

**Prospective 2004**

**Groupe de Travail  
« Ondes Gravitationnelles »**

# Synthèse du rapport sur le Thème « ondes gravitationnelles »

P. Hello, F. Marion, B. Mours

## 1) Introduction

Depuis une quinzaine d'années, des laboratoires de l'IN2P3 se sont engagés dans la recherche des Ondes Gravitationnelles (O.G.). C'est un domaine en forte évolution où le démarrage des interféromètres de plusieurs kilomètres de long que sont LIGO et Virgo nous font passer d'une époque dominée par les développements technologiques à une époque où l'observation en continu et la recherche de sources doivent devenir quotidiennes.

Les enjeux de la recherche des O.G. sont multiples. Il s'agit tout d'abord d'observer directement un signal émis depuis des régions de l'espace où règnent des champs gravitationnels intenses (coalescence de trous noirs par exemple) contrairement à la plupart des manifestations de la gravitation, offrant ainsi de nouveaux tests. D'autre part, les O.G. détectables étant émises par des sources astrophysiques, nous allons pouvoir observer l'univers avec un œil neuf et compléter ainsi les observations faites à base d'ondes électromagnétiques. Enfin, c'est un domaine qui demande de nombreux développements technologiques.

Cette synthèse du rapport présentera la physique des O.G. et plus particulièrement les contributions des laboratoires de l'IN2P3 aux deux aspects de ce domaine : les recherches faites avec des détecteurs terrestres et celles qui peuvent être faites à l'aide de détecteurs spatiaux. Ces deux domaines correspondant à des bandes de fréquence bien distinctes (mHz-Hz et Hz-kHz) doivent permettre l'observation de sources différentes.

Signalons enfin, que jusqu'à présent le DSM/DAPNIA ne s'est pas impliqué dans la recherche des O.G.

## 2) Détecteurs terrestres.

Les laboratoires de l'IN2P3 se sont lourdement investis dans la construction des détecteurs terrestres, essentiellement Virgo dont la construction s'est achevée en 2003.

Le savoir-faire des laboratoires de l'IN2P3 a été essentiel pour la construction de Virgo et s'est enrichi au cours des années. Ces laboratoires sont donc bien préparés à l'exploitation des données et à participer aux améliorations nécessaires.

### 2.1) Situation actuelle et perspective à très court terme (2004-2005)

Actuellement (fin 2004) Virgo est en phase de commissioning. C'est une phase longue car il s'agit d'une machine complexe et complètement nouvelle. La première priorité est donc de faire fonctionner Virgo à la sensibilité nominale et de manière permanente. Cet objectif peut être atteint pendant la deuxième moitié de l'année 2005 si tout se déroule normalement.

Parallèlement à cet effort, il y a aussi un travail important de mise en place de l'analyse des données. Cette physique nécessite une mise en commun des données provenant des différents détecteurs situés dans le monde. Là aussi, les physiciens de l'IN2P3 ont su tisser des liens avec les autres expériences pour participer à ce travail. Citons par exemple la définition du format des données de toutes les expériences ou la participation à des échanges de données test. Cet esprit de collaboration avec les autres expériences dépasse l'analyse des données et inclut des aspects techniques tels que des programmes de R&D communs avec LIGO comme le traitement de surface des miroirs ou les études du recyclage du signal.

Remarquons que la période actuelle (mise en route du détecteur, des analyses et des premiers upgrades) est propice à l'apport de nouveaux groupes de l'IN2P3 ou du DAPNIA dans Virgo.

## **2.2) Perspective à moyen terme (2006-2009)**

Bien que Virgo (ou l'expérience américaine LIGO) améliorent de plusieurs ordres de grandeur la sensibilité des détecteurs, l'observation d'un signal d'O.G. est loin d'être certaine, compte tenu des incertitudes des prédictions théoriques. Il est donc nécessaire de prévoir dès maintenant des améliorations des détecteurs. Ces améliorations passent par toute une série de changements plus ou moins importants dont une bonne partie peut être mise en place de manière graduelle. Il s'agit, par exemple, de changer les miroirs pour améliorer leurs performances vis à vis du bruit thermique (nouveaux matériaux, nouveaux traitements de surface, nouvelles formes de faisceau...) de modifier leur type de suspension (suspension monolithique), d'augmenter la puissance lumineuse, de modifier la configuration optique (recyclage du signal) ou d'améliorer les systèmes de contrôles.

Les laboratoires de l'IN2P3 sont en particulier impliqués dans les études de traitement de surface (Lyon), systèmes de contrôles (LAPP) et recyclage du signal (LAL). Ces études font partie d'un programme mis en place et financé par le biais d'EGO, structure franco-italienne. Les différentes options qui seront retenues et le planning de ces améliorations graduelles sont encore à l'étude par la collaboration Virgo.

Ce programme est en fait parallèle à celui mis en place par LIGO, programme qui doit être installé en 2009 mais qui est plus ambitieux car il inclut une refonte totale de l'isolation sismique. A la fin des ces programmes, il est envisagé que la sensibilité de Virgo tout comme celle de LIGO soit améliorée d'un ordre de grandeur. La participation des laboratoires de l'IN2P3 doit se poursuivre dans la direction actuelle.

