

LES GROUPES
EXPÉRIMENTAUX

L'univers comme
laboratoire

VIRGO : À LA RECHERCHE D'ONDES GRAVITATIONNELLES

FIGURE 1

Vue aérienne du détecteur
Virgo (Cascina, Italie).



L'expérience Virgo a pour objectif la détection des ondes gravitationnelles émises par des sources astrophysiques, d'une part pour apporter une preuve expérimentale directe de leur existence et vérifier leurs propriétés, d'autre part pour ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers en exploitant ce nouvel outil pour l'astrophysique et la cosmologie. Le détecteur est un interféromètre de trois kilomètres de long, construit en Italie à Cascina, près de Pise, et conçu pour mesurer les infimes variations de distance entre ses miroirs suspendus induites par le passage d'une onde gravitationnelle (voir figure 1).

INTRODUCTION

Ces dernières années ont été marquées par le passage à la configuration Virgo+ du détecteur et les prises de données associées (deuxième, troisième et quatrième runs scientifiques), ainsi que l'approbation et le début de la construction d'Advanced Virgo, étape suivante de l'expérience mettant en œuvre un instrument de deuxième génération à la sensibilité accrue.

COLLABORATION

La collaboration Virgo compte début 2013 17 laboratoires de 5 pays européens. Outre le LAPP, les laboratoires français sont : LAL/ESPCI (Orsay/Paris), LKB (Paris), LMA (Lyon), APC (Paris), OCA (Nice). La collaboration Virgo est par ailleurs liée à la LSC (LIGO Scientific Collaboration) par un accord conclu en 2007.

L'ÉQUIPE DU LAPP

PHYSICIENS

D. Buskulic, R. Gouaty,
F. Marion, B. Mours, L. Rolland,
E. Tournefier, D. Verkindt,
M. Yvert

POST-DOCS

A. Dietz, L. Di Gallo,
M. Bebronne, R. Bonnand

DOCTORANT

T. Accadia

EQUIPE TECHNIQUE

A. Belletoile, T. Bouedo,
A. Dalmaz, S. Deprez,
L. Giacobone, R. Hermel,
G. Le Corre, N. Letendre,
B. Lieunard, A. Masserot,
T. Mingam, P. Mugnier,
E. Pacaud, A. Paixao, S. Petit,
J. Tassan

STAGIAIRES

Ingénieur (1), L3 (1), M2 (1)

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Virgo+

L'évolution du détecteur vers la configuration Virgo+ s'est faite en plusieurs étapes : une première étape (concrétisée par la deuxième prise de données scientifiques VSR2 – juillet 2009 à janvier 2010), caractérisée par une augmentation de la puissance du laser associée à la mise en œuvre d'un système de compensation thermique ainsi qu'un effort de réduction de la lumière diffusée ; une deuxième étape (concrétisée par la troisième prise de données scientifiques VSR3 – août à octobre 2010), caractérisée par le remplacement du dispositif de suspension des miroirs des cavités par des suspensions monolithiques, associé à l'installation de nouveaux miroirs augmentant la finesse des cavités Fabry-Perot ; une troisième étape (concrétisée par la quatrième prise de données scientifiques VSR4 – mai à septembre 2011), caractérisée par la mise en œuvre d'un dispositif permettant d'adapter le rayon de courbure des miroirs d'extrémité des cavités Fabry-Perot.

Le groupe a été impliqué dans la mise au point et la compréhension du détecteur tout au long de cette phase, notamment

