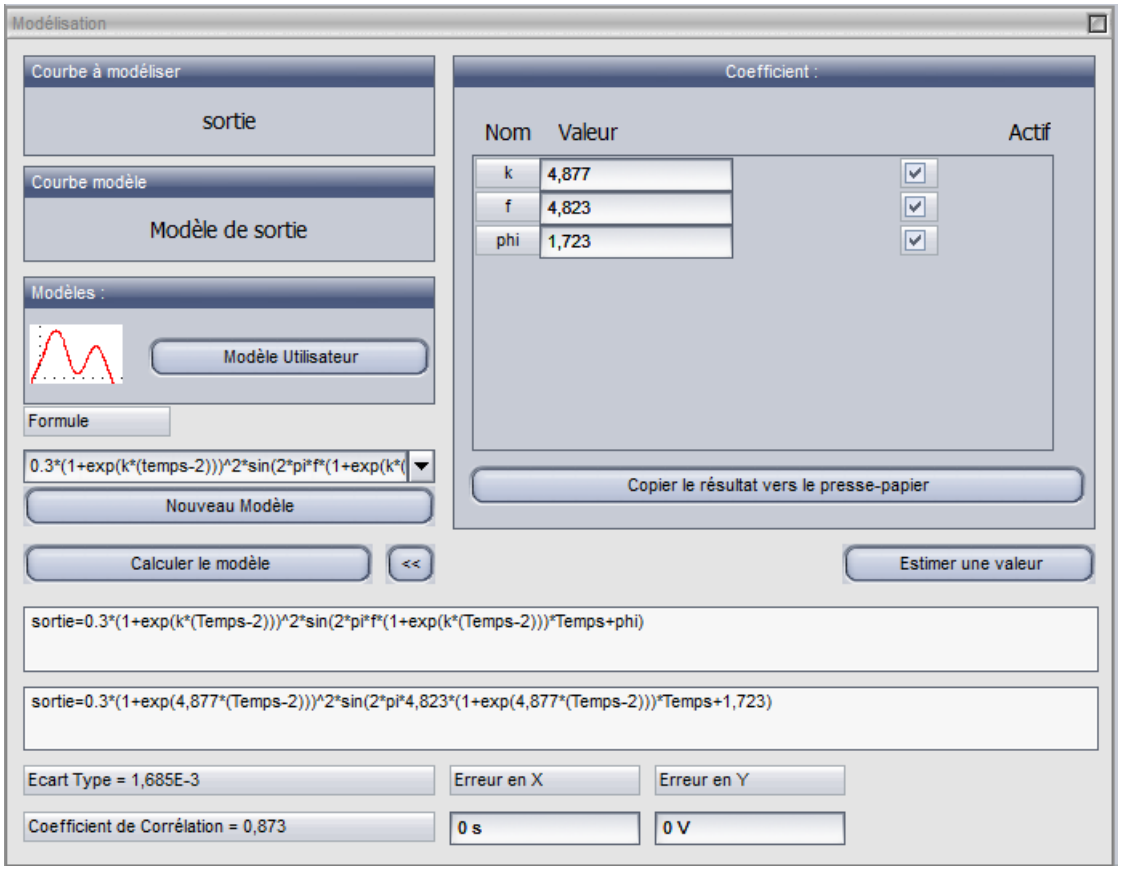
$$U = 0{,}3\times a^2\times\sin(2\pi\times f\times t + \varphi) \quad \text{avec} \quad a = 1 + \exp(k\times(t - 2))$$

La constante φ permet d'ajuster le décalage initial de la fonction sinus.

Le logiciel de modélisation n'arrive pas à trouver les paramètres k, f et φ :



Après de nombreuses tentatives variées, nous arrivons à trouver un modèle pertinent en lui proposant des valeurs plausibles pour k et f, il arrive à déterminer φ (φ = 1,723). Puis ensuite on propose de chercher k qu'il trouve (k = 4,877) et enfin on active f (pour obtenir f = 4,823).