## **2.3) Perspective à long terme (2010 et plus)**

Des modifications en profondeur des choix technologiques effectués pour Virgo seront nécessaires pour gagner un nouvel ordre de grandeur en sensibilité et ouvrir sérieusement le domaine de l'astronomie des O.G.. Plusieurs options sont alors possibles. Par exemple il peut y avoir l'introduction de nouvelles technologies telles que de nouveaux matériaux pour les miroirs, le refroidissement des ou d'une partie des miroirs, l'utilisation d'états condensés de la lumière, des optiques diffractives...

Toutes ses options pourront être mises en oeuvre sur Virgo et/ou sur une deuxième antenne européenne éventuellement souterraine. Cette seconde antenne sera nécessaire pour assurer une couverture raisonnable du ciel avec la redondance requise pour une observation continue couplée avec les deux sites de LIGO. Dans le cadre de l'initiative européenne FP6, un programme de « Design Study » a été soumis par un groupe qui fédère l'ensemble des groupes européens travaillant sur cette thématique. Cette activité qui doit se dérouler pendant les années 2005-2009 devrait permettre de préparer les choix et les options qui s'avéreront disponibles en 2010. Elle est essentielle pour l'organisation à long terme de la communauté européenne.

## **3) Les O.G. avec des détecteurs spatiaux.**

Aujourd'hui, il n'existe pas de détecteurs spatiaux d'O.G. même s'il y a eut une première tentative d'analyse de données radio de certains satellites (« tracking Doppler »). Cependant des projets sont en préparation depuis longtemps. Le projet spatial clef est LISA qui actuellement est conjointement porté par l'ESA et la NASA. LISA dont le lancement devrait intervenir en 2013 (?) sera précédé d'une mission de qualification technologique d'un certain nombre de composants (mission LISA Pathfinder) dont le lancement est prévu pour 2008.

Les laboratoires de l'IN2P3 ont longtemps été éloignés de ce sujet, domaine où la présence française était d'ailleurs de plus en plus réduite. Mais en 2004, une évolution s'est manifestée et un certain nombre de laboratoires français dont certains de l'IN2P3 ont affiché leur intérêt pour LISA : APC avec une contribution dès LISA pathfinder, le LAPP et plus récemment le LPSC, l'intérêt commun de ces laboratoires se retrouvant autour du traitement des données. Il s'agit donc d'un investissement là aussi à long terme pour une physique complémentaire de celle des détecteurs terrestres. Signalons à ce sujet

le rôle du GDR GREX (Gravitation et Expérience dans l'Espace) qui permet un échange entre les deux domaines.

**Document complet**

**Groupe de Travail  
« Ondes Gravitationnelles »**

**Ce document est inspiré en grande partie de la partie expérimentale du rapport de prospective de la CID 47 (M.-A. BIZOUARD, L. BLANCHET, A. BRILLET, A. BUONANNO, P. HELLO, B. MOURS, J. NOVAK, P. TOUBOUL, P. TUCKEY et J.-Y. VINET, 2004) dont les membres de ce groupe de travail étaient coauteurs.**

## 1) **Bref historique général**

La quête des ondes gravitationnelles d'origine cosmique fut initiée aux Etats-Unis par Joseph Weber dans les années 1960 avec des barres résonantes à la température ambiante. Après l'annonce (erronée) d'une détection en 1971, de nombreux groupes se lancèrent dans la construction de barres résonantes (aux USA, en Allemagne, en Grande Bretagne, au Japon, en Italie, en France), et ce fut le début de cette nouvelle discipline, notamment en France. L'idée de la détection par interférométrie optique, discutée en détail par R. Weiss au MIT, fut mise en œuvre par R.L. Forward à la Hughes Aircraft Company, avec un instrument de dimensions de l'ordre de quelques mètres, de sensibilité comparable aux barres de Weber. Les spécialistes de relativité générale, désormais intéressés, livrèrent des évaluations d'énergie rayonnée sous forme d'OG par divers phénomènes cosmiques violents, évaluations qui s'avèrent beaucoup plus faibles que les premières estimations optimistes, en particulier pour les événements du type supernova. Il apparut que les sensibilités des barres, même avec de nombreuses améliorations (cryogénie, capteurs) auraient de faibles chances de détecter des événements à OG. La seule voie prometteuse sembla alors être celle d'interféromètres de Michelson, dont la sensibilité pouvait en principe être accrue (par rapport à Forward) de nombreux ordres de grandeur, contrairement à celle des barres. Plusieurs groupes construisirent des prototypes de tels interféromètres (Glasgow, CalTech, Garching) de plusieurs dizaines de mètres, ce qui permit au moins de préparer les équipes des futurs grands projets. Les projets de grands interféromètres, ou antennes gravitationnelles commencèrent alors à s'organiser, LIGO aux USA, GEO entre l'Allemagne et la Grande-Bretagne, Virgo entre la France et l'Italie, qui sautant la case « prototype » en la remplaçant par une phase « interféromètre central », se retrouve presque en synchronisme avec LIGO. Cette activité expérimentale est depuis des années couplée à une recherche théorique (évaluation des sources, prédictions précises et tests de la Relativité Générale) et numérique (modélisation) qui a maintenant acquis un statut reconnu universellement en astrophysique relativiste.

