

Recherche de coalescences binaires - Etalonnage du détecteur d'ondes gravitationnelles VIRGO

Fabrice BEAUVILLE
LAPP, Annecy-le-vieux



Résumé

Ce compte-rendu présente la préparation en cours de l'analyse des données du détecteur d'ondes gravitationnelles VIRGO pour la recherche de coalescences binaires, et plus particulièrement de l'étalonnage du détecteur pour la reconstruction des données et de la recherche de signal.

14.1 Introduction

Le détecteur VIRGO [1] est un interféromètre aux bras de 3 km ayant pour but la détection interférométrique des ondes gravitationnelles émises par des événements astrophysiques violents; les coalescences binaires sont des sources très prometteuses pour une première détection. Marquant la fin de la vie d'un système binaire d'objets compacts (étoiles à neutrons, trous noirs), la coalescence de ce système s'achève sur une phase spirale durant laquelle l'émission d'onde gravitationnelle s'amplifie et atteint les fréquences audibles par VIRGO; le signal émis alors, calculé par différents modèles théoriques, voit sa fréquence et son amplitude augmenter jusqu'à la collision des deux objets.

Pour la recherche d'un tel signal, la mise en forme des données du détecteur nécessite une connaissance précise de sa réponse à un signal d'ondes gravitationnelles donné: l'étude de cette réponse [2], commencée récemment avec le début du commissioning du détecteur, sera décrite dans la première partie. L'extraction d'un signal potentiel dans le bruit du détecteur se fait ensuite à l'aide d'un grand nombre de filtres appliquée aux données reconstruites: la deuxième partie présente l'étude en cours d'une méthode de filtrage par bande de fréquence [3], qui vise à dépasser les limitations liées à l'importance des moyens de calcul nécessaires pour appliquer tous ces filtres.

14.2 Calibration

14.2.1 Principe

L'interaction d'une onde gravitationnelle avec l'interféromètre VIRGO se manifeste par une variation au cours du temps de la longueur relative des bras, donc comme un déplacement en mètres. Ce déplacement est détecté sous la forme d'un déphasage, après recombinaison des faisceaux provenant des deux bras, par les photodiodes du système de détection. La relation entre le déplacement engendré par une onde gravitationnelle

et le signal observé sur les photodiodes constitue la réponse du détecteur, elle doit être connue pour reconstruire le déplacement en mètres à partir du signal de photodiode en Watts. Cette réponse se décompose en 2 parties principales:

D'une part, le déplacement engendré par l'onde gravitationnelle est fortement atténué par le système de contrôle qui applique des forces magnétiques aux miroirs pour maintenir l'interféromètre en condition d'interférence destructive. Cette atténuation se ressent sur des déplacements allant jusqu'à 300 Hz, le système de contrôle ne pouvant agir au-delà.

D'autre part, ce déplacement est intégré sur les nombreux allers-retours de la lumière dans les bras de l'interféromètre constitués de cavité Fabry-Perot. Entre le déplacement et le signal de photodiode on trouve donc, outre le gain en Watts / mètres, une coupure des hautes fréquences, attendue au-dessus d'environ 500 Hz.

Le But de la procédure d'étalonnage actuellement mise en place est d'étudier ces deux parties, en effectuant des prises de données durant lesquelles des signaux de déplacement sont injectés dans l'interféromètre

14.2.2 Injection de signaux de calibration dans l'interféromètre

Pour caractériser la réponse du détecteur on cherche à introduire un déplacement des miroirs connu.

Une première méthode consiste à utiliser les actionneurs du système de contrôle, qui sont des bobines agissant sur des aimants situés sur les miroirs. Cette méthode a pu être testée pour étalonner la cavité Nord lors du commissioning run C1, prise de données qui s'est déroulée du 14 au 17 novembre 2003; 2 périodes d'une heure au début et la fin du run ont été réservées à l'injection de différents signaux de calibration tel que du bruit quasi-blanc dans les zones de fréquences de la réponse optique et des effets du système de contrôle, ou des raies à fréquence fixes.

L'inconvénient de cette méthode réside dans la complexité de la réponse des actionneurs - notamment des bobines - qui entraîne une incertitude sur la forme des signaux de calibration réellement injectés. C'est pourquoi une autre méthode, utilisant la pression de radiation d'un laser sur le miroir pour le mettre en mouvement, sera utilisé dès que la sensibilité du détecteur sera suffisante pour voir ces signaux de calibration. Ce calibrateur optique (fig 14.1), installé sur le bras nord en juin 2003, est prêt pour l'utilisation.

