

# Virgo : L'astronomie gravitationnelle

*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 à Cascina in Italia, près de Pise.*

## Introduction

Virgo a pris des données en 2007 lors de son premier run scientifique (VSR1) à une sensibilité proche de la sensibilité nominale du détecteur. Après une année consacrée à des interventions sur le détecteur pour améliorer sa sensibilité et l'amener à la configuration Virgo+, l'expérience est à nouveau en phase de commissioning, avec l'objectif d'entamer une nouvelle prise de données (VSR2) avec une sensibilité accrue à l'été 2009. En parallèle, la collaboration œuvre à la conception finale de l'étape suivante de l'expérience, Advanced Virgo, avec l'objectif d'une approbation mi-2009 ouvrant sur quatre années de construction puis deux ans de commissioning. L'ambition d'Advanced Virgo est de prendre des données à partir de 2015, avec une sensibilité permettant très probablement d'observer de nombreuses sources et d'ouvrir véritablement l'ère de l'astronomie gravitationnelle.

## Points forts

Virgo a franchi une étape importante avec sa première prise de données scientifiques en 2007.

Le groupe du LAPP s'efforce d'être présent sur les différents fronts permettant de faire progresser Virgo : travail en lien avec le détecteur (système de détection, électronique et software, commissioning, amélioration de la sensibilité...) et travail d'analyse de données (calibration, caractérisation de la qualité des données, recherche de coalescences binaires...).



Figure 1 : Vue aérienne du détecteur Virgo.

## La collaboration

La collaboration Virgo compte, début 2009, 16 laboratoires de 5 pays européens. Outre le LAPP, les laboratoires français sont : LAL (Orsay), LMA/ESPCI (Lyon/Paris), APC (Paris), OCA (Nice). La collaboration Virgo est par ailleurs liée à la LSC (LIGO Scientific Collaboration) par un accord conclu début 2007.

## Activités de recherche du groupe du LAPP

Le LAPP a fortement contribué à la construction de Virgo, pour laquelle le groupe a pris en charge la conception et la réalisation des chambres à vide abritant les miroirs, de l'ensemble du système de détection, d'une partie importante du système *online* (timing, acquisition des données, boucles de contrôle temps réel), et du système de calibration. Ceci a naturellement conduit le groupe par la suite à réaliser les upgrades nécessaires pour Virgo+ sur ces différents systèmes, notamment la refonte d'une grande partie de l'électronique et software temps réel et la préparation de l'implantation sous vide des principales photodiodes de la détection. Le groupe est par ailleurs impliqué dans des activités de développement logiciel, de monitoring du détecteur, de commissioning et d'analyse de données, qui sont des activités transversales dans la collaboration.

Outre les charges associées aux systèmes sous la responsabilité du groupe, plusieurs membres de l'équipe ont occupé des postes de responsabilité transversale dans la collaboration lors de la période écoulée : Benoît Mours a été le porte-parole de la collaboration Virgo de mai 2005 à mai 2008. Edwige Tournefier a coordonné la caractérisation optique du détecteur de juillet 2004 à février 2007 et l'ensemble des activités de commissioning de février 2007 à juillet 2008. Alain Masserot coordonne les activités d'électronique et software depuis juillet 2008. Frédérique Marion coordonne le groupe d'analyse « coalescences binaires » depuis juillet 2006.

### Projets techniques

Durant la période écoulée, le groupe a continué à assurer le support, la maintenance et les évolutions des systèmes sous sa responsabilité : système de détection, système *online*, calibration. Il est également impliqué dans la maintenance, le développement et l'utilisation d'un certain nombre d'outils logiciels, notamment pour la visualisation des données et le monitoring du détecteur.

Dans la période ayant précédé le début du run VSR1 (année 2006 et début 2007), le groupe a participé au commissioning du détecteur, et en particulier à sa caractérisation optique ainsi qu'à l'identification et la réduction des sources de bruit

limitant la sensibilité. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs notes techniques et d'une publication, ainsi que de la thèse de Romain Gouaty.