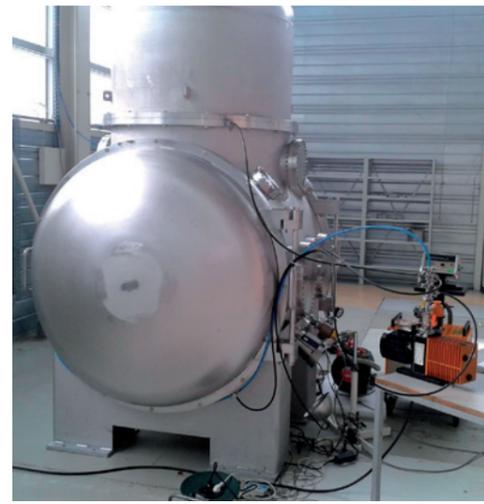


FIGURE 2

Deux réalisations mécaniques du LAPP pour Advanced Virgo : le robot destiné au traitement correctif des miroirs et une des enceintes à vide destinées à accueillir des bancs optiques suspendus.

au niveau de l'adaptation du système de détection, la recherche d'un point de fonctionnement optimal pour l'interféromètre et l'analyse des différentes sources de bruit définissant la courbe de sensibilité de l'instrument.

Au niveau technique, la période a vu la fin du déploiement de l'électronique développée par le groupe pour Virgo+ et du software associé. Elle a également été consacrée au choix de nouvelles caméras numériques pour l'imagerie des faisceaux, au développement d'une carte électronique d'alimentation et de synchronisation de ces caméras (CameraBox) et au développement d'un logiciel d'acquisition, de transmission et d'affichage des données d'imagerie (Telescreen). Le groupe a en charge l'étalonnage du détecteur et la reconstruction de données calibrées pour les analyses de physique. Cette activité s'est poursuivie pour les trois dernières prises de données scientifiques et a fait l'objet de publications. Elle a notamment inclus une amélioration du dispositif d'étalonnage auxiliaire basé sur la pression de radiation d'un laser et son exploitation systématique pour valider la reconstruction des données. Cette activité a fait l'objet de la thèse de T. Accadia, soutenue en novembre 2012.

Advanced Virgo

Le groupe s'est impliqué activement dans l'effort de la collaboration pour amener à maturité le projet Advanced Virgo. Approuvé fin 2009 suite à la publication du document Advanced Virgo Baseline De-

sign, le projet a depuis considérablement progressé, avec la publication en avril 2012 du Advanced Virgo Technical Design Report et l'entrée de plain-pied dans la phase de construction. Le groupe du LAPP a en charge de nombreuses responsabilités pour la réalisation de ce détecteur de deuxième génération, sur lesquelles l'activité du groupe s'est progressivement focalisée ces dernières années :

- Conception et réalisation d'un robot pour le traitement correctif des miroirs

En partenariat avec le laboratoire des matériaux avancés (LMA, Villeurbanne), le LAPP a conçu et réalisé ce robot (voir figure 2) appelé à fonctionner sous vide et destiné à manipuler et positionner précisément les miroirs d'Advanced Virgo lors de la procédure de traitement correctif visant à améliorer la planéité des surfaces réfléchissantes qui a un impact direct sur la sensibilité de l'interféromètre. Le robot a été installé au LMA à l'été 2011 et depuis testé avec succès.

- Conception et réalisation d'enceintes à vide

Le groupe est en charge de concevoir et réaliser cinq enceintes destinées à accueillir des bancs optiques suspendus sous vide afin de les isoler des perturbations sismiques et acoustiques. Les deux premières ont été réalisées en 2012 (voir figure 2).