Résultats :

groupe (Paul, Emma, Pauline)	groupe (Théo, Léo, Emilien)
production	détection
k = 5 f = 5	k = 4,877 et f = 4,823

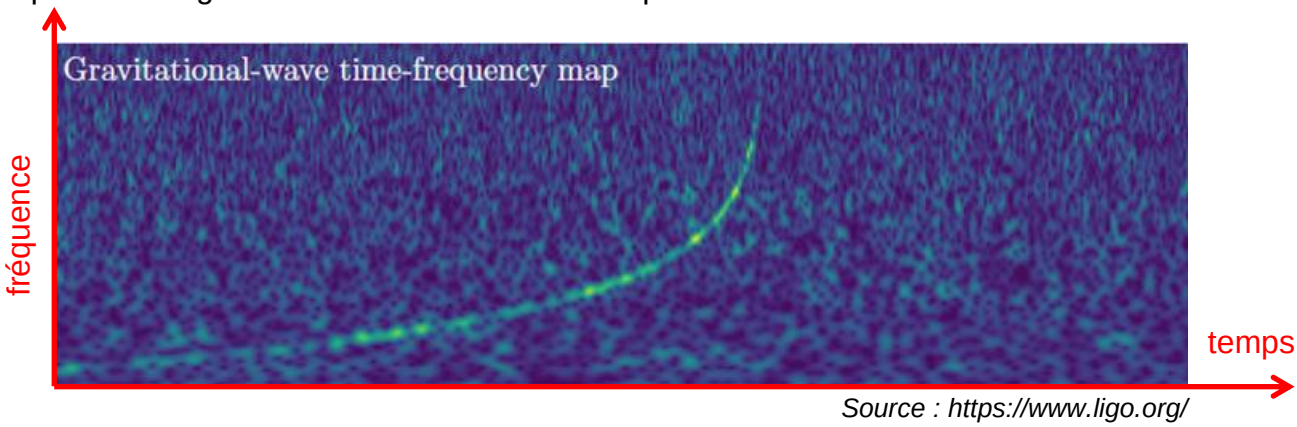
Les valeurs de k et f trouvées sont proches de celles proposées (de 2% à 4% d'écart), mais cette méthode a ses limites ... .