Par ailleurs, plusieurs projets techniques d'envergure ont été menés par le groupe pour améliorer le détecteur en vue de la phase Virgo+ :

- Refonte de l'électronique de timing et de contrôle et du software associé : le but était de remplacer une électronique devenue obsolète tout en diminuant le bruit de la chaîne de lecture et en accroissant le potentiel des boucles de contrôle. Après plusieurs années de R&D, la production des éléments a eu lieu en 2007 et 2008, notamment pour quatre cartes d'électronique spécifiques, conçues et réalisées par le LAPP. L'upgrade a également impliqué le choix et l'achat de nouveaux récepteurs GPS, ainsi que de nouveaux processeurs temps réel. Le déploiement sur le détecteur de cette nouvelle électronique a démarré en 2008, en parallèle avec l'évolution du software associé et est aujourd'hui en grande partie achevé.
- Mise sous vide des photodiodes principales : la motivation de ce changement est d'éliminer le couplage des bruits sismique et acoustique à travers les photodiodes principales du système de détection, et représente également une première étape dans une évolution vers un mode de détection homodyne. L'implémentation des photodiodes dans un caisson étanche destiné à être placé sur le banc de détection suspendu sous vide a été conçue et réalisée et se trouve en phase de test avant de pouvoir être mise en œuvre sur le détecteur.
- Amélioration du calibrateur optique : ces changements nécessaires pour être compatible avec les exigences de Virgo+ ont démarré en 2008 et s'achèveront en 2009.

Le groupe est aussi impliqué dans la conception du détecteur dans sa version future – Advanced Virgo – en particulier en ce qui concerne le système de détection. Le résultat de cet effort de conception est présenté dans le document "Advanced Virgo Preliminary Design" délivré par la collaboration en novembre 2008. Le groupe est par ailleurs engagé dans un travail de R&D concernant une cavité *mode-cleaner* compatible avec un mode de détection homodyne et les

conditions d'Advanced Virgo. Ce travail a fait l'objet d'une note technique.

### Analyse de physique et résultats

Le fait marquant de la période écoulée est naturellement la première prise de données scientifiques de Virgo. Le run VSR1 a eu lieu du 18 mai au 1<sup>er</sup> octobre 2007 et a été caractérisé par un cycle utile de 81 % en *science mode*. L'horizon moyen pour les coalescences binaires d'étoiles à neutrons (distance moyenne à laquelle ces sources sont visibles avec un rapport signal sur bruit de 8) atteint 4 Mpc.

Durant le run, les membres du groupe ont participé à la prise de données et assuré le support à distance pour les systèmes sous notre responsabilité (astreintes *on call*). Ils furent également impliqués dans le monitoring du détecteur, la caractérisation de son fonctionnement et le monitoring de la qualité des données grâce à l'application d'algorithmes en temps réel, dont un algorithme de recherche de coalescences d'étoiles à neutrons.

Le groupe a en charge la calibration de Virgo et, pour mener à bien cette tâche, a développé les méthodes de mesure et d'analyse permettant de caractériser la réponse de l'interféromètre. Celles-ci sont régulièrement appliquées afin de réaliser le suivi de la sensibilité du détecteur dans le domaine fréquentiel. La procédure permettant de reconstruire les données calibrées dans le domaine temporel est également sous la

responsabilité du groupe. Ces travaux ont été particulièrement importants pour VSR1 et ont fait l'objet de plusieurs notes techniques. Une publication est en préparation.

Les membres du groupe ont contribué à la caractérisation des données recueillies, en amont du run VSR1 sur les courtes périodes de prise de données l'ayant précédé, et de manière plus approfondie sur les données de VSR1. Ils ont participé à la définition d'indicateurs de qualité permettant d'identifier les dysfonctionnements de l'appareillage ou des anomalies dans l'environnement du détecteur, et à leur utilisation sous forme de véto par les recherches de signaux physiques.

