

ONDES GRAVITATIONNELLES

et MUSIQUE des SPHÈRES

A la mémoire de Vera Rubin,

décédée le 25 décembre 2016

Yves Meyer

1 Vera Rubin



Les découvertes principales faites par Vera Rubin sont **la rotation des galaxies et la matière noire**.

Le diamètre de la voie lactée est environ 100.000 années-lumière. La partie située à moins de 2.000 al du centre galactique semble tourner de façon solidaire à une vitesse angulaire uniforme, donc avec une vitesse linéaire proportionnelle à la distance du centre de notre galaxie.

Dans le reste du disque, où se trouve le Soleil, la vitesse angulaire des objets décroît tellement vite que la vitesse linéaire de rotation reste quasiment égale à 220 km/s depuis 3.200 al (1 kpc) du centre jusqu'à 50.000 al (15 kpc).

Ainsi, si la période de révolution galactique du Soleil, situé à 28.000 al du centre galactique, est évaluée à 226 millions d'années, une étoile située à 3.200 al fera le tour de notre galaxie en 26 millions d'années seulement. Le Système solaire aurait donc effectué entre 20 et 21 révolutions galactiques depuis sa formation voici 4,55 milliards d'année.

2 Les ondes gravitationnelles

Tous les deux mois environ, une **alerte** nous est envoyée. Elle vient du fond de l'Univers et nous annonce qu'un **événement gravitationnel cataclysmique** s'y est produit.

Mais, jusqu'en septembre 2015, les scientifiques ne pouvaient pas **détecter** ces signaux. Tout changea le 14 septembre 2015 à 09 :50 :45 (UTC time) : pour la première fois l'homme a détecté le passage d'une onde gravitationnelle et en a compris le message : **deux trous noirs avaient fusionné**. Cette détection n'a été annoncée que le 11 février 2016, car les scientifiques voulaient être rigoureusement sûrs de leur analyse des données. Une nouvelle astrophysique est née et notre connaissance de l'Univers en sera à jamais modifiée.

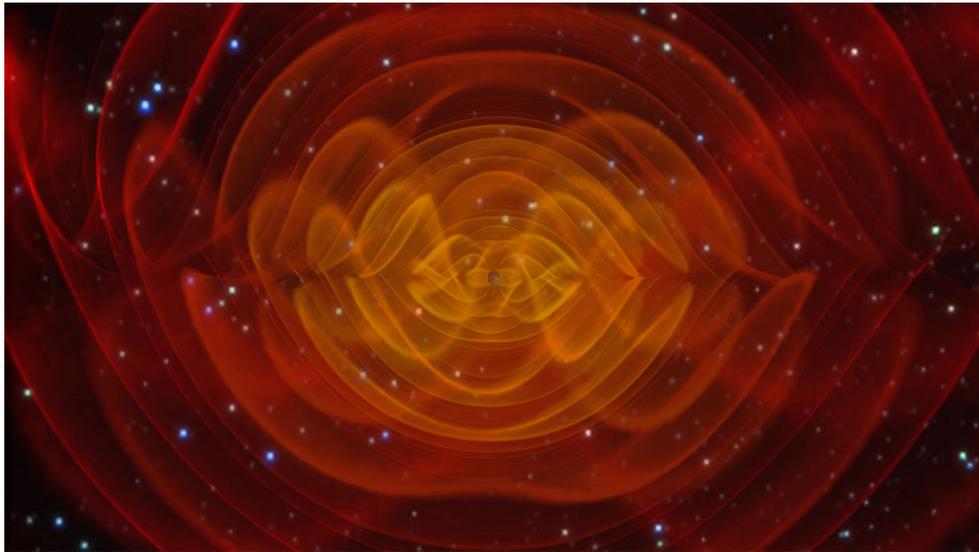
Ondes gravitationnelles \neq **ondes électromagnétiques**.

Ondes électromagnétiques : ondes radio, infra-rouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, rayons gamma.

Les ondes acoustiques sont des vibrations de l'atmosphère et ne peuvent se propager dans le vide.

*This first detection is a spectacular discovery : the gravitational waves were produced during the final fraction of a second of the merger of two black holes to produce a single, more massive spinning black hole. **This collision of two black holes had been predicted but never observed.***

(Annonce du laboratoire LIGO de Caltech).



