**Ondes gravitationnelles**

*Joël Lebidois*

# L’événement

Des ondes gravitationnelles prévues et théorisées par Einstein dès 1916 ont enfin été directement détectées en septembre 2015 par le LIGO (Laser Interferometer Gravitationnal-Wave Observatory). Ce détecteur comprend deux installations jumelles aux Etats-Unis, l’une en Louisiane, l’autre dans l’Etat de Washington. Chacune d’elle se compose de deux « bras » orthogonaux qui forment l’équivalent d’un vaste interféromètre de Michelson; chaque bras d’une longueur de 4 km abrite dans une cavité Fabry-Perot un faisceau laser permettant de mesurer la distance entre deux masses de test avec une très grande précision; les deux faisceaux sont obtenus par la division, grâce à un miroir semi-transparent, d’un unique faisceau laser incident. Ils se réfléchissent à l’extrémité des bras puis se recombinent au retour dans un photodétecteur. Une déformation de l’espace – entre les masses de test - créée par le passage d’une onde gravitationnelle doit provoquer une différence de chemin optique entre les deux faisceaux donc des figures d’interférence mesurables dans le photodétecteur. C’est ce qui a été constaté le 14 septembre 2015. La variation de l’interférence commença à une fréquence de 35 Hz pour atteindre 250 Hz avant de disparaître 250 ms plus tard. Les 7 ms qui ont séparé la détection du phénomène entre les deux installations jumelles correspondent exactement au temps qu’il a fallu à l’onde pour se propager à la vitesse de la lumière entre les deux détecteurs. C’est la brutale coalescence de deux trous noirs très massifs à environ 1,3 milliards d’années-lumière[[1]](#footnote-1) qui serait à l’origine de ce « burst » d’ondes gravitationnelles. Environ trois fois l’équivalent-énergie de la masse du Soleil fut convertie en ondes gravitationnelles en l’espace de quelques centaines de millisecondes.

Masse de test

Source Laser

Miroir

Miroir

L=4 km

Photodétecteur

Miroir semi-transparent

Cavité Fabry-Perot

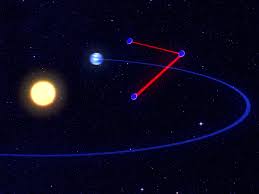
Qualitativement, on peut établir un parallèle entre les ondes électromagnétiques engendrées par des charges électriques accélérées et les ondes gravitationnelles engendrées par des masses qui sont en mouvement accéléré. Dans chaque cas, il y a création d’un champ qui dérive d’un potentiel : potentiel électrique et potentiel vecteur dans le premier cas, potentiel gravitationnel dans le second. L’existence d’ondes gravitationnelles ne peut donc pas être une surprise au plan conceptuel. Mais la comparaison s’arrête là car les ondes électromagnétiques se propagent à travers l’espace-temps alors que les ondes gravitationnelles sont des oscillations de l’espace-temps lui-même : à leur passage, elles modifient la *métrique* de l’espace-temps. Une autre différence tient à l’extrême petitesse de leurs effets qui, contrairement aux ondes radio ou à la lumière, ne sont absolument pas simulables en laboratoire. D’où la nécessité de déployer des interféromètres de tailles kilométriques comme le LIGO ou le Virgo (en Italie prés de Pise). A titre d’exemple, l’amplitude de la déformation de la métrique locale enregistrée par l’interféromètre LIGO n’était que de 10-21 ce qui ne correspond qu’à une déformation de 2x10-18 mètres sur une longueur de bras de 4 km (voir l’encadré en fin d’article). On comprend mieux ainsi la prouesse réalisée car la difficulté est autant de faire des mesures précises que de s’affranchir de tous les « bruits » susceptibles de brouiller le résultat : bruit de photon (bruit de phase), bruit sismique et bruits thermiques associés au montage mécanique des miroirs. La performance d’un interféromètre se mesure donc à sa capacité à s’affranchir plus ou moins de ces sources de bruit et à sa capacité à extraire l’information du bruit par le traitement de signal approprié.

# Et le graviton ?

En poursuivant l’analogie déjà évoquée entre champ électromagnétique et champ gravitationnel, puisqu’il existe un *boson* vecteur de la force électromagnétique – le photon – il est normal de penser à postuler l’existence (?) d’un autre boson – le *graviton* – qui serait la particule médiatrice ou vectrice de la force gravitationnelle. Mais il ne faut pas se méprendre, les ondes gravitationnelles ne constituent pas la preuve de l’existence de ce boson mythique. En effet, ces ondes sont la conséquence théorique de la géométrisation de la gravitation telle qu’imaginée par Einstein, mais ne sont pas la conséquence d’une quelconque quantification de cette dernière. On touche là au problème toujours non résolu de la physique moderne à savoir l’impossibilité, pour l’heure, de fusionner gravité et mécanique quantique en une seule et même théorie vérifiable.