Au niveau de l'analyse des données, hormis une activité s'attachant à la recherche de signaux continus émis par des étoiles à neutrons en système binaire, la contribution du groupe se focalise sur la recherche de signaux émis lors de la coalescence d'astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs), qui a fait notamment l'objet du travail de thèse de Daniel Grosjean pendant la période écoulée. Le travail de développement autour du pipeline d'analyse MBTA – fondé sur une analyse par bandes de fréquence – s'est poursuivi. Une méthode originale permettant d'améliorer la résolution sur la mesure du temps d'arrivée des signaux de coalescence – ayant un impact sur la capacité à localiser la source par triangulation – a également été développée et a fait l'objet d'une publication.

Un aspect important de l'analyse des données de Virgo est qu'elle est réalisée conjointement avec l'analyse des données de l'expérience analogue LIGO (USA), suite à l'accord de coopération signé début 2007 entre les deux collaborations, incluant un partage total des données à partir du début de VSR1. Cet accord fait suite à un ensemble d'actions communes préparatoires auquel le groupe du LAPP a été associé et qui ont donné lieu à des publications.

C'est donc dans ce cadre commun LIGO-Virgo que s'effectue l'analyse des données de VSR1 (et des données prises en parallèle par LIGO pendant le run S5). Le groupe participe activement aux activités du groupe conjoint CBC (*compact*

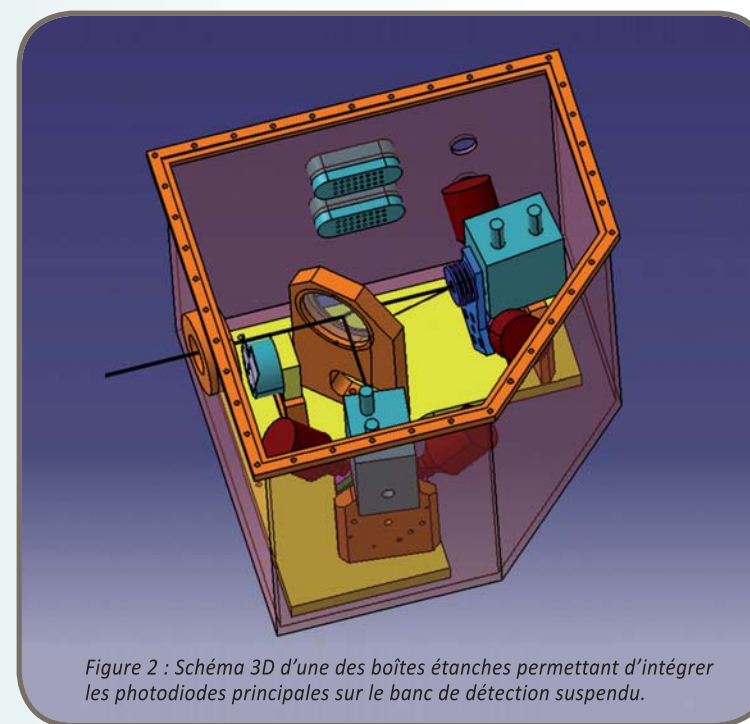


Figure 2 : Schéma 3D d'une des boîtes étanches permettant d'intégrer les photodiodes principales sur le banc de détection suspendu.

*binary coalescence*) et est notamment impliqué dans les recherches de coalescences à basse masse (masse totale de 2 à 35  $M_{\odot}$ ) et haute masse (masse totale de 25 à 100  $M_{\odot}$ ), ainsi que dans la recherche de coalescences associées à des sursauts gamma courts. Ces analyses sont en cours de finalisation et seront publiées en 2009.