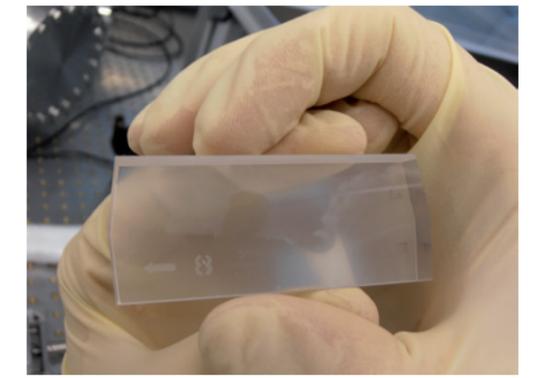
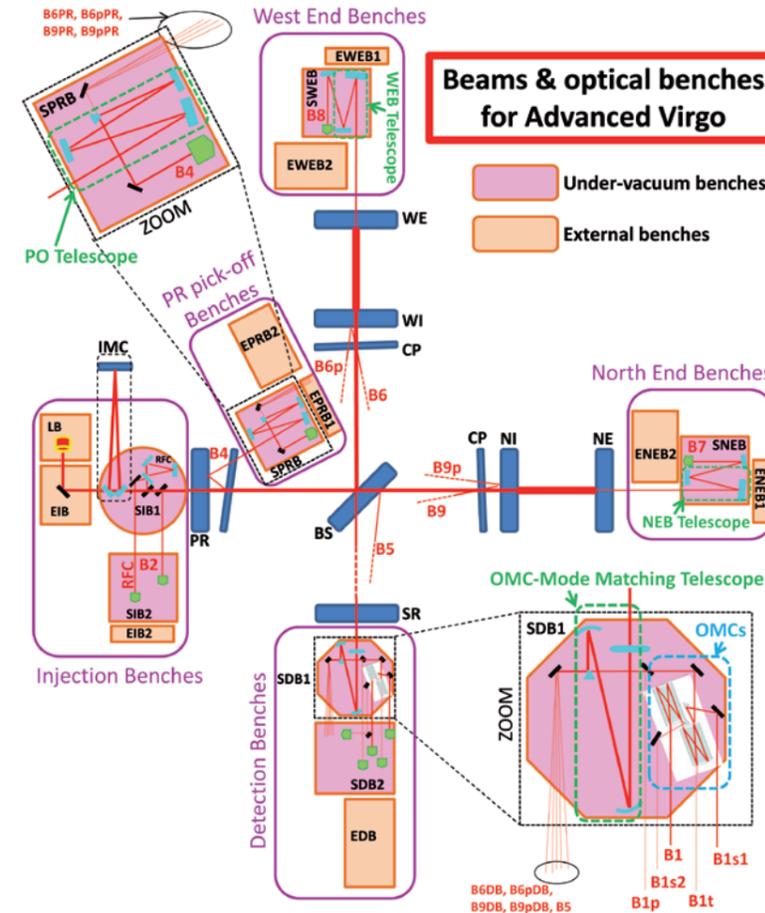


FIGURE 3

Schéma des différents bancs optiques constituant le système de détection d'Advanced Virgo, et diverses réalisations du LAPP liées à ce système : prototype de cavité mode-cleaner, prototypes de compartiments étanches pour les photodiodes et les caméras numériques.

- Conception et réalisation d'une grande partie du système de détection

Le groupe du LAPP a en charge la coordination et doit fournir la majorité des éléments de ce sous-système qui est plus complexe que dans le détecteur initial, avec davantage de bancs optiques, dont une fraction plus importante sous vide. Le design a par ailleurs dû être adapté au mode de détection homodyne choisi pour Advanced Virgo, et aux nouvelles fréquences de modulation. Les années passées ont été consacrées à la phase de conception, aujourd'hui essentiellement achevée, et à de la R&D qui se poursuit aujourd'hui en parallèle avec le début de la construction (voir figure 3).

- Les plans décrivant les éléments optiques des différents bancs ont été dessinés.
- La conception mécanique des bancs a été initiée ; aux contraintes mécaniques usuelles s'ajoutent des contraintes de dissipation thermique pour évacuer correctement

la chaleur émise par l'électronique placée dans des compartiments étanches sous les bancs.