Analyse spectrale

Nécessité

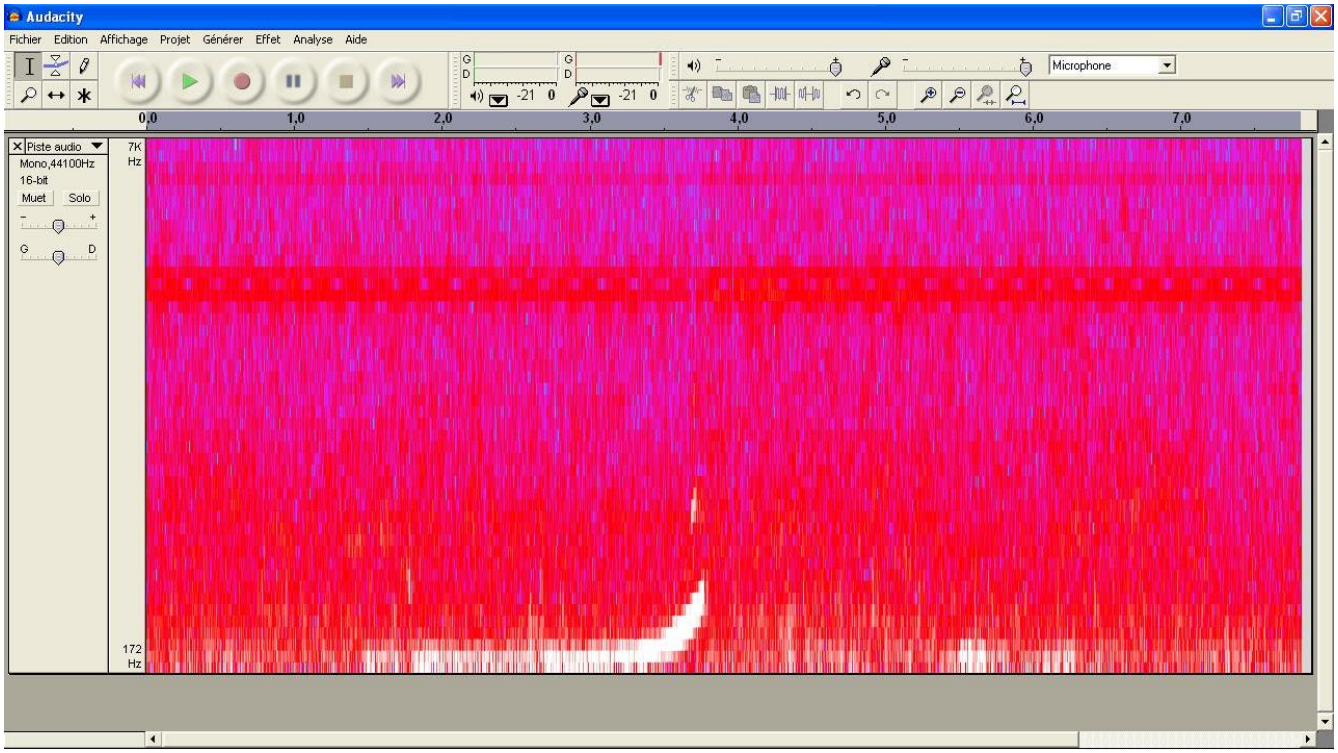
En diminuant l'amplitude de la tension envoyée aux haut-parleurs (en dessous de 0,1 V), il devient difficile de récupérer un signal exploitable. On procède alors autrement en utilisant la technique de veille utilisée par LIGO et VIRGO :

L'évolution de la fréquence de la vibration en fonction du temps est caractéristique. On représente donc le spectre du signal détecté en fonction du temps comme ci-dessous :



Source : https://www.ligo.org/

Nous connaissons le logiciel Audacity qui permet cette représentation en mode spectre :

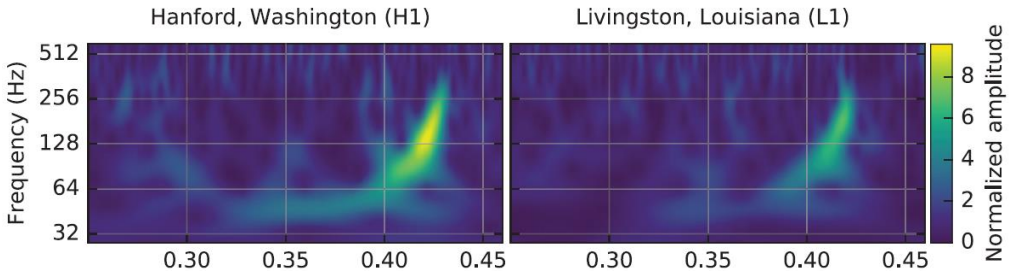


Mais la qualité n'est pas suffisante pour une exploitation correcte.

Nous faisons appel aux radioamateurs de Franche-Comté qui sont habitués à traiter du son en utilisant l'informatique. Ils nous renvoient sur Jean-Louis Rault membre de la Commission radioastronomie de la Société Astronomique de France. Nous prenons contact avec lui.
Il utilise un logiciel très performant Spectrum Lab pour observer en radio les étoiles filantes.

Spectrum Lab est tout à fait le logiciel qui nous convient. Après quelques déboires matériels et logiciels, pour faire fonctionner cette « usine à gaz » comme Jean-Louis Rault la qualifie, ses aides portent leurs fruits et on réussira à obtenir des spectrogrammes avec beaucoup plus de finesse qu'Audacity.