En 88-89 rédaction d'un projet détaillé d'antenne gravitationnelle franco-italienne. Les signataires venaient des institutions suivantes : sections de Pise, de Naples et de Frascati de l'INFN, Universités de Salerne et Naples, CNRS et Universités Paris VI et XI, LOA (Ecole polytechnique-ENSTA), CNRS et Observatoire de Paris-Meudon

En Mai 89, la proposition de construction est soumise au CNRS et à l'INFN italien.

En Mars 90, le comité d'experts nommés par le CNRS (comité Fleury) rend un avis favorable. Entre-temps les laboratoires de l'IN2P3 entrent en scène : LAL (Orsay), LAPP (Annecy) et le groupe Mackowski de l'IPN-L (Lyon) adhèrent au projet et le groupe Brillat intègre les locaux du LAL.

En Septembre 91, le CNRS et l'INFN émettent une déclaration d'intérêt commun.

En Mai 92, le comité des Très Grands Equipements rend un avis favorable.

En Juin 92, le Ministre français annonce le lancement du projet.

En Septembre 93 le projet est approuvé en Italie

En Avril 94, le projet est approuvé par le Conseil d'Administration du CNRS

En Juin 94, l'accord franco-italien est signé.

## 2) Le contexte international

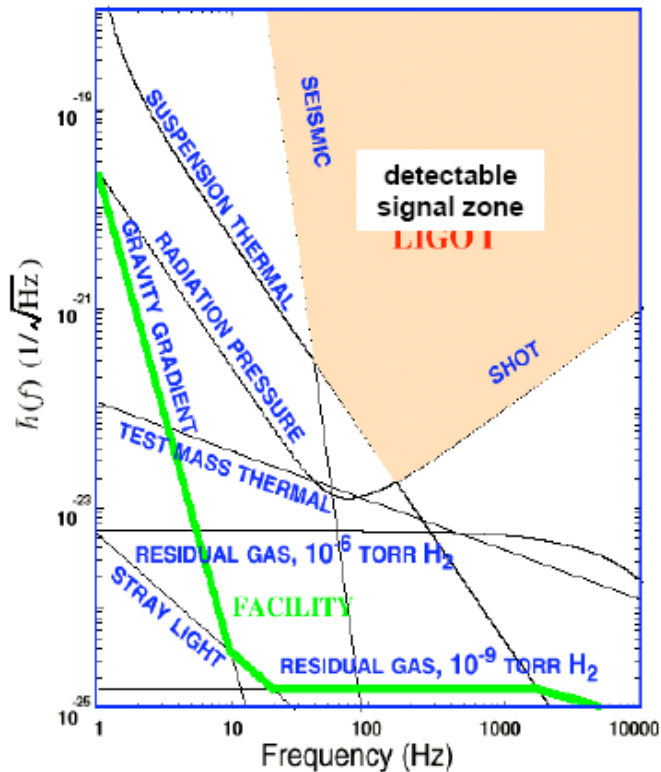
### ○ LIGO

LIGO a été conçu, développé et construit en commun par des équipes du California Institute of Technology, et du Massachusetts Institute of Technology. L'approbation par la NSF en Mai 90 du projet, puis l'attribution de son budget par le Congrès l'année suivante ont évidemment pesé lourd dans les décisions du CNRS et de l'INFN les années suivantes. Si l'on néglige des détails technologiques parfois importants, comme ceux qui limitent la sensibilité de LIGO en dessous de 100 Hz, le principe est identique à celui de Virgo, qui sera brièvement esquissé plus loin. Un point essentiel est toutefois que LIGO existe à deux exemplaires, un interféromètre dans l'Etat de Washington (site de Hanford) et un autre en Louisiane (Site de Livingstone) [6] :



Les deux LIGO

La sensibilité spectrale est moins performante que celle de Virgo principalement aux basses fréquences, en raison d'une isolation sismique minimale :



Une isolation sismique plus sophistiquée, largement inspirée de celle de Virgo devrait être installée dans une deuxième génération d'instrument (LIGO II)

- **Le contexte européen**
  - **Les barres italiennes**

Les italiens, à la suite de Edoardo Amaldi, ont été parmi les premiers à entreprendre à la suite de J. Weber, la construction de détecteurs résonants. Il y a à l'heure actuelle encore 3 sites où des barres cryogéniques sont développées : EXPLORER, au CERN, AURIGA au laboratoire de Legnaro de l'INFN, et NAUTILUS, au laboratoire de Rome-Frascati de l'INFN. Ce contexte explique la réceptivité de l'INFN aux expériences gravitationnelles, et en partie sa participation à Virgo . Ces groupes sont associés en réseau avec le groupe américain cité plus haut, et un groupe australien [7].