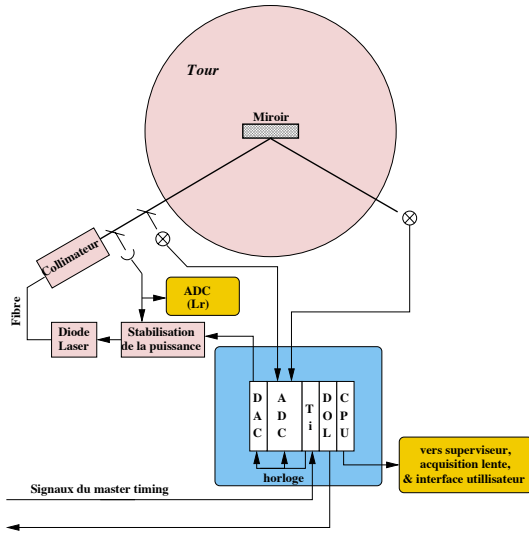


FIG. 14.1 – Configuration du calibrateur optique

14.2.3 Analyse

Les données d'étalonnage sont ensuite analysées. Pour cela, les deux parties de la réponse du détecteur sont représentées sous la forme de fonctions de transfert i.e. un gain et une phase pour chaque fréquence. Ces fonctions de transfert sont mesurées et intégrées sur la durée des injections de signaux correspondantes, puis un ajustement (fig 14.2) est réalisé dans la zone de fréquence où le signal de calibration domine le bruit naturel du détecteur ; ces ajustements sont utilisés pour extrapoler les fonctions de transfert à toute la bande du détecteur.

Les fonctions de transfert ainsi obtenues permettent, après inversion, de transformer le signal de photodiode en un signal de déplacement en mètres déconvolué des effets du système de contrôle. En appliquant ces fonctions au spectre de bruit du signal de photodiode on obtient la courbe de sensibilité du détecteur (fig 14.3).

Une fois les données du détecteur reconstruites, une dernière étape de la mise en forme consiste à soustraire les lignes principales présentes dans le spectre telles que les harmoniques de 50 Hz introduites par l'alimentation électrique. Ces lignes contribuent en effet fortement au bruit du détecteur, et posent de nombreux problèmes de dynamique ou de battements entre lignes pour la recherche d'événements. La méthode de soustraction consiste à utiliser un canal externe de mesure de la source de bruit ; afin de ne pas réintroduire le bruit du canal externe la ligne est analysée sur ce canal puis reconstruite ainsi que ses harmoniques. Les lignes reconstruites sont alors soustraites après estimation du coefficient de couplage ; une forte réduction du RMS est observée sur le signal (fig 14.4)

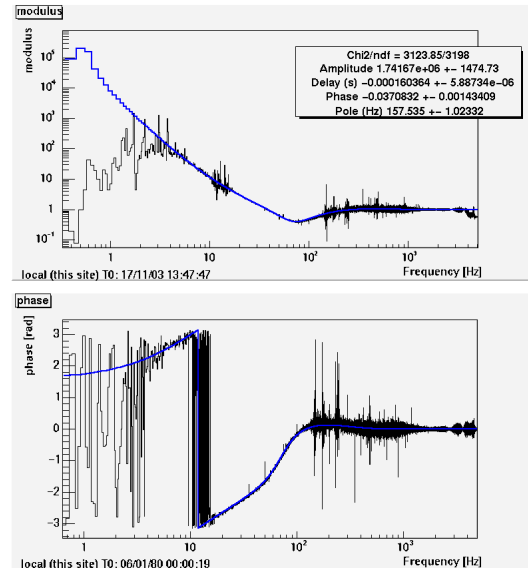


FIG. 14.2 – Ajustement de l'amplitude et de la phase de la fonction de transfert du système de contrôle