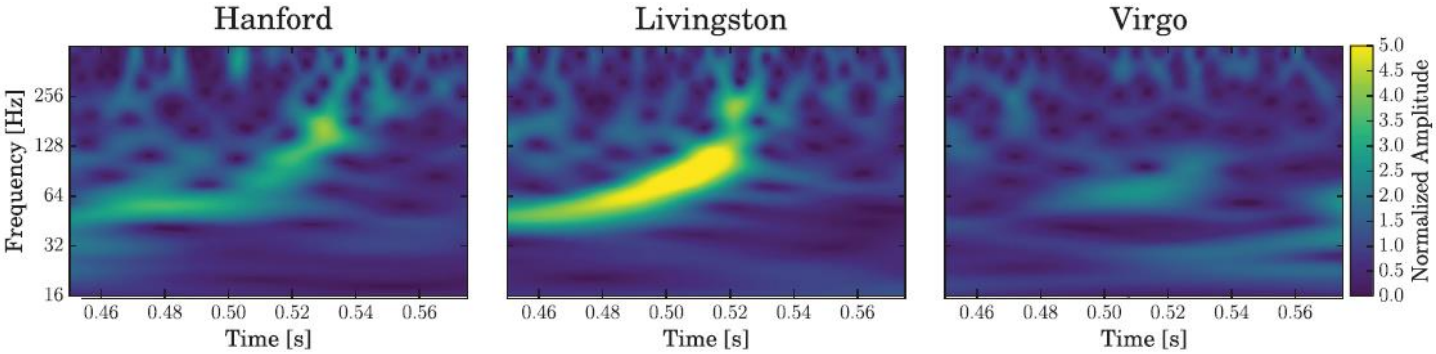
Evènement du 14 septembre 2015 : PHYSICAL REWIER LETTER 12 février 2016



black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_\odot$ and $29^{+4}_{-4} M_\odot$

distance of 410^{+160}_{-180} Mpc

Evènement du 14 aout 2017 : PHYSICAL REWIER LETTER 6 octobre 2017

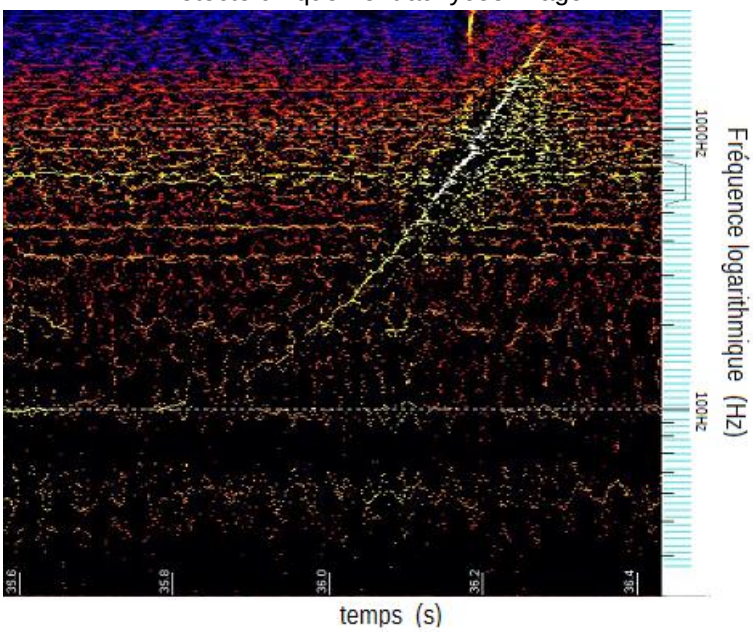


masses of the initial black holes are $30.5^{+5.7}_{-3.0} M_\odot$ and $25.3^{+2.8}_{-4.2} M_\odot$

distance of the source is 540^{+130}_{-210} Mpc.