- Les nouvelles photodiodes, destinées aux signaux auxiliaires nécessaires au contrôle de l'interféromètre ou à la détection du signal principal, ont été sélectionnées et achetées pour les premières. Un prototype de la chaîne d'électronique bas bruit pour la lecture et la pré-amplification a été développé pour la voie radiofréquence. Les photodiodes et les caméras numériques destinées à des bancs sous vide doivent être installées dans des compartiments étanches dont des prototypes ont été conçus et réalisés.
- Une nouvelle électronique de démodulation a été développée pour s'adapter aux fréquences de démodulation différentes et plus nombreuses. La démodulation a évolué d'un mode analogique (Virgo initial) à un mode numérique pour

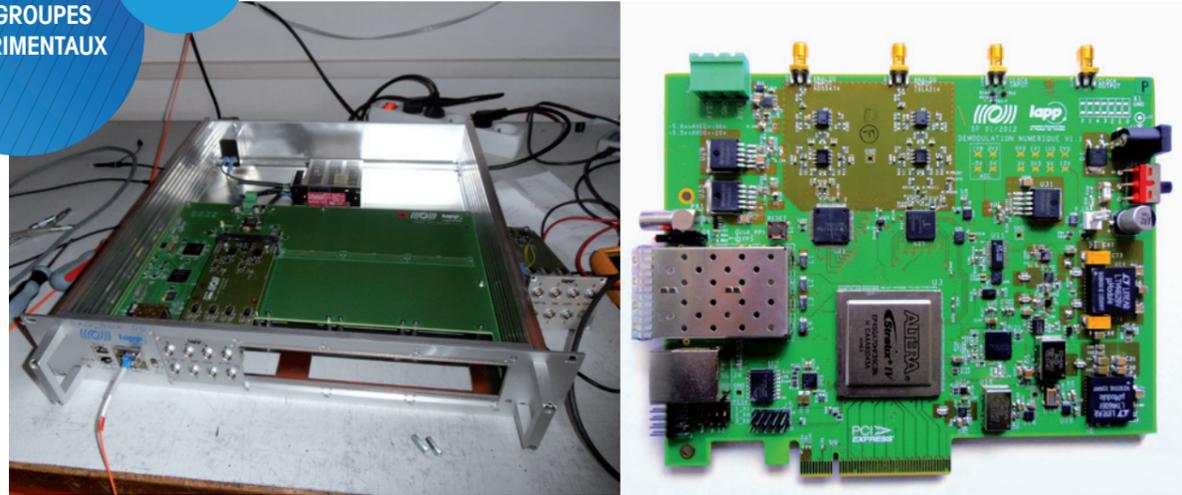


FIGURE 4

Réalisations électroniques du LAPP pour Advanced Virgo : carte générique DAQ-Box, mezzanine de démodulation numérique, mezzanine DAC, carte pour les caméras numériques.

Advanced Virgo ; un prototype a été développé et validé.

- La cavité de filtrage mode-cleaner destinée à éliminer les imperfections du faisceau principal avant la mesure de la puissance lumineuse a dû, elle aussi, être repensée pour s'adapter aux nouvelles contraintes de l'interféromètre. Faisant suite à l'étude de plusieurs prototypes, le design a été finalisé et repose sur deux cavités de type nœud papillon en série. Le design s'est notamment attaché à minimiser le bruit thermo-réfractif introduit par les cavités. Un prototype final a été produit.

- Conception et réalisation de la majeure partie du système d'acquisition des données

Les développements (électronique numérique et software) pour ce sous-système s'inscrivent dans la continuité de l'évolution entamée pour Virgo+ (voir figure 4).

- Une carte générique (DAQ-Box) a été développée dans le but d'accueillir diverses cartes mezzanines aux fonctions spécifiques (ADC, DAC, démodulation numérique, alimentation et contrôle des photodiodes, alimentation et contrôle des caméras numériques). La carte mère assure l'alimentation, l'interface avec les réseaux fibres

optiques et ethernet ainsi que des ressources de calcul sur FPGA. Des prototypes ont été développés et testés avec succès.