## Plan pour 2010-2014

L'ambition du groupe Virgo du LAPP pour la période à venir est de s'investir au maximum pour mener à bien le plan d'upgrades du détecteur, devant conduire à la première détection d'un signal d'onde gravitationnelle par Virgo. Ce plan prévoit une évolution en deux étapes – Virgo+ puis Advanced Virgo – et est contraint dans son planning par la volonté de progresser en parallèle des évolutions de LIGO – enhanced LIGO puis advanced LIGO.

Le détecteur dans sa configuration Virgo+ initiale est actuellement en cours de commissioning. L'objectif est de réduire les sources de bruit de sorte de pouvoir commencer le deuxième run scientifique – VSR2 – à l'été 2009 avec une sensibilité supérieure à celle de Virgo. Un accroissement significatif de la sensibilité est ensuite attendu d'améliorations incrémentales qui seront réalisées lors d'arrêts dédiés pendant le run VSR2. Au total, un facteur d'amélioration de 2 à 3 par rapport à la sensibilité nominale de Virgo est attendu, se traduisant par un gain d'un

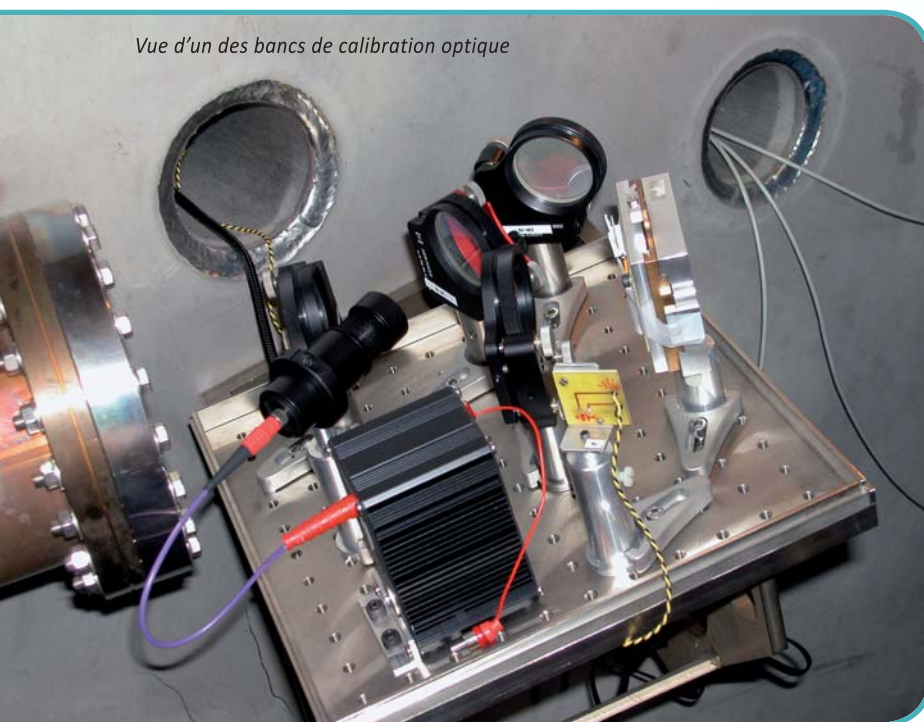
ordre de grandeur sur le volume de l'Univers observable par Virgo, rendant une détection plausible quoique encore très incertaine.

Les intentions du groupe pour Virgo+ sont de continuer à assumer ses responsabilités sur les systèmes dont il a la charge, et notamment d'achever les changements techniques réalisés pour Virgo+ (voir plus haut). Le groupe poursuivra également ses contributions dans le domaine du commissioning, de l'identification des sources de bruit parasites, de la caractérisation du détecteur et de l'analyse des données.