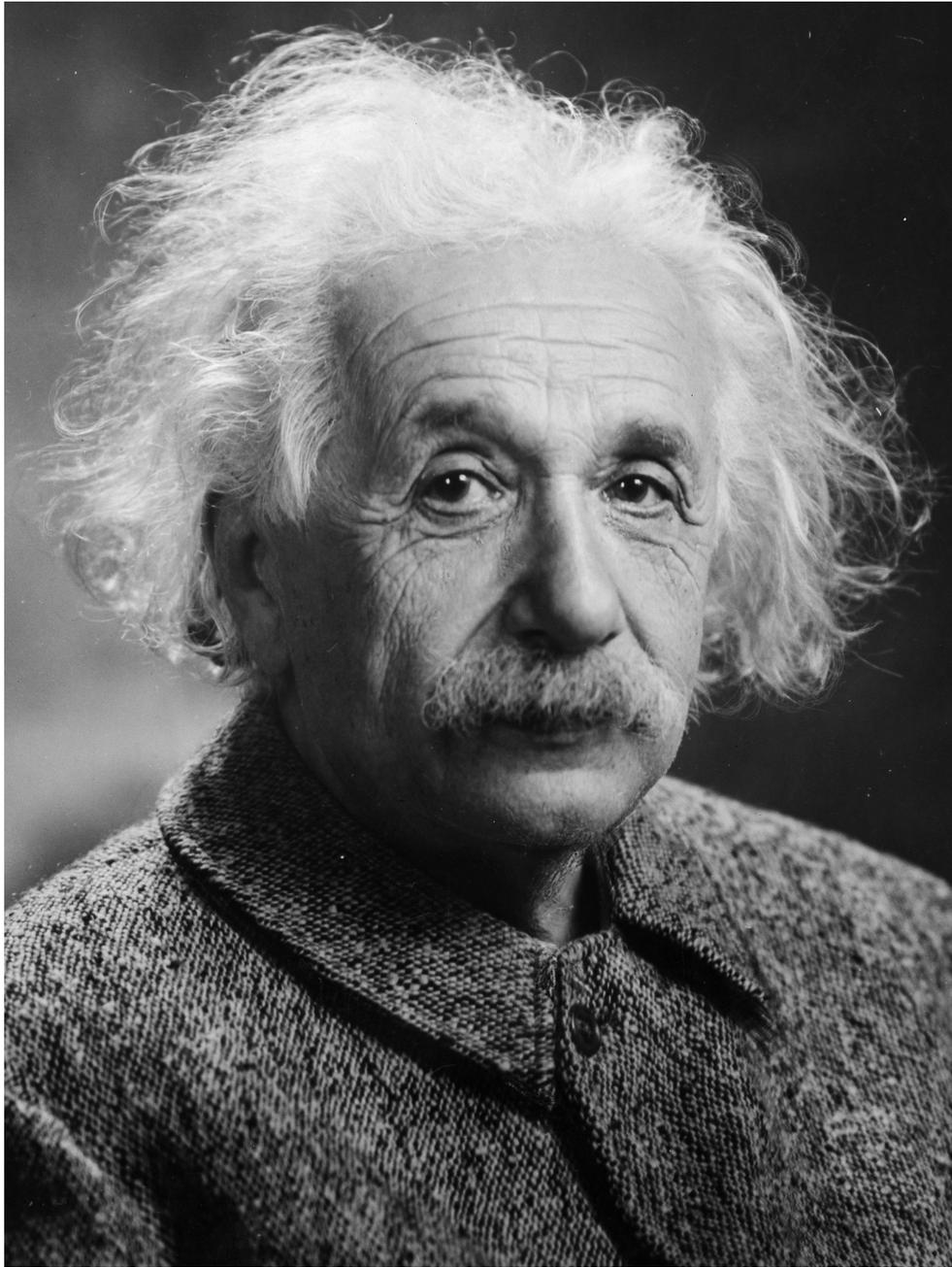
Nous entendons l'Univers.

Et nous entendons l'Univers grâce à des **algorithmes** qui ressemblent à ceux que l'on emploie depuis la fin des années 80 dans le son numérique **Dolby** (que l'on trouve dans tous les films récents).