Evènement du 15 février 2018 : CONCOURS C-GÉNIAL 2018

Détecté uniquement au lycée Aragon



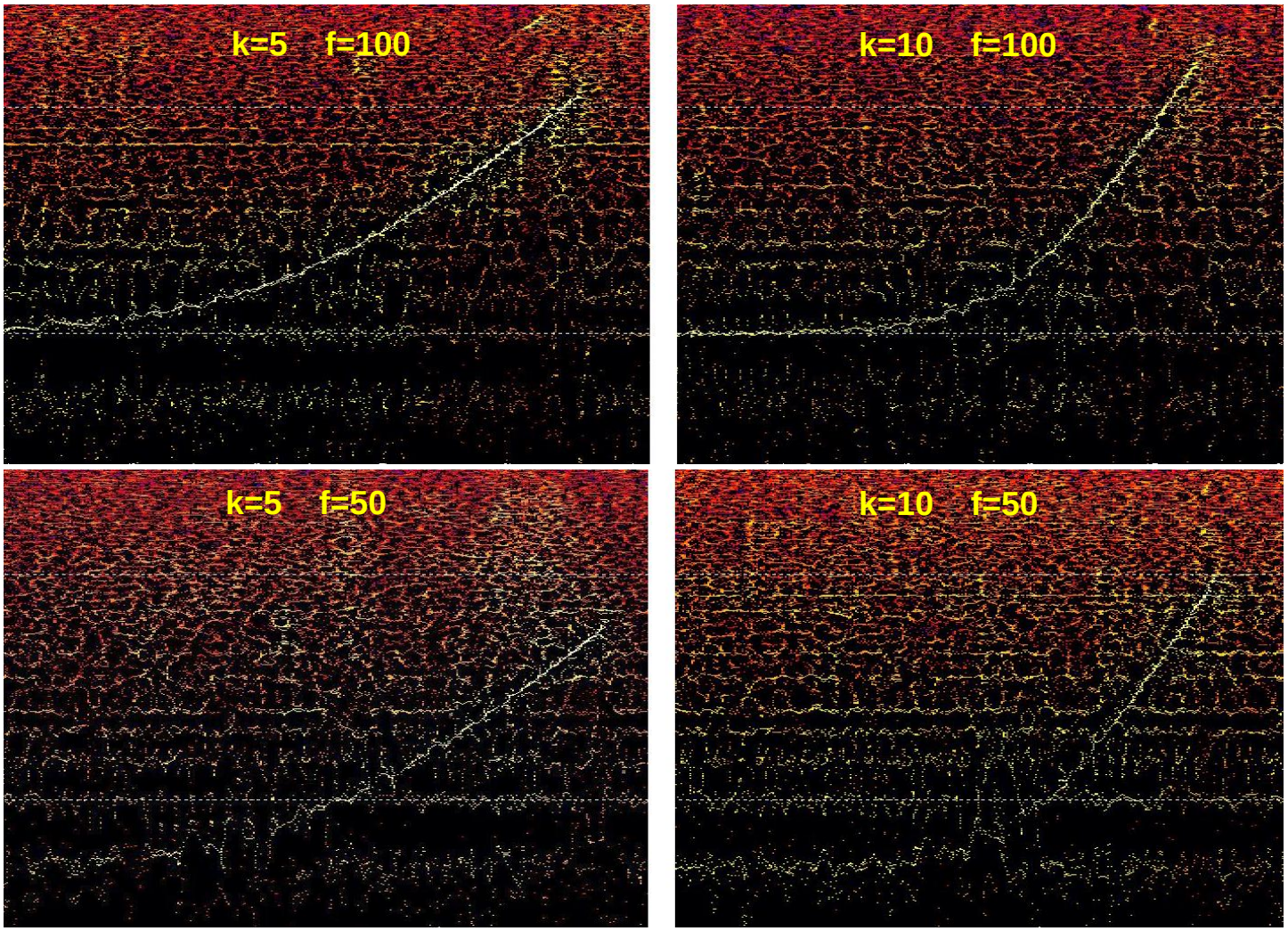
Dont voici les paramètres :