L'étape suivante, Advanced Virgo, représente un saut qualitatif et quantitatif plus important, avec la conception et la construction d'un détecteur en évolution significative par rapport à Virgo, permettant un gain d'un facteur 10 sur la sensibilité, ouvrant donc un volume 1 000 fois plus grand sur l'Univers. Ce gain rendra la détection de signaux d'ondes gravitationnelles très probable, notamment avec un horizon moyen de 150 Mpc pour les coalescences d'étoiles à neutrons. Il est donc crucial que le planning d'Advanced Virgo soit respecté, afin de démarrer la prise de données en phase avec advanced LIGO en 2015.

Dans l'hypothèse favorable d'une approbation d'Advanced Virgo par le CNRS et l'INFN à la mi-2009, assortie d'un financement du projet permettant une construction en quatre ans, le groupe fera tout son possible pour contribuer à la réalisation d'Advanced Virgo dans les délais. Il souhaite prendre en charge des évolutions en lien avec les systèmes traditionnellement sous sa responsabilité, ce qui demandera un effort technique soutenu du laboratoire. Une équipe d'une dizaine de techniciens et ingénieurs est nécessaire pour mener ces projets à bien, exigeant notamment un renfort en électronique analogique.

Dans une perspective à plus long terme, mentionnons également que des membres du groupe participent à la *design study* financée par l'Union Européenne pour le détecteur de troisième génération Einstein Telescope.



Vue d'un des bancs de calibration optique

## Publications importantes

Les membres de groupe sont auteurs des articles publiés par la collaboration Virgo. Parmi ces publications et en plus de celles-ci, on peut distinguer celles auxquelles des membres du groupe ont activement participé :

1. "Improvement in the shot noise of a laser interferometer gravitational wave detector by means of an output mode-cleaner", *Class.Quant.Grav.*23:3235–3250 (2006). F. Beauville et al.
2. "Thermal noise reduction in interferometric gravitational wave antennas: Using high order TEM modes", *Class.Quant.Grav.*23:5777-5784 (2006). B. Mours, E. Tournefier, J.-Y. Vinet.
3. "Improving the timing precision for inspiral signals found by interferometric gravitational wave detectors", *Class. Quantum Grav.* 24 S617–S625 (2007). Virgo Collaboration.
4. "Measurement of the optical parameters of the Virgo interferometer", *Applied Optics*, 46, 17-3466 (2007). Virgo Collaboration.
5. "Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interferometric Detector", *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, vol.55, issue 1 (2008) 225-232. Virgo Collaboration.
6. "Detailed comparison of LIGO and Virgo inspiral pipelines in preparation for a joint search", *Class. Quantum Grav.* 25, 22pp (2008). F. Beauville et al (The joint LIGO/Virgo working group).

## Thèses et Habilitations

Deux doctorants ont soutenu leur thèse durant la période écoulée :

- R. Gouaty « Analyse de la sensibilité du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo » mai 2006.  
D. Grosjean « Aspects de la recherche de coalescences binaires avec le détecteur Virgo » juillet 2007.

Il est à noter que plusieurs physiciens du groupe ont soutenu une habilitation à diriger des recherches pendant la période écoulée : Damir Buskulic (mars 2006), Didier Verkindt (mai 2007), Edwige Tournefier (septembre 2007).

## Présentations dans des conférences

2006 :

B. Mours, "The search for Gravity Waves and the Virgo experiment", Workshop de prospective astroparticules, Amsterdam (Pays-Bas).

B. Mours, "Virgo status and Plan", Workshop de prospective astroparticules, Lausanne (Suisse).

R. Gouaty pour la collaboration Virgo, "Analysis of the Virgo runs sensitivities", *Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2006*, Ile d'Elbe (Italie).

E. Tournefier, "Thermal noise and high order Laguerre-Gauss modes", *Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2006*, Ile d'Elbe (Italie).

S. Karkar pour la collaboration Virgo, "Calibration of the Virgo interferometer", *Rencontres du Vietnam, Challenges in AstroParticle Physics*, Hanoi (Vietnam).

B. Mours, "h(t) reconstruction and validation", *Gravitational Wave Data Analysis Workshop*, Institut Henri Poincaré, Paris (France).