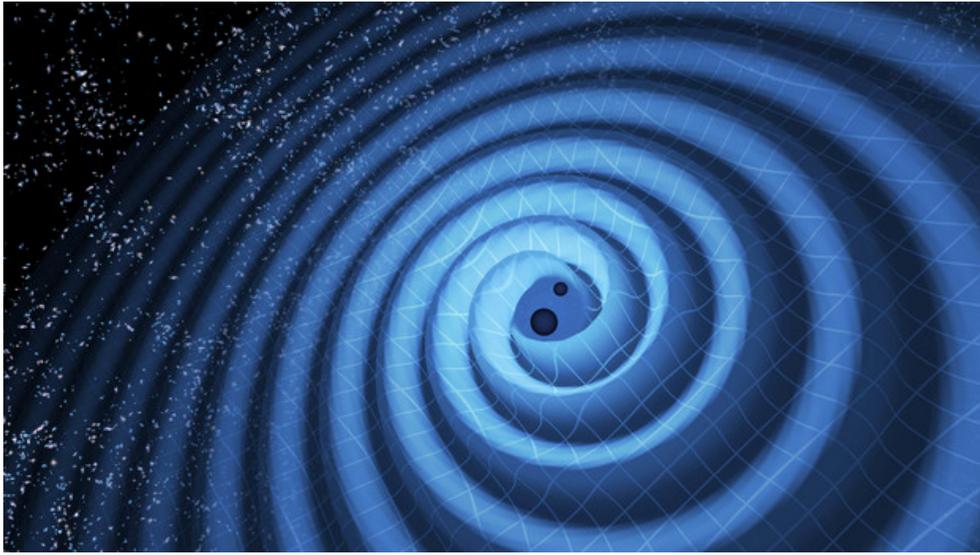
Une onde gravitationnelle est une **vibration** de l'espace-temps, créant une modification **transitoire** de la géométrie de l'Univers. L'accélération d'un objet massif crée une onde gravitationnelle (trop faible, en général, pour être perçue). Ces déformations de la géométrie de l'espace-temps, de la forme géométrique de l'Univers, se propagent dans l'Univers, **à la vitesse de la lumière**, sous la forme d'une vibration dont la durée peut être de l'ordre de quelques secondes.

Une onde gravitationnelle est déclenchée par un événement gravitationnel cataclysmique. Une **fusion entre deux trous noirs** s'est produite il y a un milliard trois cents millions d'années. Pendant quelques secondes l'énergie dissipée par cette fusion fut plus grande que toute l'énergie produite dans le reste de l'Univers. Cette fusion a déclenché l'onde gravitationnelle qui, après avoir traversé une grande partie de l'Univers à la vitesse de la lumière, a atteint, la terre le 14 septembre 2015 à 09 :50 :45 (temps UTC).

Einstein avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles, mais pensait qu'elles sont trop ténues pour pouvoir être détectées. Par ailleurs Einstein ne croyait pas en l'existence des trous noirs.



La détection, le 14 septembre 2015, d'une onde gravitationnelle constitue la première **preuve directe de l'existence des trous noirs**.



3 Pulsars et ondes gravitationnelles

Les pulsars ont été découverts en 1967 de façon quelque peu fortuite par Antony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell qui analysaient des phénomènes de scintillation réfractive dans le domaine radio. Les pulsars sont issus de l'explosion d'une étoile massive en fin de vie. Antony Hewish a obtenu, lui seul, le prix Nobel pour cette découverte.

Le rétrécissement au cours du temps de l'orbite du pulsar binaire PSR B1913+16 **s'explique par l'existence du rayonnement gravitationnel** prédit par la relativité générale. Cette preuve indirecte de l'existence du rayonnement gravitationnel a été récompensée par le prix Nobel de physique (Russell Alan Hulse et Joseph Hooton Taylor, en 1993).



Composite optical/X-ray image of the Crab Nebula, showing synchrotron emission in the surrounding pulsar wind nebula, powered by injection of magnetic fields and particles from the central pulsar.

4 L'algorithme de Klimenko

Le 14 septembre 2015 à 09 :50 :45, ce n'est pas l'homme qui a perçu la vibration de l'Univers, c'est un **algorithme** mis au point par **Sergey Klimenko** (University of Florida). Les nouveaux algorithmes qui ont permis la détection des ondes gravitationnelles font partie de l'**ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE**. L'algorithme de Klimenko n'utilise pas de connaissance a priori sur le signal recherché et permet donc la détection de toute une gamme de **gravitational-wave bursts** provenant d'autres événements cataclysmiques dans l'Univers.