k = 10

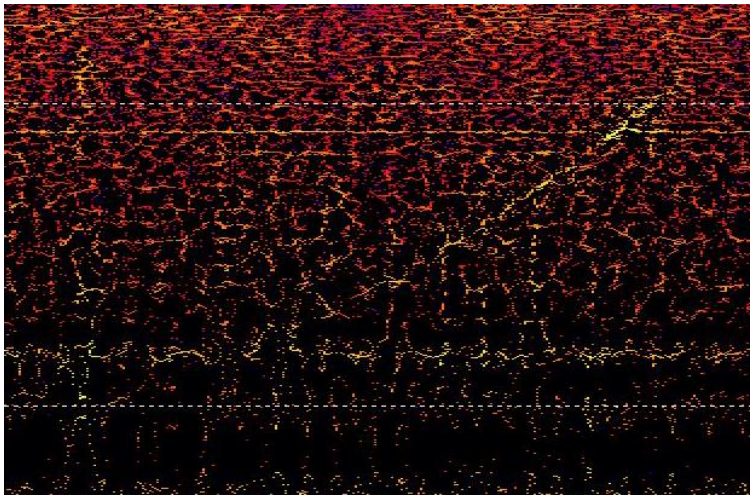
f = 100 Hz

Méthode utilisée

Pour déterminer les paramètres, nous nous sommes fait une banque de 4 spectrogrammes avec différentes valeurs de k et f. On place des marqueurs à 100 kHz et 1000 Hz pour pouvoir aligner correctement les spectrogrammes.