D. Grosjean pour la collaboration Virgo, "Improving the timing accuracy for inspiral signals", Poster, 11<sup>th</sup> *Gravitational Wave Data Analysis Workshop*, Postdam (Allemagne).

2007 :

E. Tournefier pour la collaboration Virgo, "Noise budget and noise hunting in Virgo", *Rencontres de Moriond, Gravitational Waves and Experimental Gravity*, La Thuile (Italie).

D. Verkindt pour la collaboration Virgo, "Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interferometric Detector", *IEEE NPSS Real Time Conference 2007*, Batavia (USA).

F. Marion pour la collaboration Virgo, "Virgo Status", 7<sup>th</sup> *Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves*, Sydney (Australie).

D. Buskulic pour la collaboration Virgo, "Search for Coalescing Binaries Gravitational Waves Signal Associated with GRB070219A Using the Virgo Detector", Poster, 7<sup>th</sup> *Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves*, Sydney (Australie).

E. Tournefier pour la collaboration Virgo, "The status of VIRGO", HEP 2007, Manchester (Royaume-Uni).

E. Tournefier, "Les ondes gravitationnelles : nouveaux messagers du cosmos", Journées de la SFP, Grenoble (France).

2008 :

V. Granata pour la collaboration Virgo, "R&D for DC readout and under vacuum detection optics in Virgo", Gravitational Waves Advanced Detectors Workshop, Ile d'Elbe (Italie).

D. Buskalic, "DéTECTEURS d'ondes gravitationnelles, présent et avenir", Journée de prospective sur les GRB, Marseille (France).

## Séminaires

B. Mours, "Virgo Status and Plans", Albert Einstein Institut à Golm (Allemagne).

F. Marion, Séminaires grand public sur la recherche des ondes gravitationnelles à l'Université Ouverte de l'Université Claude Bernard Lyon I (juin 2006), à Marseille (janvier 2006), Gap (janvier 2006), Lyon (janvier 2008)

F. Marion, "Data analysis: coalescing binaries", Cours à l'école de la VESF (mai 2007 et mai 2008).

D. Verkindt, "A l'écoute des étoiles... Les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles", EduSCOL ENS Lyon (France).

D. Buskalic, "Etat et perspectives de la détection d'ondes gravitationnelles dans le monde", Ecole de Physique des Astroparticules, OHP (France).

E. Tournefier, "La recherche d'ondes gravitationnelles : Virgo et ses sœurs", LPNHE Paris (France).

E. Tournefier, "La détection d'ondes gravitationnelles et l'interféromètre Virgo", Cours au Master 2 de Grenoble (France).

F. Marion, "Détection des ondes gravitationnelles ; où en sont Virgo et les autres ?", LPSC à Grenoble (France).

R. Gouaty, "Détection des ondes gravitationnelles : où en sont LIGO et Virgo ?", IRFU-SPP Saclay (France).

## L'équipe du LAPP

*Physiciens* : D. Buskalic, R. Flaminio, R. Gouaty, **F. Marion**, B. Mours, L. Rolland, E. Tournefier, D. Verkindt, M. Yvert

*Post-Docs* : L. Baggio (sept. 2005-sept. 2006), A. Dietz (depuis juil. 2008), V. Granata (mai 2006-août 2008), S. Karkar (oct. 2004-sept. 2006), J. Trummer (janv.-déc. 2008).

*Doctorants* : R. Gouaty, D. Grosjean

*Equipe Technique* : T. Bouedo, S. Cap, P.-Y. David, L. Giacobone, N. Letendre, A. Masserot, P. Mugnier, J.-M. Nappa, E. Pacaud, J. Tassan, S. Vilalte

*Stagiaires* : Un stagiaire ingénieur en électronique (2006), un stagiaire technicien en électronique (2006), un stagiaire de M2 (2007), un stagiaire de M1 (2008), deux stagiaires de L3 (2008).