

Proposition de sujet de thèse

Bourses Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 2023-2024

Bruits d'origine acoustiques et vibratoires dans le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo : bruits techniques, bruit newtonien et instabilités paramétriques

Encadrement : S. Terrien (CR CNRS, codir.), F. Gautier (Pr., dir.), M. Barsuglia (DR CNRS, codir.)

Cotutelle de thèse : laboratoire APC, AstroParticules et Cosmologie, UMR CNRS

Equipe LAUM : Guide & Structures, OR Vibroacoustique

Contexte : Avec les premières détections d'ondes gravitationnelles effectuées par les détecteurs LIGO et Virgo, en 2015, l'astronomie gravitationnelle est aujourd'hui une réalité (Fig.1a,b,c). Le détecteur Virgo (Pise, Italie) est un grand instrument de recherche, fédérant un réseau de laboratoires européens dans tous les domaines de la physique. Cet interféromètre (2 bras de 3km, laser 150kW dans les bras kilométriques, sensibilité $\Delta L/L \cong 10^{-21}$) est développé depuis 1994 et sera amélioré dans la décennie à venir avec les projets Advanced Virgo+, Virgo_nEXT et Einstein Telescope (ET).

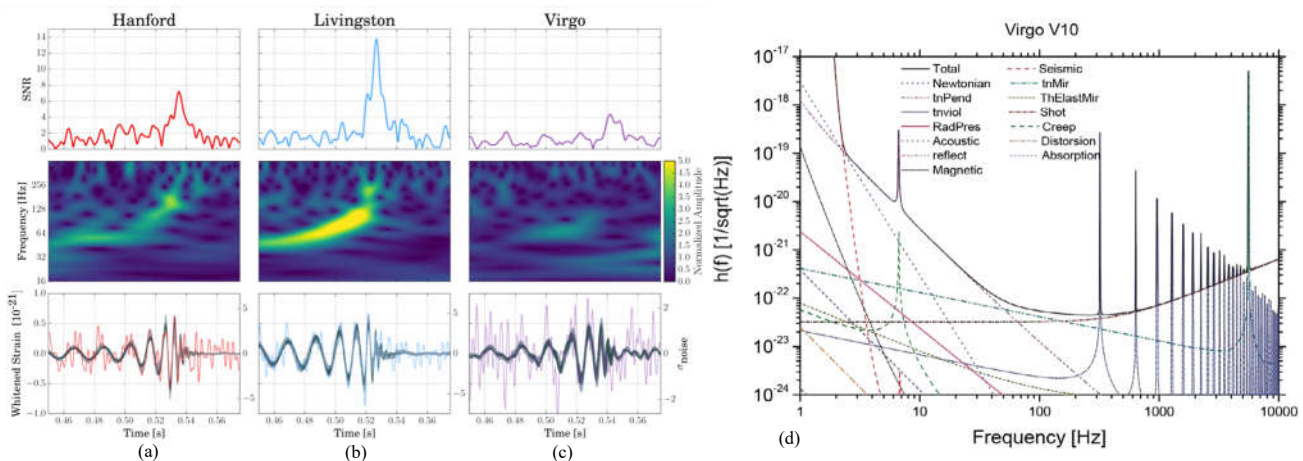


Fig. 1. (a), (b), (c) : première onde gravitationnelle détectée par LIGO Hanford (a), LIGO Livingston (b), Virgo (c), évènement GW170814, 14 Aout 2017. (d) : origine des bruits contribuant à limiter la sensibilité (déformation mesurable $\Delta L/L$) de Virgo [1].

Objectifs : La sensibilité exceptionnelle de l'instrument implique une analyse, une hiérarchisation (Fig. 1d) et une maîtrise des bruits fondamentaux (bruit quantique, bruit de gradient de gravité, bruit thermique...), environnementaux (sismique, météorologique, ...) et techniques (pompes, systèmes de ventilation, équipements électriques). Réduire le plancher de bruit du détecteur d'un facteur α permet d'augmenter la probabilité de détection d'un facteur α^3 . Dans ce contexte, l'acoustique et les vibrations jouent un rôle majeur; deux axes de travail, associés à la vibroacoustique ont été identifiés:

- **Les bruits techniques et le bruit newtonien** (ou bruit de gradient de gravité [4]) sont deux types de bruit, très limitant en basses fréquences, dont l'analyse est essentielle.
- **Les instabilités paramétriques** résultent de couplages opto-mécaniques entre les vibrations du miroir [50-150] kHz et les modes d'ordre supérieur du faisceau optique [2, 3]. La compréhension des conditions d'apparition de ces régimes auto-oscillants est essentielle du fait de l'augmentation des puissances laser prévue dans les détecteurs futurs.

Le travail de thèse est envisagé dans le cadre d'une cotutelle avec le laboratoire APC (Paris), dont une équipe est responsable du développement de Virgo en France.

Actions de recherche : deux axes de travail sont identifiés. Le premier concerne l'analyse des bruits techniques et newtonien ([10-100]Hz). Le second concerne les instabilités paramétriques, [50-150] kHz.

Axe 1 : bruits techniques et newtonien

Sources vibroacoustiques : Un inventaire et une hiérarchisation de l'ensemble des sources techniques responsables des vibrations des hublots et des miroirs, à l'origine du bruit de lumière diffusée est un préliminaire nécessaire à la catégorisation des différentes classes de bruits vibroacoustiques. De multiples équipements électriques (machines tournantes) sont concernés. Il est en particulier établi que le système de conditionnement d'air (HVAC), nécessaire au fonctionnement, est responsable de pulsations de pression à basses fréquences engendrant un bruit remarqué sur la courbe de sensibilité.