Sergey Klimenko

I develop a search algorithm Coherent WaveBurst together with my UF colleagues and collaborators from Germany (AEI Hannover) and Italy (Padova & Trento). On September 14, 2015 the Coherent WaveBurst algorithm discovered a signal from two colliding black holes three minutes after the data was collected from the LIGO instruments. **The key features of Coherent WaveBurst are that by using WAVELETS it explores the TIME-FREQUENCY structure of the data and finds signals in the LIGO frequency band without restrictions to a particular source type listed above.** Most of these sources are difficult to model, therefore, the search algorithms should use no or little assumptions on the source models. Coherent Waveburst was designed to cast the widest possible net for gravitational-wave bursts and extract their properties such as bandwidth, duration, sky location, polarization state and signal waveform. Also it can detect signal in real-time, minutes after a gravitational wave is recorded by detectors, which is important for the multi-messenger astronomy.

5 Livingstone et Hanford

La National Science Foundation avait construit à la fin des années 90 deux observatoires géants séparés de 3.002 Kms. L'un (Hanford) est situé près de Seattle (Etat de Washington), l'autre (Livingston) est situé en Louisiane. Ces observatoires ont fonctionné pendant 8 ans sans détecter la moindre onde gravitationnelle. Cela a conduit la NSF à remplacer les détecteurs par une version dont la sensibilité est très améliorée (Advanced LIGO, 2015).

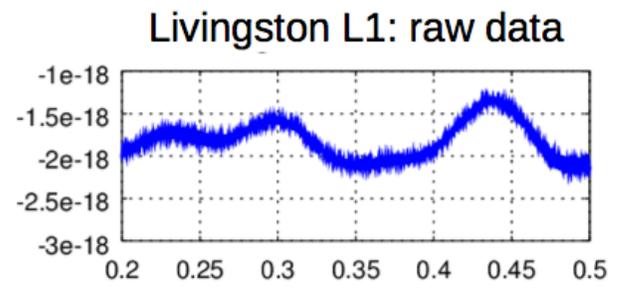
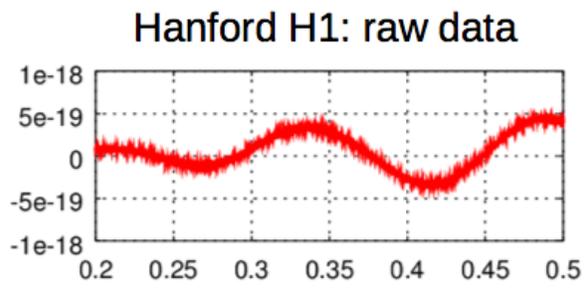