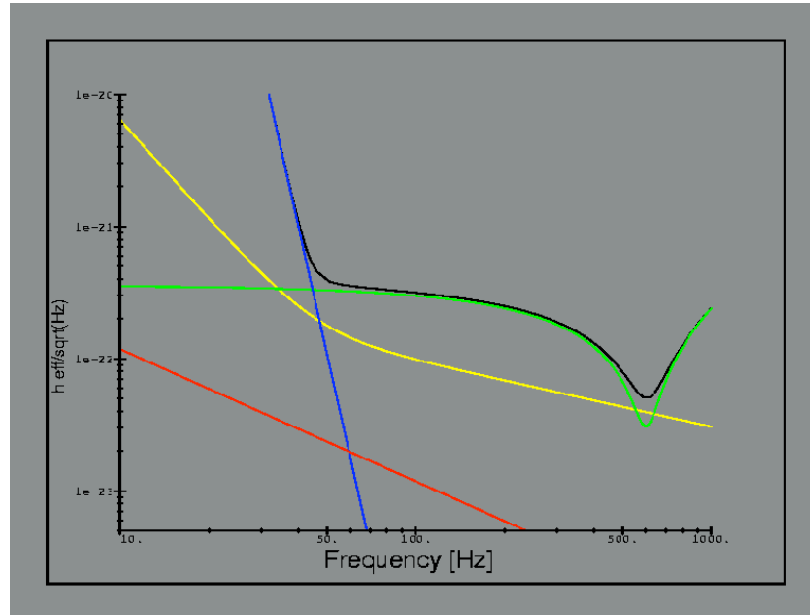
- **GEO600 : collaboration anglo-allemande**

Les groupes anglais (Glasgow principalement) et allemands (Garching et Hanovre) avaient initialement proposé un projet de même envergure que VIRGO ou LIGO. Les restrictions budgétaires aussi bien en Grand-Bretagne qu'en Allemagne (réunification) tuèrent le projet.

En 1994, un projet plus modeste, avec des bras de 600m fut décidé, autour des mêmes équipes, et installé dans la région de Hanovre, qui fournissait le terrain et accordait un support financier. Cet interféromètre a commencé à fonctionner en 2002 (mais pas encore avec ses optiques définitives). Sa topologie est différente de celle qui avait été proposée



dans GEO, qui préfigurait LIGO et Virgo. Il s'agit ici d'un interféromètre simple, dont les bras sont néanmoins repliés de façon à atteindre une longueur de 1200m. Il contient un recyclage de puissance et un recyclage de signal, ce qui fait qu'au voisinage immédiat de 600Hz, il a une sensibilité presque comparable aux plus grands interféromètres (Virgo, LIGO) [8].



**sensibilité spectrale de GEO600**

### 3) Virgo

Virgo est l'œuvre collective de plusieurs laboratoires Français et Italiens. Comme il a été dit plus haut, au commencement était le noyau initial, le Groupe d'Alain Brillet, partie du LGCR de Paris VI (Dir : Ph. Tourrenc) était spécialiste, en raison de son activité antérieure, des lasers et de l'optique. Puis s'adjoignit le groupe de Pise de l'INFN (Adalberto Giazotto), qui proposait un système original et performant d'isolation sismique (question-clé dans ce type de détecteur), puis dans la continuité, une équipe de Naples. Une condition pour l'acceptation du projet était l'association avec des laboratoires de l'IN2P3 ayant la capacité de gérer de grands projets expérimentaux, cette condition fut remplie lorsque le LAPP (Michel Yvert, Benoit Mours) entra dans la collaboration, suivi par le LAL (à l'initiative de Michel Davier). D'autres laboratoires italiens de l'INFN se joignirent également (Perugia, Rome, Florence). Les problèmes de miroirs furent ensuite pris en charge, pour la production par le groupe SMA de l'IPN de Lyon, et pour la métrologie, par le Laboratoire d'Optique de l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie de Paris.

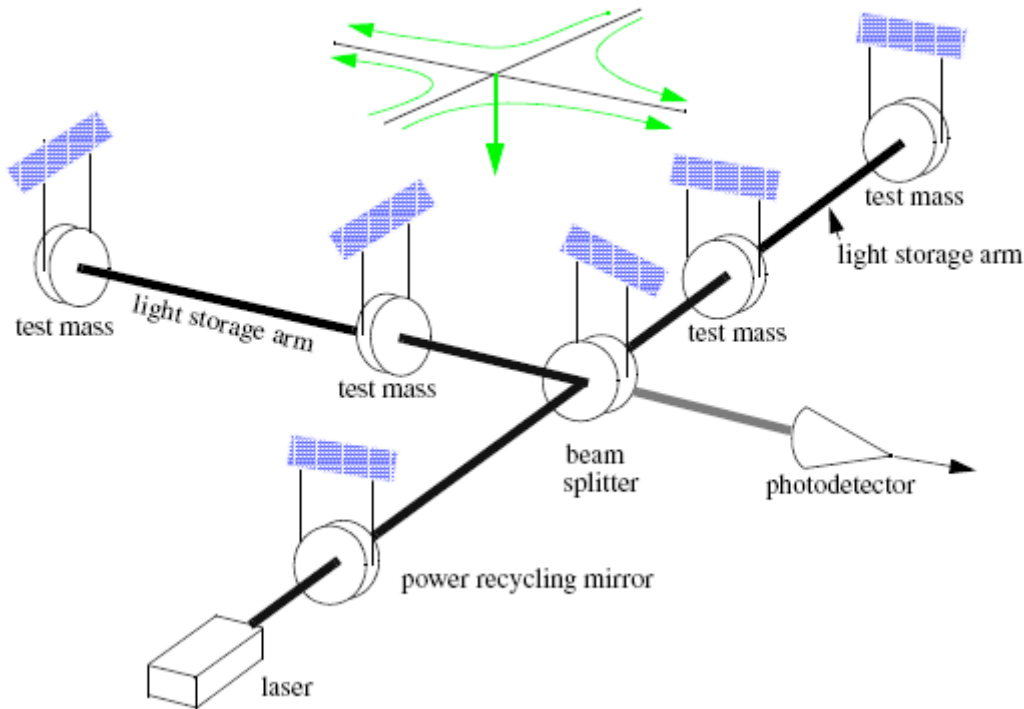
#### **Le site**

Une tâche essentielle fut de trouver une zone de terrain convenable pour installer un instrument en forme d'équerre ayant des bras de 3 km. L'INFN avait pris en charge cette tâche bien avant l'acceptation du projet, quitte à augmenter légèrement le montant de sa participation à Virgo pour la porter à 55%. Le CNRS ne négocia pas ce point, et les sites disponibles en France ne furent pas considérés.