- Le design de la mezzanine ADC a été réalisé.
- Le design de la mezzanine DAC a été réalisé, ainsi que des prototypes. Les tests qui s'en sont suivis ont mis en évidence un excès de bruit qui a été diagnostiqué et corrigé dans le design final.
- En lien avec les autres sous-systèmes d'Advanced Virgo, la topologie du système d'acquisition des données a été conçue et dimensionnée. L'architecture du réseau a été dessinée et les besoins ont été estimés pour chacun des éléments d'électronique numérique. Les différents flux de données ont été analysés et organisés.
- L'évolution des différents softwares nécessaires à la collection et la sauvegarde des données ainsi qu'au contrôle et au monitoring du détecteur a été initiée. Ces éléments logiciels incluent également des outils de visualisation des données et de monitoring du fonctionnement du détecteur via des pages internet.

Le groupe a également fourni une assistance aux autres laboratoires de la collaboration qui utilisent de l'élec-



tronique développée par le LAPP pour équiper leurs propres bancs de R&D.

Des membres du groupe ont par ailleurs été impliqués, à des degrés divers, dans l'effort de revue des sous-systèmes d'Advanced Virgo, aux différents stades de leur évolution.

Analyses de physique et résultats

Le groupe a participé à la recherche de signaux de coalescences binaires d'astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs) au sein du groupe d'analyse commun à LIGO et Virgo Compact Binary Coalescence (CBC). Il a plus particulièrement contribué à la recherche de sources de masse stellaire (ayant débouché sur des limites supérieures sur les taux d'événements), ainsi qu'aux recherches effectuées en coïncidence avec des sursauts gamma courts. Ces recherches ont fait l'objet de plusieurs publications.

L'analyse du run S6/VSR2-VSR3 a été marquée par l'émergence d'un événement très significatif constituant une possible détection, ce qui a engendré une intense activité dans la collaboration LIGO-Virgo, et donc pour le groupe. Ceci a débouché sur l'écriture d'un projet article, la saisie du Detection Committee interne (comportant deux membres du LAPP), et le vote de la collaboration en faveur de la soumission

de l'article si cet événement n'était pas une injection secrète. La levée du secret a par la suite révélé que cet événement résultait en effet de l'injection d'un signal simulé, réalisée dans le cadre du Blind Injection Challenge, exercice interne à la collaboration destiné à vérifier la capacité à mener à bien une détection.

Le groupe a été particulièrement impliqué dans la caractérisation du détecteur et l'évaluation de la qualité des données pour les recherches de signaux transitoires. Cette activité inclut l'analyse des sources de bruit non stationnaires dans le détecteur ou son environnement limitant de telles recherches, la définition de balises de qualité (pour la plupart produites en ligne) et l'optimisation de leur utilisation sous forme de véto par les analyses de physique. Ce travail a été résumé pour les trois premières prises de données scientifiques dans un long article publié dans Classical and Quantum Gravity en 2012.

Le groupe a par ailleurs été en première ligne dans le projet mis en œuvre pendant les runs S6/VSR2-VSR3, consistant à mener des recherches de signaux transitoires avec une faible latence dans le but d'émettre des alertes à destination de télescopes optiques, X ou radio, pour déclencher un suivi à la recherche de possibles contreparties associées aux sources d'ondes gravitationnelles. Le groupe a eu

en charge la recherche à faible latence de signaux de coalescences binaires de deux étoiles à neutrons ou une étoile à neutrons et un trou noir, réalisée avec le pipeline MBTA développé au LAPP. Cette recherche à faible latence a fait l'objet d'une publication.

Le groupe a depuis œuvré pour faire évoluer ce pipeline en vue de l'analyse des données des détecteurs avancés, et a participé aux deux premiers Engineering Runs (utilisant des données simulées) mis en œuvre par la collaboration LIGO-Virgo pour préparer le futur. Une étude a également été menée pour mieux comprendre la résolution temporelle attendue avec les détecteurs avancés, ce qui est un élément déterminant pour la résolution angulaire accessible au niveau de la localisation des sources dans le ciel.

Le groupe a par ailleurs maintenu une activité reliée à la détection de signaux émis par des pulsars en système binaire.

Einstein Telescope

Le groupe a également une petite implication dans le projet Einstein Telescope pour un futur détecteur de troisième génération et a participé à la Design Study financée par le programme européen FP7.