Hanford, Etat de Washington

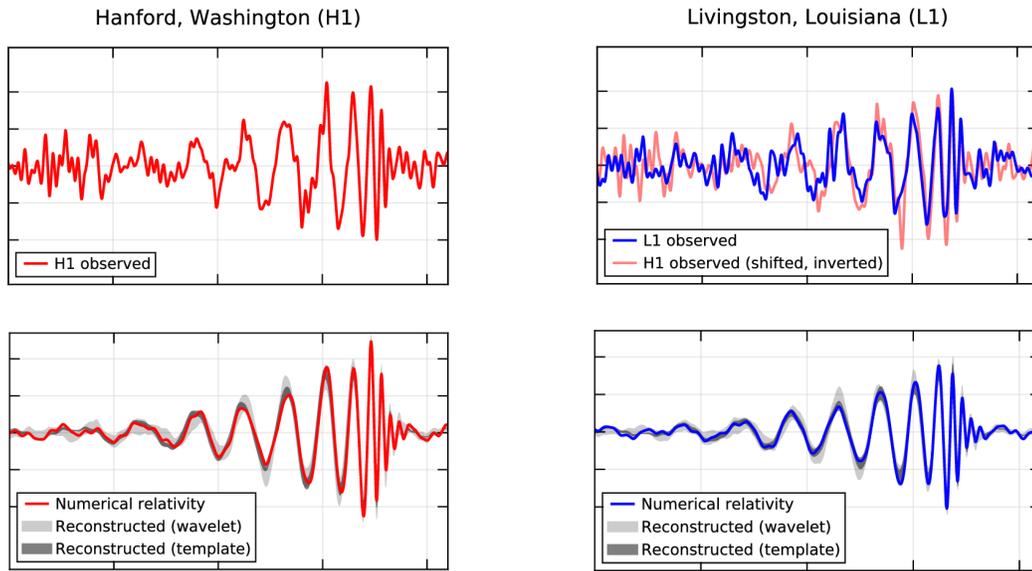


Livingstone, Louisiane

Le 14 septembre 2015, un signal, présentant toutes les caractéristiques d'une onde gravitationnelle, a été détecté à Hanford. Le même signal a été détecté presque simultanément à Livingston. L'infime décalage temporel (7 millisecondes) séparant ces deux détections correspond au temps mis par l'onde gravitationnelle pour aller de Hanford à Livingston à la vitesse de la lumière.



Signaux enregistrés par les deux détecteurs de Ligo durant le passage du chirp



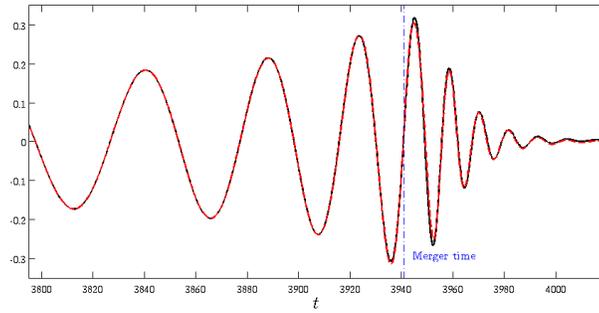
Onde gravitationnelle GW150914 enregistrée par les détecteurs LIGO de Hanford (H1, colonne de gauche) et de Livingston (L1, colonne de droite) le 14 septembre 2015 à 09 :50 :45 UTC. Les fréquences des séries temporelles sont filtrées pour ne conserver que la bande de fréquences la plus sensible du détecteur, et pour éliminer certaines “lignes spectrales” dues aux instruments de mesure.

6 Thibault Damour

Par des calculs théoriques basés sur les travaux d'Einstein, Thibault Damour avait établi la forme analytique que devrait avoir une onde gravitationnelle produite par l'effondrement l'une sur l'autre de deux étoiles à neutrons en rotation rapide. C'est une fonction du temps définie par

$$s(t) = c|t - t_0|^{-\alpha} \cos(\omega|t - t_0|^\beta + \varphi)$$

où c est une constante, $\alpha = 1/4$, $\beta = 5/8$, $\omega \gg 1$ et t_0 est l'instant de la coalescence des deux étoiles à neutrons. Ce signal $s(t)$ est un exemple de signaux modulés en fréquence, un **chirp**.



Le mot anglais **chirp** signifie le chant modulé d'un oiseau. En traitement du signal il s'agit d'un signal modulé en fréquence.

Les chirps existent dans la Nature. Ils sont utilisés par les animaux pour s'orienter ou communiquer. Les oiseaux, les grenouilles et les baleines émettent des chirps. Une espèce particulière de chauve-souris (*Eptesicus fuscus*) utilise un sonar basé sur l'émission de chirps.

7 The hunting of the chirp

La déformation des longueurs n'est perceptible qu'au moment précis où l'onde gravitationnelle rencontre le détecteur. L'espace-temps se déforme alors pendant quelques secondes. La déformation des longueurs des bras de l'interféromètre ne dépasse pas le dix-millième du diamètre du proton. Cette déformation est une fonction $\sigma(t)$ du temps. Le signal observé $s(t) = \sigma(t) + r(t)$ n'est pas cette déformation. Il est corrompu par un bruit $r(t)$ (bruit mécanique dont les propriétés statistiques sont connues, bruit thermique et *glitches*). Ce bruit $r(t)$ est mille fois plus grand que le signal recherché $\sigma(t)$. Klimenko devait donc détecter un événement qui a toutes les chances de passer totalement inaperçu.