Le site est dans la région de Pise, sur le territoire de la commune de Cascina.

## Le principe de Virgo

Virgo est essentiellement un interféromètre de Michelson comportant des cavités optiques résonantes de 3 km de long en guise de bras, en vue d'augmenter la distance effectivement parcourue par la lumière. Un miroir supplémentaire, ou miroir de recyclage est destiné à accroître la puissance sur la séparatrice.



Les miroirs sont suspendus afin d'être libres dans le plan horizontal, et leur suspension est une chaîne de filtres mécaniques qui les isole des vibrations sismiques de fréquence supérieure à 10Hz. L'ensemble est évidemment sous ultra-vide. On peut trouver tous les détails dans [9]

## Historique de la construction

Juin 94 : lancement de la procédure d'expropriation sur le site de Cascina

6 Mai 96 : début de la construction

Janvier 97 : début de la construction de l'installation de Lyon

Janvier 98 : début de fabrication des modules des bras

Été 98 : bâtiment central terminé, début de l'installation des tours

Mai 99 : début de la construction des tunnels et des bâtiments terminaux

Automne 99 : bâtiment de Lyon (traitement des miroirs) terminé

Printemps 00 : mise en place interféromètre central

Été 00 : mise en route et début des tests CITF

Automne 00 : début de l'assemblage des tubes

Été 01 : fin de construction des bâtiments

Été 02 : fin des tests CITF et assemblage de Virgo

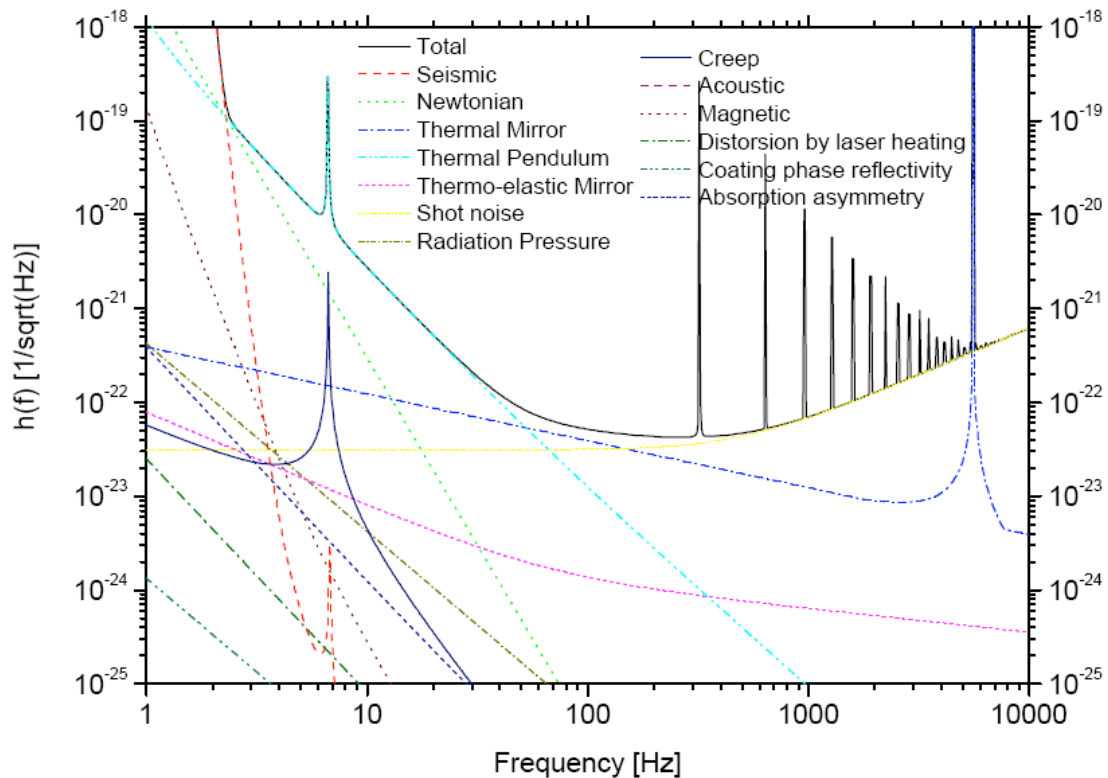
Fin 02 : fin d'assemblage de Virgo, début des tests.