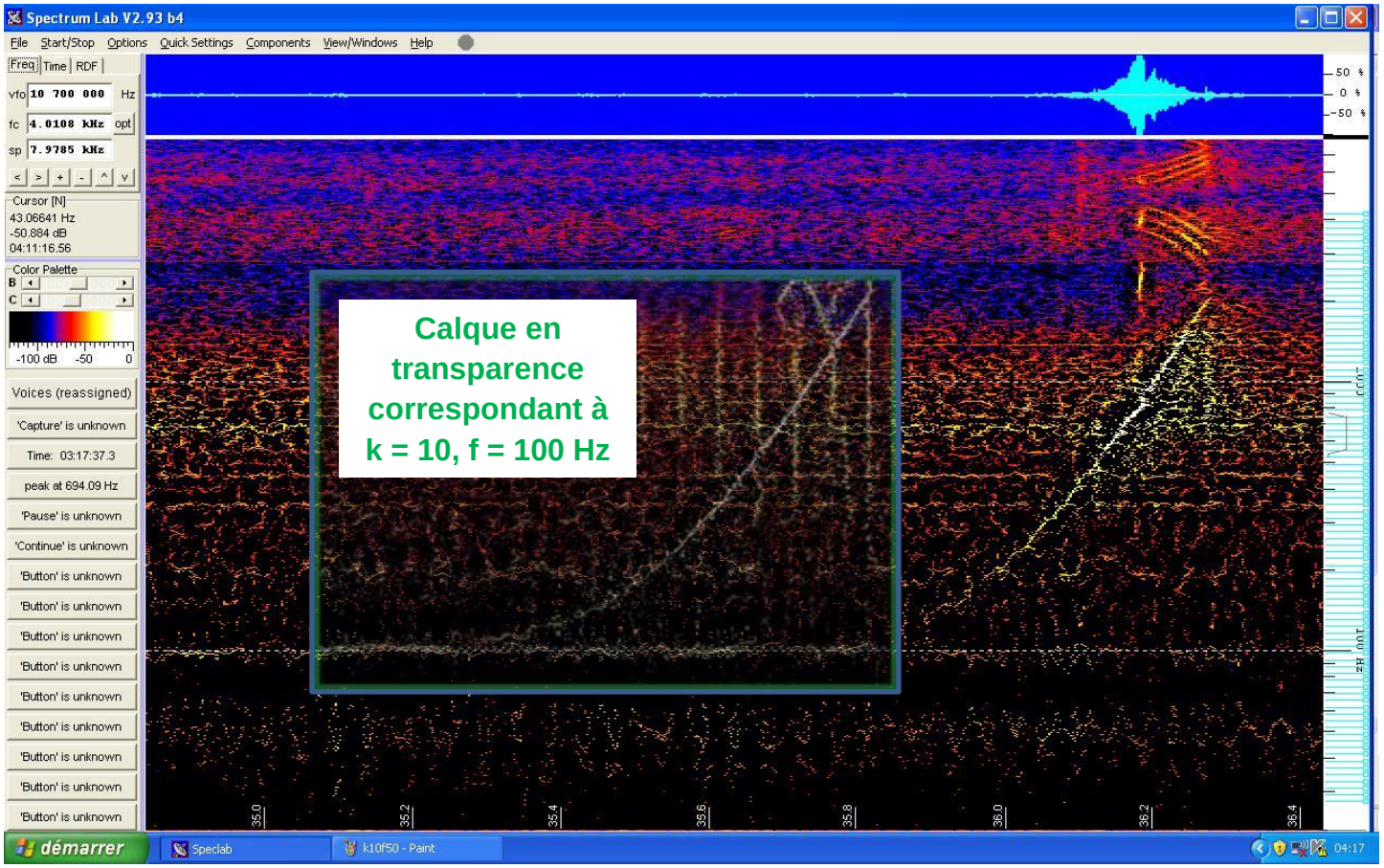


Avec une amplitude d'alimentation des haut-parleurs très faible : 0,03V , voici les résultats :