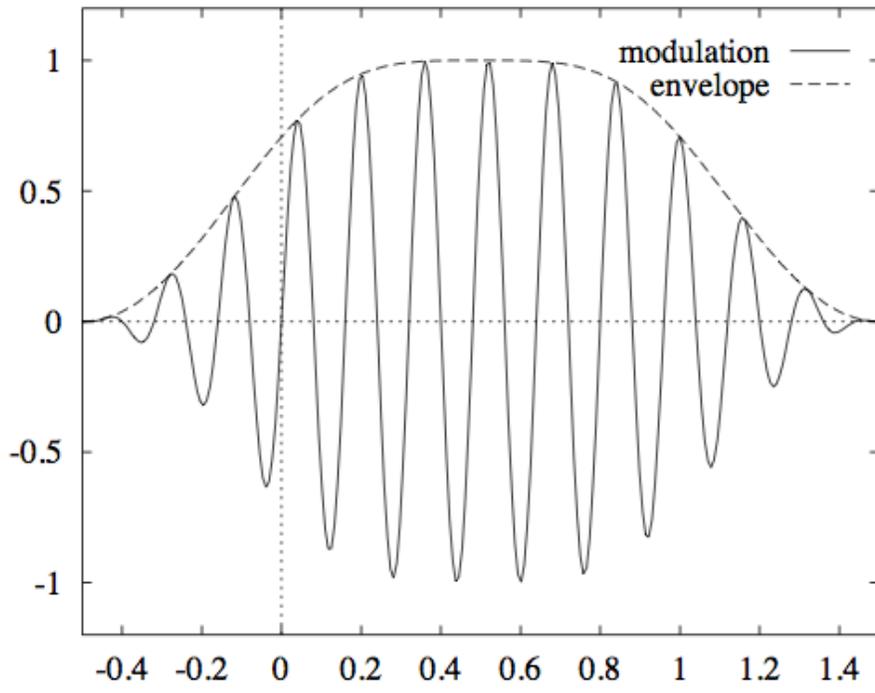
Dès lors les chercheurs se trouvaient devant un choix difficile : utiliser la technique du filtre adapté ou un algorithme générique. Le filtre adapté revient à chercher un petit morceau du signal qui, au réglage près des paramètres, soit identique à la solution trouvée par Thibault Damour. C'est pourquoi cette méthode est appelée paramétrique.

Dans l'algorithme générique on oublie la solution explicite pour chercher tout ce qui dans le signal a la même allure qu'un chirp. C'est la méthode choisie par Klimenko. C'est elle qui a gagné.

Ce qui distingue l'algorithme de Klimenko d'une analyse temps-fréquence traditionnelle est l'introduction d'un paramètre d'échelle, un **zoom** que l'on doit effectuer sur le signal enregistré et convenablement filtré $s(t)$ pour percevoir enfin l'onde gravitationnelle $\sigma(t)$. La gamme d'échelles utilisée par Klimenko va de 1 à 10^4 correspondant à des durées d'événements transitoires allant d'une milli-seconde à dix secondes.

8 L'analyse temps-fréquence

L'analyse temps-fréquence a pour but de décomposer un signal (acoustique ou autre) en éléments simples appelés atomes temps-fréquence. Voici un exemple d'atome temps-fréquence.



Plusieurs bases orthonormées d'atomes temps-fréquence ont été construites par Stéphane Jaffard et al. Voici la formule générale $w_{(k,l)}(t) = g(t - k) \sin[(l + 1/2) \pi t]$, $k, l \in \mathbb{Z}$, où g est une fonction jouant le rôle d'une fenêtre dans l'analyse de Fourier à fenêtre. La modulation est fournie par l et elle permet d'entre en résonance avec les oscillations du chirp, et donc de le détecter. La valeur de k sert alors à localiser le chirp. Ces bases sont l'instrument que Klimenko utilise pour détecter les chirps dans le signal enregistré par LIGO. Mais commençons par des exemples.

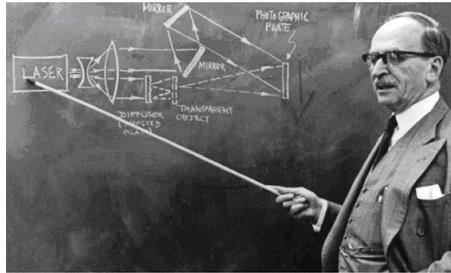
Écrire les notes en écoutant le professeur jouer du piano est un exercice que l'on impose aux enfants qui étudient le solfège. C'est la **dictée musicale**. Il s'agit de l'analyse temps-fréquence du signal acoustique perçu.

Écrire la partition d'une symphonie de Mozart quand on écoute la musique sans voir jouer les musiciens est beaucoup plus difficile. De même comprendre ce que dit votre interlocuteur lorsque tous les autres membres du groupe parlent très fort : il faut extraire ce qu'il dit du bruit environnant. Le cerveau le fait très bien.