Printemps 03 : mise en route de Virgo

2004 : commissioning de Virgo

## La sensibilité de Virgo

On veut détecter des trains d'ondes gravitationnelles d'amplitude au plus de l'ordre de  $10^{-21}$ , ce qui équivaut à mesurer une variation de distance relative du même ordre entre les miroirs d'un bras. Il est donc nécessaire de réduire les différents bruits, qui à ce niveau, sont légion, bien au dessous de ce seuil. C'est bien entendu ce domaine de recherche qui a été l'objet principal des équipes de Virgo pendant les années passées. A l'heure actuelle, on estime réalisable la sensibilité spectrale résumée par le diagramme ci-après, qui réalise un bilan de tous les bruits qui ont été identifiés et modélisés :



L'interféromètre est supposé arriver à l'état d'antenne gravitationnelle, encore à mettre au point, fin 2004.

## Le coût de Virgo

Le budget déterminé en 1993 conjointement par le CNRS et l'INFN était de 76 Mécus (76M€, ou 500MF) non indexés. Au terme de la construction, il apparaît, malgré certains aléas dans la construction des bâtiments, et des changements sur des postes lourds (par exemple l'enceinte à vide), que l'enveloppe a été exactement respectée.



vue actuelle de Virgo

#### 4) Bilan des équipes IN2P3 de Virgo

Les équipes françaises engagées dans la construction de Virgo appartiennent donc respectivement :

- au LAL
- au LAPP
- à l'IPN de Lyon
- à l'ESPCI
- à l'Observatoire de la Côte d'Azur

On peut donner un bref résumé de l'activité de chacune d'elle.

- 1) Le LAL, dès son adhésion à Virgo en 90 sous la direction de Michel Davier, a été en charge des tests, de la conception et du contrôle de la construction de l'enceinte à vide devant abriter les cavités kilométriques et leurs jonctions. Réussir à maintenir un ultravide ( $10^{-6}$  torr) dans une enceinte de 4.5 hectares de surface intérieure n'était pas joué d'avance. Il a fallu trouver le bon traitement pour éliminer de l'acier inoxydable l'hydrogène dont il est saturé à la sortie de l'aciérie, et qui, en dégazant continuellement, aurait empêché de maintenir une aussi basse pression. Ce travail

considérable a été effectué en collaboration avec l'INFN de Pise. Ensuite il a fallu définir, avec les industriels, le mode de production des éléments de tube à vide, le protocole de lavage, d'étuvage et de stockage des éléments produits. Les ingénieurs du LAL (conduits par Violette Brisson et André Reboux) et le Directeur Technique du projet, Marcel Jacquemet (jusqu'en 95), ont ensuite, en liaison avec le Laboratoire de l'INFN de Pise, conçu le mode de construction et d'installation du tube dans son ensemble. Les mêmes ont également conçu et supervisé la production et l'installation des baffles de protection contre la lumière diffusée, à l'intérieur du tube.

Le LAL a supervisé la commande et l'installation des grandes vannes destinées à protéger les cavités kilométriques, en cas de retour de la partie centrale de l'instrument à la pression atmosphérique.

Le LAL est en charge de la conception et de la réalisation du contrôle-commande (« Global Control », Fabien Cavalier) de l'instrument, c'est-à-dire du système temps-réel permettant de connaître, l'état de chaque système, et de le modifier. Le LAL est aussi fortement impliqué dans l'activité « locking » (M. Barsuglia en est coordinateur), c'est à dire l'activité qui regroupe les études d'acquisition du lock (comment amener l'instrument à son point de fonctionnement) et de locking (comment maintenir l'instrument à son point de fonctionnement). Ces activités (contrôle et locking), très proches de l'instrument, impliquent une forte mobilisation du LAL pour le commissioning de Virgo.

Le LAL prend part également à la préparation de l'analyse des données (F. Cavalier était coordinateur jusqu'en juin 2004), et s'est spécialisé dans la détection des événements impulsifs (P. Hello est responsable). Le groupe du LAL a ainsi développé des méthodes robustes de recherche de bursts d'onde gravitationnelle et s'est intéressé au problème de la détection en réseau.

- 
- 2) En 1987, le LAPP a commencé à s'intéresser à la détection des ondes gravitationnelles. Après avoir étudié des détecteurs capacitifs, l'équipe du LAPP menée par Michel Yvert a rejoint Virgo au début 1990, engageant l'IN2P3 dans ce projet. Le LAPP a été en charge de la conception et de la réalisation des tours destinées à abriter les chaînes de suspension et les miroirs (René Morand). Ces chaînes ont une longueur de l'ordre de 10m, et il faut les insérer dans une enceinte à vide verticale de diamètre 2m, qui doit reposer sur un socle ou « bas de tour » sur lequel les tubes horizontaux doivent se fixer. C'est donc un objet à la fois monumental et délicat, réalisé à 10 exemplaires, qui devait de plus recevoir un traitement thermique de dégazage et être transformé en salle blanche pour recevoir les miroirs. La définition par le LAPP des procédures de manipulation de miroirs et leur impact sur les infrastructures de Virgo a nécessité l'installation à Annecy de la première enceinte à vide de Virgo en 1994.

Le LAPP a aussi la charge de l'ensemble du système de détection qui comprend un mode cleaner suspendu, l'optique correspondante, les différentes photodiodes de détection, leur électronique et les logiciels associés (Raffaele Flaminio, Louis Massonnet, Edwige Tournefier, MY). Il est également responsable de l'infrastructure électronique et software d'une grande partie des contrôles de Virgo et du système d'acquisition des données (Benoît Mours).