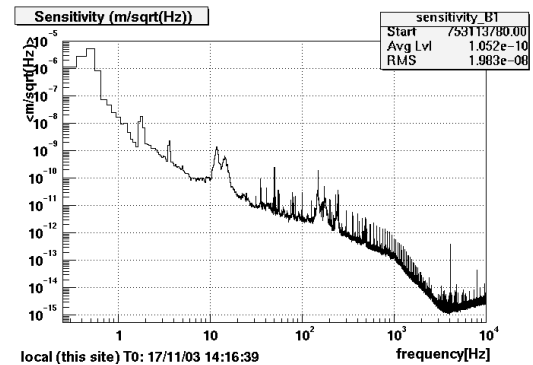


FIG. 14.3 – Courbe de sensibilité du run C1

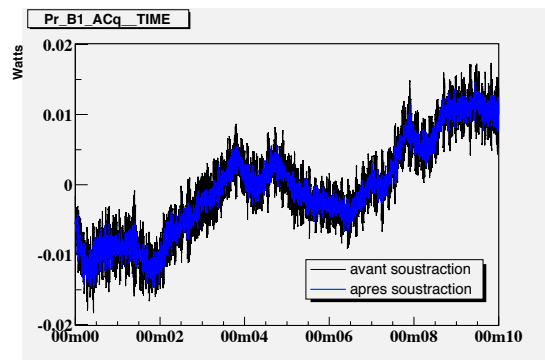


FIG. 14.4 – Signal de sortie de virgo avant (en noir) et après (en bleu) la soustraction des principales lignes

14.3 Recherche de signaux

14.3.1 La méthode multi-bandes

Une fois les données mise en forme la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles s'effectue. Le signal

d'ondes gravitationnelles émis par la coalescence d'un système binaire pouvant être calculé (par approximations), la méthode optimale classique pour son extraction du bruit consiste à calculer à chaque instant la corrélation du signal théorique et du signal expérimental, pondérée dans l'espace des fréquences par le spectre de bruit du détecteur, pour comparer ensuite le résultat de cette corrélation à un seuil de déclenchement prédéfini. La forme du signal théorique dépend cependant des masses m_1 et m_2 a priori inconnues du système binaire ; l'analyse doit donc être répétée en parallèle pour une grille de couple de masses suffisamment fine pour ne pas perdre d'événements. Les moyens de calcul nécessaire à l'analyse en temps réel sont alors très importants (estimés à 300 GFlops), et limitent la possibilité de tester plusieurs modèles de signaux ou de tenir compte de paramètres négligés en première approximation telles que le spin des deux objets ou l'excentricité de leur orbite relative.

Une méthode alternative permettant de réduire ces limitations sans altérer les résultats consiste à séparer l'analyse en deux ou trois bandes de fréquences puis à re-combiner les sorties des analyses pour obtenir des résultats sur la bande totale du détecteur. La réduction du nombre de signaux théoriques ("calques") et l'abaissement de la fréquence d'échantillonnage nécessaire à l'analyse des bandes basses fréquences laissent attendre une amélioration d'un facteur 10 à 100. L'étude et la mise au point de cette méthode multi-bandes a donc commencé en prévision des futures prises de données scientifiques de VIRGO.

14.3.2 Test de la méthode

La méthode multi-bandes a pu être mise au point et validé durant les Mock Data Challenges VIRGO (MDC), épreuves de trois jours réunissant plusieurs groupes et méthodes d'analyse dans le but de retrouver des événements injectés dans des données simulées. Trois MDC ont eu lieu pour l'instant, dont les apports ont été multiples.

D'une part les MDC ont déclenché le travail d'intégration du code et la mise en place des outils nécessaires à l'analyse des résultats. Le premier a notamment montré la nécessité d'un module supplémentaire à la machinerie de filtrage pour reconstituer les événements à partir des nombreux micro-événements étalés dans le temps détectés par chaque corrélateur de la grille. Un critère pertinent a pu être trouvé pour ce regroupement et le module a pu être mis en place et utilisé pour les autres MDCs.

La méthode multi-bandes a été validée par la comparaison des résultats obtenus sur les MDCs avec ceux de l'analyse usuelle (simple bande). Les listes d'événements détectés ont toujours été trouvées identiques, aucune dégradation du rapport signal/bruit n'est observé entre l'analyse usuelle et l'analyse multi-bandes (fig 14.5)

Enfin la comparaison entre les événements simulés et les événements détectés a permis de déceler une dégradation du rapport signal / bruit (SNR) de près de 30