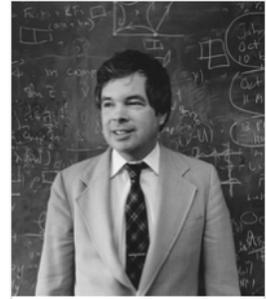
L'analyse temps-fréquence a été créée par Eugène Wigner (en 1932), puis développée par Dennis Gabor (en 1946) et Kenneth Wilson (en 1987), trois prix Nobel de physique.



Eugène Wigner



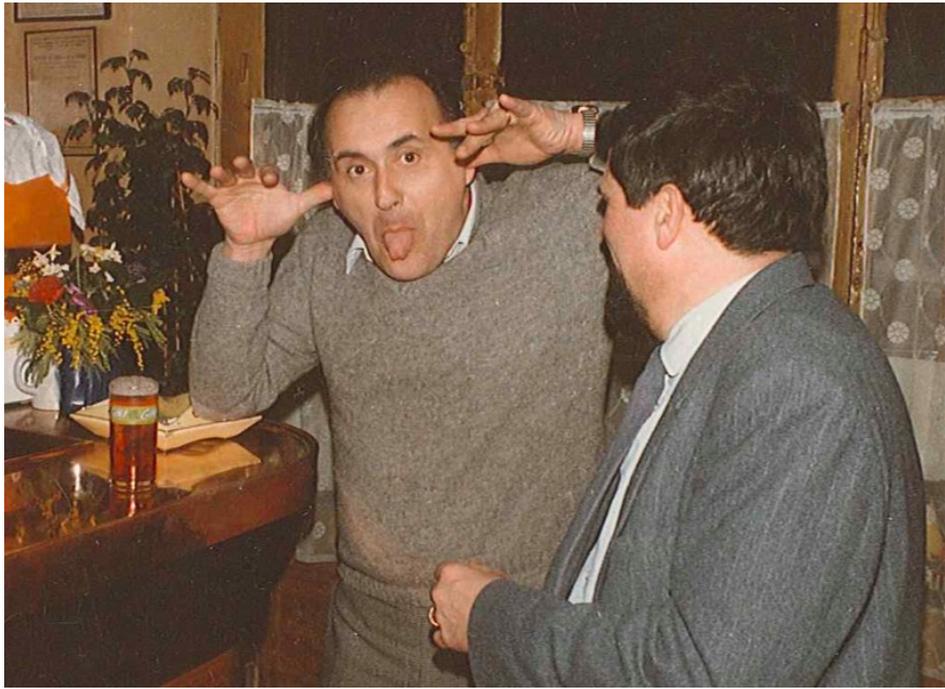
Dennis Gabor



Kenneth Wilson

Il faut aussi mentionner le mathématicien Jean Ville qui a adapté les idées de Wigner à l'analyse temps-fréquence des signaux acoustiques.

Plus près de nous on trouve Bernard Escudié qui a passé une grande partie de sa vie à étudier le sonar de la chauve-souris et son disciple Patrick Flandrin.





Les motivations de Wigner, Gabor et Wilson n'étaient pas la détection des ondes gravitationnelles, mais (1) la mécanique quantique, (2) l'analyse du signal de parole et (3) la théorie de la renormalisation.

Les idées de Gabor ont été amendées par Francis Low et Roger Balian (théorème de Low-Balian), puis reprises et améliorées par Henrique Malvar et par Martin Vetterli. Malvar et Vetterli ont élaboré la **Modified discrete cosine transform** utilisée dans le **son numérique Dolby**.



Martin Vetterli, Président de l'EPFL.

Les algorithmes proposés par Wilson ont été précisés et validés par **Stéphane Jaffard** et ses collaborateurs (I. Daubechies et J-L. Journé). Ce sont les travaux de Jaffard qui ont été utilisés par Klimenko et ont contribué à la détection des ondes gravitationnelles. Klimenko a réglé l'un des algorithmes de Jaffard pour améliorer la détection des **chirps** et d'autres signaux de même nature.

9 Références

Ouvrir Google. Ensuite entrez simplement : LIGO.

Ou bien, entrez : Sergey Klimenko.

Pour les aficionados :

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/363/1/012032/meta>

Bonnes lectures !