Le LAPP a conçu et développé un code de simulation complet de Virgo dans le domaine temporel (SIESTA, Frédérique Marion) utilisé pour définir et tester les configurations de l'interféromètre, les stratégies de « locking » de l'interféromètre ou l'analyse des données. Pour cette dernière activité, le LAPP contribue plus particulièrement à la recherche de coalescences binaires et de signaux périodiques et a

fourni de multiples outils. On doit par exemple au LAPP (BM) la définition d'un format de stockage des données commun avec LIGO ou le système de visualisation 'data display' (Didier Verkindt) et 'Vega' (Damir Buskulic)

Enfin le LAPP participe activement à la mise en route du détecteur, R. Flaminio étant par exemple le responsable du « commissioning » de Virgo. Le LAPP assure également la calibration des données de l'interféromètre (FM).

- 3) Le Service des Matériaux Avancés de l'IPN de Lyon est responsable des couches minces optiques qui font la qualité des miroirs de Virgo. En effet, le recyclage de la lumière, qui permet d'obtenir la puissance nécessaire sur la séparatrice, exige une excellente réflectivité des cavités résonantes installées sur chaque bras. Cette réflectivité dépend à son tour de la qualité de surface des miroirs. A l'époque de la phase d'étude du projet, aucun industriel n'était en mesure de fournir des pièces satisfaisant les spécifications, et de la taille exigée pour Virgo. L'arrivée dans Virgo en 92 de cette équipe (J-M. Mackowski, L. Pinard, P. Ganau, A. Remillieux) a été décisive pour la faisabilité du projet. La construction d'un appareil spécial de dépôt de couches diélectriques a été nécessaire, car les spécifications de Virgo sont habituellement demandées pour des pièces très petites, et aucun instrument disponible commercialement n'était capable de traiter des pièces de 30cm de diamètre. Un laboratoire à l'abri des poussières unique en Europe a été construit en 97 pour abriter cet appareil.

Le SMA est également l'auteur du concept de « coating correctif », qui consiste à déposer, après production du coating réfléchissant proprement dit, des couches supplémentaire de silice suivant un plan déterminé pour corriger les imperfections résiduelles du front d'onde, après mesure de celui-ci. A terme, le procédé devrait même permettre d'obtenir des fronts d'onde de forme non sphérique en conformant le substrat avant même le processus de revêtement.

- 4) Les équipes non-IN2P3

Le Laboratoire d'Optique de l'ESPCI s'est inséré dans Virgo (en 93) en se spécialisant dans la métrologie des optiques. Il travaille donc évidemment en symbiose avec le SMA. Cette équipe (Animée par Claude Boccara) a développé depuis des années une méthode de mesure de l'absorption optique des matériaux transparents par « effet mirage », qui s'avère indispensable pour la qualification des miroirs partiellement réfléchissants qui composent la partie centrale de Virgo. L'existence de ce moyen de mesure a permis de développer chez le fabricant de silice Heraeus, en collaboration avec Nice et SMA, un nouveau matériau optique à très faible absorption). Cette équipe a également produit des bancs de mesure de la surface de miroirs (CB, V. Loriette). V. Loriette a par ailleurs développé depuis des années un code numérique de simulation de l'optique de Virgo, basée sur des développements modaux.

L'équipe ILGA de l'Observatoire de la Côte d'Azur, est la continuation du GROG, après son accueil par le LGCR de Paris VI de 86 à 90, puis par le LAL (90 à 99). Cette équipe, dirigée par Catherine N. Man, est en charge de l'installation d'un laser de puissance (CNM, Frédéric Cleva), de sa stabilisation (François Bondu), de la réalisation d'une cavité de filtrage de 140 m appelée « mode-cleaner » et de la réalisation et de l'installation du banc d'injection du faisceau dans l'interféromètre (Henrich Heitmann). Elle maintient également des codes de simulation optiques destinés à l'exploration de solutions avancées pour l'amélioration de Virgo. Elle prend part également à l'analyse des données de Virgo, et tout particulièrement à l'analyse du bruit. En particulier elle a donné la première estimation théorique du bruit thermique à basse fréquence dans les miroirs (François

Bondu, Patrice Hello (LAL), Jean-Yves Vinet). Elle a contribué (JYV), en liaison avec Kip Thorne (CalTech) à la création d'une méthode d'évaluation du bruit de lumière diffusée dans les interféromètres.

## 5) Le projet LISA

Même si aucune équipe de l'IN2P3 ou du DAPNIA ne participe à l'heure actuelle au projet LISA, nous avons jugé important de ne pas laisser de côté une telle expérience...

### Justification physique

Les interféromètres terrestres du type Virgo n'ont pas accès aux basses fréquences gravitationnelles (au dessous du Hz), en raison de la grande difficulté à isoler sismiquement les masses-test dans ce domaine de fréquence. En fait, une telle isolation serait inutile, car elle n'empêcherait pas les couplages gravitationnels quasi-statiques (newtoniens) entre ces masses et les masses telluriques en mouvement. Le domaine des basses fréquences n'en reste pas moins très intéressant du point de vue astrophysique, et même, du point de vue cosmologique. C'est en effet dans cette gamme de fréquence que l'on s'attend à trouver des signaux émis par les interactions dynamiques de trous noirs massifs d'une part, et tous les détails des mouvements des étoiles binaires compactes proches. La Relativité Générale étant admise, on a là un laboratoire potentiel considérable et sûr (les binaires compactes existent, et les trous noirs massifs aussi, on les a vus). On espère en outre pouvoir détecter avec LISA un rayonnement fossile, analogue du rayonnement électromagnétique à 3°K, mais émis beaucoup plus tôt.