PUBLICATIONS IMPORTANTES

- [1] *Search for gravitational waves from compact binary coalescence in LIGO and Virgo data from S5 and VSR1*, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Phys. Rev. D82 (2010) 102001
- [2] *Search for gravitational-wave inspiral signals associated with short gamma-ray bursts during LIGO's fifth and Virgo's first science run*, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Astrophys. J. 715 (2010) 1453-1461
- [3] *Virgo calibration and reconstruction of the gravitational wave strain during VSR1*, Virgo collaboration, J. Phys. Conf. Ser. 228 (2010) 012015
- [4] *Calibration and sensitivity of the Virgo detector during its second science run*, Virgo collaboration, T. Accadia et al., Class. Quantum Grav. 28 (2011) 025005
- [5] *Search for gravitational waves from low mass compact binary coalescence in LIGO's sixth science run and Virgo's science runs 2 and 3*, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Phys. Rev D85 (2012) 082002
- [6] *First low-latency LIGO+Virgo search for binary inspirals and their electromagnetic counterparts*, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Astronomy & Astrophysics 541 (2012) A155
- [7] *Virgo data characterization and impact on gravitational wave searches*, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Class. Quantum Grav. 29 (2012) 155002

THÈSE

T. Accadia, *Vérification de la reconstruction du signal d'onde gravitationnelle de Virgo à l'aide d'un dispositif d'étalonnage utilisant la pression de radiation laser*, thèse soutenue le 15 novembre 2012

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

F. Marion, *Status of Virgo and LIGO*, Workshop on Gravitational Waves and High Energy Neutrinos, Paris, France, Mai 2009

R. Gouaty, *Searches for gravitational waves from compact binary coalescences with LIGO and Virgo*, XXI^{èmes} Rencontres de Blois, France, Juin 2009

E. Tournefier, *News from Virgo: present status and future upgrades*, XXI^{èmes} Rencontres de Blois, France, Juin 2009

F. Marion, *Very low latency search for low mass compact binary coalescences in the upcoming LIGO S6 and Virgo VSR2 data*, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, New-York, Etats-Unis, Juin 2009

B. Mours, *La recherche d'ondes gravitationnelles*, Congrès Général de la Société Française de Physique 2009, Palaiseau, France, Juillet 2009

B. Mours, *Report on ET trade studies: science potential and sensitivity*, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, Tokyo, Japon, Mai 2010

B. Mours, *The search for gravitational waves*, Réunion du GDR-PCHE, Marseille, France, Juin 2010

F. Marion, *Searches for gravitational waves from compact binary coalescences with the LIGO and Virgo detectors*, International Conference on Binaries, Mykonos, Grèce, Juin 2010

B. Mours, *Ondes gravitationnelles*, Journées de la SF2A, Marseille, France, Juillet 2010

B. Mours, *What evidence would make a convincing case for the first GW detection claim?* 14th Gravitational Wave Data Analysis Workshop, Rome, Italie, Décembre 2010

F. Marion, *Status and prospects for detecting gravitational waves from compact binary mergers*, Gravitational-wave Physics & Astronomy Workshop, Milwaukee, Etats-Unis, Janvier 2011

R. Gouaty, *Lessons learned with Virgo*, Gravitational Waves Advanced Detectors Workshop, La Biodola, Italie, Mai 2011

B. Mours, *Virgo open data plans*, LIGO open data workshop, Livingston, Etats-Unis, Octobre 2011

B. Mours, *LIGO/Virgo triggers pour des recherches de signaux électromagnétiques*, Journée de prospective « Ondes gravitationnelles et suivi multi-messagers » du PNHE, Toulouse, France, Septembre 2012

POUR EN SAVOIR PLUS

Site de l'expérience Virgo au LAPP :
<http://lapp.in2p3.fr/spip.php?rubrique161>

Site de la collaboration Virgo :
<https://wwwcascina.virgo.infn.it/>