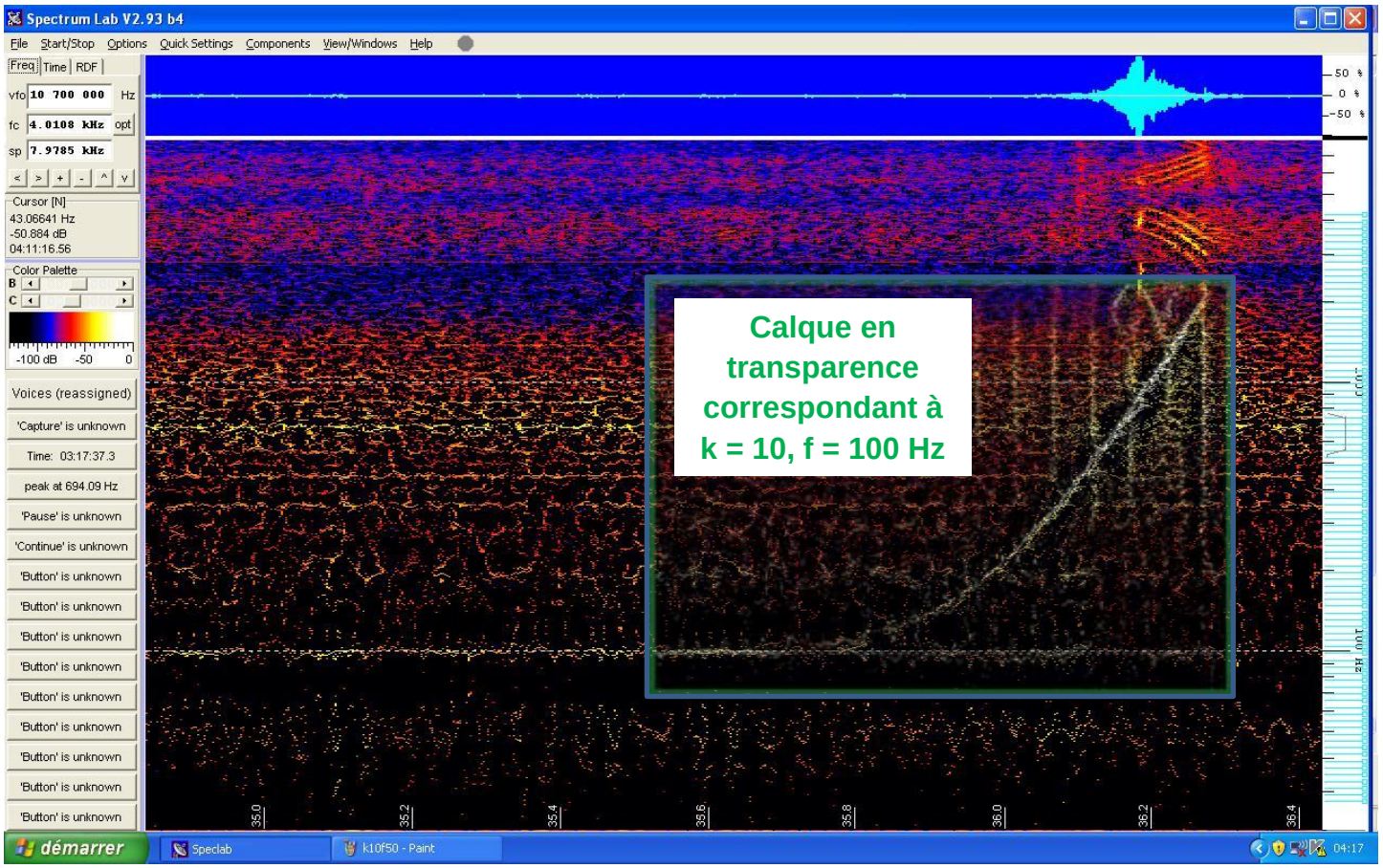


On arrive encore à détecter l'onde gravitationnelle et ses paramètres ici k = 5 et f = 100 !

A l'aide de ces spectrogrammes, on fait des calques que l'on essaie de superposer au spectrogramme dont il faut déterminer les caractéristiques :



Essai de calques :



Superposition parfaite du calque, les spectrogrammes sont identiques.

Le but du jeu est maintenant de trouver k et f sans que le signal à découvrir soit dans la banque.
Au travail …..

Conclusion

Ce projet a été très enrichissant pour chacun d'entre nous, il nous a donné l'occasion de nous plonger dans un domaine de la physique du 21ème siècle qui a eu un grand retentissement médiatique avec un prix Nobel l'an dernier. On a pu échanger avec un chercheur spécialiste de la discipline qui s'est mis à notre niveau, qui nous a encouragés et qui nous a communiqué sa passion.

Aujourd'hui on est capable de comprendre et d'expliquer l'origine des ondes gravitationnelles et leur détection, ce qui nous semblait complètement inabordables il y a 6 mois.

Remerciements

Pour nous avoir permis d'arriver au bout de ce projet, nous remercions vivement :

- Ludovic Py agent au lycée pour avoir réalisé les supports de notre interféromètre.
- Catherine et Patricia laborantines du lycée pour leur disponibilité à nous sortir du matériel, pour leur tolérance pour avoir squatté une partie du laboratoire pendant 6 mois !
- Jean-Louis Rault de la Société Astronomique de France pour les nombreux échanges que nous avons eus pour utiliser SpectrumLab.
- Nicolas Arnaud chercheur CNRS sur VIRGO pour ses encouragements, les explications claires et rapides qu'il nous a fournies.
- Alain Froidurot sans qui nous en serions encore à essayer d'obtenir des interférences constructives et destructives avec les ultrasons !

Bibliographie :

- CNRS Communiqué de presse national du 11 février 2016
- Les défis du CEA N°206 avril 2016
- PHYSICAL REWIER LETTER - 12 february 2016
- PHYSICAL REWIER LETTER - 6 october 2017
- Tutorials on GW data analysis :
  https://www.nikhef.nl/~vdbroeck/GW_cursus/Werkcollege_5.pdf

Sitographie :

- https://lejournal.cnrs.fr
- https://www.ligo.org/
- http://www.virgo-gw.eu/
- https://physics.aps.org/assets/8cbf3dfb-7849-485b-8626-1276bc044ddf/video1.mp4
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Circuit_d%C3%A9tecteur_d%27enveloppe
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Montages_de_base_de_l%27amplificateur_op%C3%A9rationnel