# Le futur ou l’astronomie gravitationnelle

Les ondes gravitationnelles interagissent très faiblement avec la matière ce qui rend l’univers quasi transparent pour ces ondes. Cette propriété (qui est un inconvénient pour les détecter) devrait permettre de mieux étudier et comprendre des processus « cataclysmiques » dont les astronomes ne voient que la surface avec les moyens d’observation conventionnels : les phénomènes associés aux trous noirs, l’effondrement gravitationnel des étoiles massives, les processus en jeu au centre des galaxies, la coalescence ou fusion d’étoiles à neutrons, etc.

Mais pour profiter de ce moyen d’observation bien particulier, il faut impérativement améliorer la sensibilité et/ou la bande passante des détecteurs actuels afin d’augmenter considérablement le nombre moyen d’événements observables. Par exemple, comme l’amplitude de l’onde gravitationnelle varie[[2]](#footnote-2) en 1/*r* où *r* désigne notre distance par rapport à l’événement observé, une simple multiplication par 10 de la sensibilité permet de multiplier par 1000 (*r*3) le volume d’espace observable donc par 1000 le taux d’événements.

Une autre piste consisterait à s’affranchir des bruits parasites terrestres en construisant, à l’aide de 3 satellites, un interféromètre géant en orbite héliocentrique (en révolution directe autour du Soleil). C’est le projet eLISA ou « Evolved Laser Interferometer Space Antenna ». Le satellite père (la source laser infrarouge) et les deux satellites fils (les miroirs) formeront un triangle équilatéral d’un million de kilomètres de côté. Le centre du triangle suivra la Terre avec un retard de 20°, soit environ 50 millions de kilomètres. Le gain de sensibilité se situera surtout vers les très basses fréquences : 0,1mHz à 1Hz qui est une zone où la sensibilité des détecteurs terrestres est mauvaise. En prenant comme exemple deux trous noirs sur le point de fusionner, plus ils sont massifs plus faible est leur fréquence orbitale ; ainsi, eLISA devrait considérablement augmenter la diversité des événements observables, notamment vers les événements mettant en jeu des phénomènes supermassifs.

Le projet eLISA est un projet de l’ESA. Si ce projet est confirmé cette année (2016) la constellation de 3 satellites pourrait être lancée en 2034.

Puisque l’effet de l’onde gravitationnelle est très faible il est possible de le traduire par une légère déformation des éléments du tenseur métrique en ajoutant à ces derniers une petite quantité ***h*** sans dimension qui caractérisera les très faibles déformations locales provoquées par le passage de l’onde. En conséquence il devient possible de linéariser les dix équations différentielles d’Einstein et de rechercher une solution dans le vide (tenseur énergie-impulsion identiquement nul). On obtient alors pour ***h*** une équation d’onde tout à fait classique par des transformations de coordonnées et de jauge convenables. L’onde se propage à la vitesse de la lumière. Si l’on choisit un axe Oz comme axe de propagation, la composante hz de ***h*** selon cet axe est nulle tandis que les composantes hx et hy se combinent dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation pour donner une onde polarisée (deux modes possibles). De ces résultats on tire la conclusion que l’action de l’onde sur la métrique est purement *transversale* ; puisque ***h*** évolue périodiquement, l’effet d’une onde plane progressive sera d’étirer, à sa fréquence, dans un sens puis dans l’autre toute distance séparant deux masses de test ; d’où l’utilisation d’interféromètres à bras orthogonaux. Par exemple, des masses ponctuelles disposées en cercle se verront périodiquement disposées en ellipses puis en cercle, etc., pendant tout le passage de l’onde.

L’amplitude de la déformation ***h*** est approximativement :

*c*: vitesse de la lumière = 2,9979 108 m/s

G : constante gravitationnelle = 6,6726 10-11 m3kg-1s-2

M : masse initiale de l’objet émetteur d’ondes gravitationnelles

Pour le LIGO : M = 62 fois la masse du Soleil = 62x1,99 1030 = 1,2338 1032 kg

ε : efficacité du processus d’émission d’ondes i.e. part de l’énergie transformée en ondes gravitationnelles (ε<1). Pour le LIGO ε = 3/62

δ : durée « efficace » de l’émission des ondes. Pour le LIGO δ ≈ 100 ms

r : distance par rapport à l’émetteur d’ondes. Pour le LIGO r = 1,3 années-lumière = 1,23 1025 m

f : la fréquence de l’onde gravitationnelle. Valeur moyenne pour le LIGO f ≈ 100 Hz

Avec ces valeurs on trouve une amplitude de déformation :

*h* = 9,44 10-22 ≈ 10-21

La déformation maximum sur une longueur *L* est de l’ordre de :

1. Une année-lumière (al) = 9 461 milliards de kilomètres [↑](#footnote-ref-1)
2. Voir l’encadré en fin d’article [↑](#footnote-ref-2)