Analyse des voies de transfert : l'analyse des voies de transfert d'origines solidienne et aérienne (*Transfer Path Analysis*, [5]) peut être effectuée au moyen de simulations numériques, de corrélations entre signaux mesurés in situ, intégrant par exemple des l'effets de bruits injectés. Cette analyse peut être associée à des techniques d'identification de sources vibroacoustiques équivalentes à un équipement (méthodes inverses de reconstruction d'efforts telles que RIFF par exemple). Ces analyses doivent déboucher sur des préconisations permettant de réduire les nuisances engendrées par voie solidienne (isolation vibratoire) et par voie aérienne (traitements en parois, de systèmes anti-pulsatoires basés sur l'utilisation de résonateurs), utiles tant à Virgo qu'au cahier des charges d'Einstein Telescope.

Bruit de gradient de gravité : Les oscillations acoustiques et vibratoires dans les cavités et le sol situés à proximité du détecteur engendrent des micro-fluctuations du champ de gravité, dans la plage basses fréquences. Ce bruit newtonien joue un rôle important en basses fréquences. Un objectif est d'estimer ce bruit newtonien à partir d'une modélisation numérique de l'environnement vibroacoustique de l'instrument et de mesures acoustiques in situ.

Axe 2 : analyse des instabilités paramétriques opto-mécaniques du miroir

Instabilités opto-mécaniques : Virgo est le siège d'instabilités paramétriques, engendrées par couplage opto-mécanique. Ces instabilités résultent de la pression de radiation appliquée sur le miroir, générant un couplage entre un mode vibratoire et un mode transverse du faisceau optique. Le gain de cette instabilité dépend de multiples paramètres : facteurs de qualité des modes mécanique et optique, puissance optique du faisceau, étendue de la zone de contact, coïncidence fréquentielle entre modes. Les modélisations existantes peuvent être enrichies, notamment en exploitant des analogies avec le fonctionnement des instruments de musique, étudiés au LAUM. Des mesures vibrométriques sur les miroirs in situ sont envisagées pour effectuer des analyses modales expérimentales inédites.

Conception d'un analogue acoustique : un analogue acoustique, tirant partie de la similarité existant entre les modes d'ordre supérieur d'un faisceau gaussien optique et d'un faisceau ultrasonore est envisagé pour imiter et analyser avec des moyens réduits l'instabilité paramétrique (système d'ondes stationnaire auto oscillant interagissant avec une terminaison résonante (membrane)).

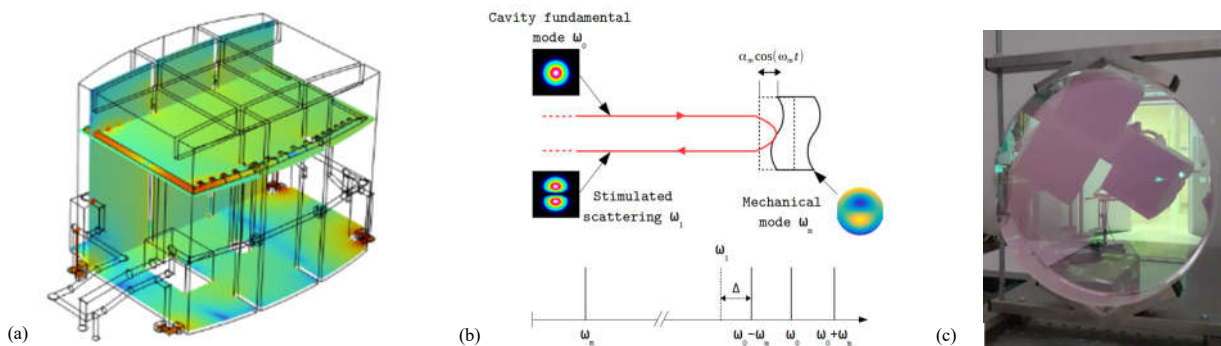


Fig. 2 : (a) simulation du champ de pression acoustique dans le hall expérimental NEB (Virgo) résultant du fonctionnement du système de climatisation (travail de stage de L. Maurin, EGO-ENSIM, Avr.-Sept. 2023). (b) couplage optomécanique entre miroir et faisceau, (c) miroir Virgo, installé sur la plateforme de vibrométrie 3Dvib, LAUM-ENSIM (stage M. Guyot, LAUM, mai-juil.2023).

[1] A. Chiummo, *Gw interferometric detectors, seismic noise and diffused light* - vir-0013a-19, 2019.
 [2] V.B. Braginsky et al., *Parametric instability in Fabry-Perot interferometer*, Physics Letters A, Volume 287, Issues 5-6, 2001, Pages 331-338
 [2] S. Biscans, *Optimization of the LIGO gravitational-wave detectors - parametric instabilities and environmental impacts*, PhD, Le Mans Univ., 2018
 [3] D. Cohen et al., *Optomechanical parametric instabilities simulation in Advanced Virgo*, Applied Optics Vol. 60, Issue 27, pp. 8540-8549 (2021).
 [4] D. Fiorucci et al., *Impact of infrasound atmospheric noise on gravity detectors*, Phys. Rev. D 97, 062003, 2018
 [5] M. V. van der Seijs et al., *General framework for transfer path analysis*. Mec. Systems and Signal processing 68-69 (2016) 217-244.