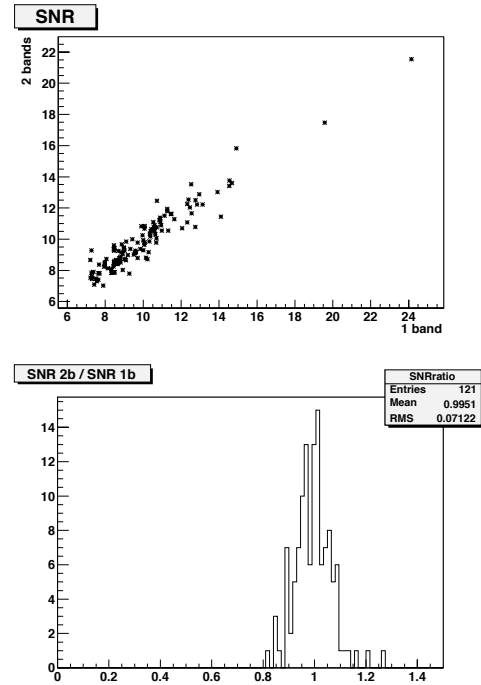


FIG. 14.5 – En haut : Rapports signal/bruit (SNR) des événements dans l'analyse 2 bandes (axe des y) contre l'analyse usuelle (axe des x). En bas : Distribution du rapport des SNRs de l'analyse 2 bandes sur ceux de l'analyse usuelle

% par rapport au SNR optimal théorique. Différentes causes possibles de diminution du signal ont été étudiées tel qu'une erreur dans le calcul de la grille, une mauvaise mesure par manque de statistiques du spectre de bruit du détecteur ou des RMS des filtres, ou encore une fréquence de démarrage de l'analyse trop élevée.

L'essentiel des pertes de signal a finalement été attribué à l'utilisation pour l'analyse d'un modèle de calcul du signal différent de celui utilisé dans la simulation. Le taux de perte de signal inférieur à 5% lié à la finesse de la grille a pu être retrouvé en re-simulant des données avec le modèle utilisé par l'analyse (fig 14.6). La mise à jour de cette sensibilité de l'analyse au modèle de signal confirme la nécessité d'utiliser plusieurs modèles différents pour l'analyse : l'intégration à l'analyse multi-bandes des différents modèles existant est en cours actuellement.

14.4 Perspectives

Au fur et à mesure de l'évolution de VIRGO vers le détecteur final auront lieu d'autres commissioning runs, avec à chaque fois l'étude de la réponse du détecteur et le calcul des nouvelles courbes de sensibilité. L'étape de suivi de la réponse au cours du temps et de reconstruction des données sera mise en oeuvre sur les données de ces runs dès que le détecteur sera suffisamment stable.

Pour la recherche de coalescences et l'analyse multi-bandes, une étude sur l'utilisation de plusieurs modèles

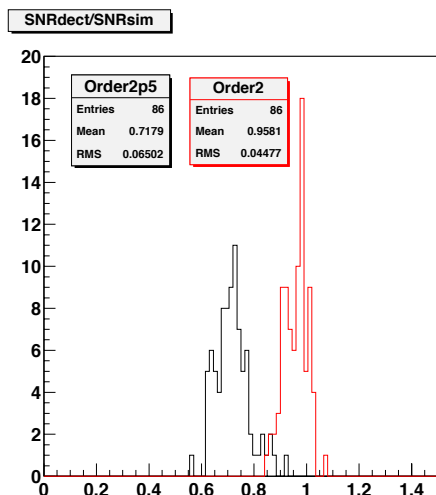


FIG. 14.6 – Distribution de la perte de SNR par rapport au SNR optimal de l'évènement : pour le MDC (en noir) et pour une simulation utilisant le meme modèle de signal que l'analyse (en rouge)

de signal devra être complétée. L'analyse pourra être appliquée aux vraies données sortant du détecteur pendant le commissioning, notamment pour étudier les effets de la reconstruction et de la soustraction de ligne ainsi que pour étudier les vetos instrumentaux empêchant la pollution de l'analyse par les bruits techniques de l'interféromètre. Enfin, une caractérisation complète de l'analyse multi-bandes - efficacité, pureté, gain en moyens de calcul - pourra être envisagé avec un détecteur atteignant une sensibilité proche de celle du détecteur final

Idéalement, l'ensemble de la chaîne d'analyse présentée ici devra être prêt pour l'automne 2004, date possible de la première prise de données scientifique

Remerciements

Outre les organisateurs et coordinateurs des JJC, je remercie Benoit Mours et Frederique Marion pour la relecture de ce document.

Références

- [1] <http://www.virgo.infn.it>
- [2] VIRGO Collaboration, O.Véziant et al, *Class. Quant. Grav.* **20** 17 (2003) 711 *Calibration of the VIRGO central interferometer.*
- [3] F.Marion et al, à paraître dans les actes des Rencontres de Moriond 2003, *Gravitational Waves and Experimental Gravity Multi-band search of coalescing binaries applied to Virgo CITF data.*