Pour atteindre ces basses fréquences, il a été compris depuis longtemps qu'un détecteur spatial était nécessaire. Le projet qui correspond actuellement à ce besoin s'appelle LISA. Il n'est donc pas concurrent, mais complémentaire des interféromètres terrestres.

### Historique

Le concept initial d'antenne gravitationnelle spatiale est du à Peter Bender (JILA) dans les années 73-77. Un projet élaboré (LAGOS) fut soumis à la NASA sans succès dans les années 80. Dans les années 90, simultanément Peter Bender (JILA) et Ronald Hellings (JPL) se tournent vers l'ESA pour promouvoir leurs projets respectifs : LISA pour P. Bender et SAGITTARIUS, puis OMEGA pour R. Hellings, en demandant la caution des physiciens européens de Virgo et GEO. LISA a déjà sa stratégie actuelle (3 stations en orbites héliocentriques aux trois sommets d'un triangle), tandis que SAGITTARIUS propose 6 stations en orbites géocentriques. En Décembre 93, LISA est proposée comme une mission « cornerstone » dans le cadre des missions « Horizon 2000 Plus » de l'ESA, opérant une fusion entre les équipes de LISA et SAGITTARIUS. Comme le coût de la mission excède les ressources de l'ESA seule, il est proposé en 97 de collaborer avec la NASA. En 98, l'état de définition des charges utiles est considéré comme suffisant pour amorcer la phase d'étude industrielle. A l'heure actuelle (2003) le lancement est projeté en 2012-2013, la fusée (Delta) étant fournie par la NASA, et les trois stations par l'ESA. Le coût de la mission (300 M€) serait partagé pour moitié entre les deux agences. L'ESA prépare la mission de démonstration Smart2, vers 2006 (coût : 140 M€). Cette mission devrait emporter deux charges utiles indépendantes, l'une européenne l'autre américaine, en vue de tester indépendamment les

technologies cruciales pour LISA, à savoir les accéléromètres, les bancs d'optique et la compensation de traînée.

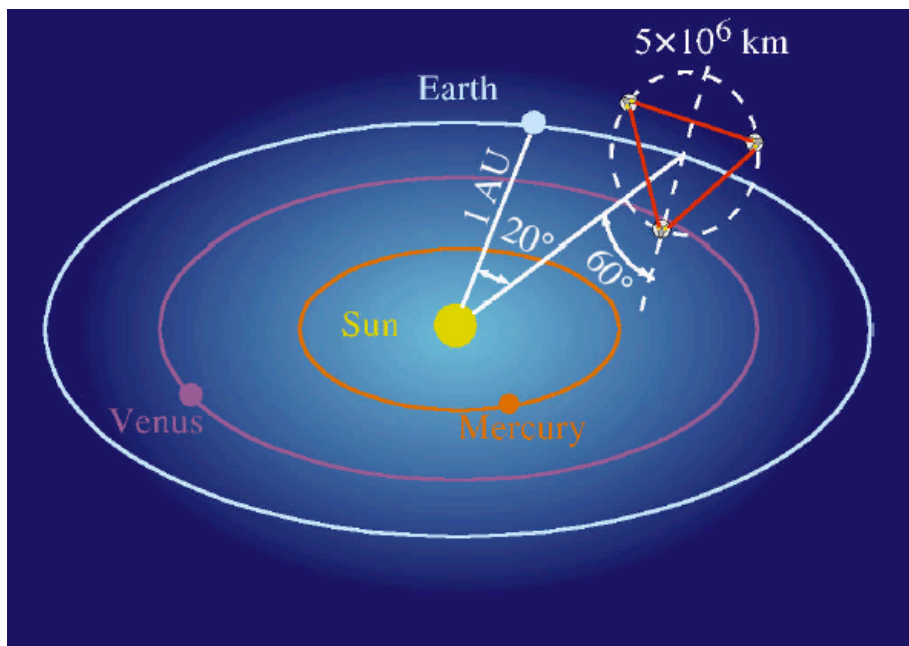
### Les équipes

La partie européenne des scientifiques de LISA se compose essentiellement des équipes anglo-saxonnes déjà associées dans GEO600, à savoir les britanniques de Glasgow et Cardiff, et les allemands de Hanovre et Garching, plus les deux groupes importants de Birmingham et du Rutherford Appleton, tous deux spécialisés en physique spatiale. On doit adjoindre une petite participation italienne (Trente), et une participation française comprenant d'une part l'ONERA à cause de sa compétence reconnue en matière d'accéléromètres spatialisables, et d'autre part l'Observatoire de Nice pour sa compétence en matière de stabilisation de lasers et d'analyse de données.

La partie américaine comprend des équipes du JPL, que la NASA entend voir diriger le fonctionnement de la mission, et le Goddard Space Flight Center, que la NASA entend voir diriger l'ensemble du projet.

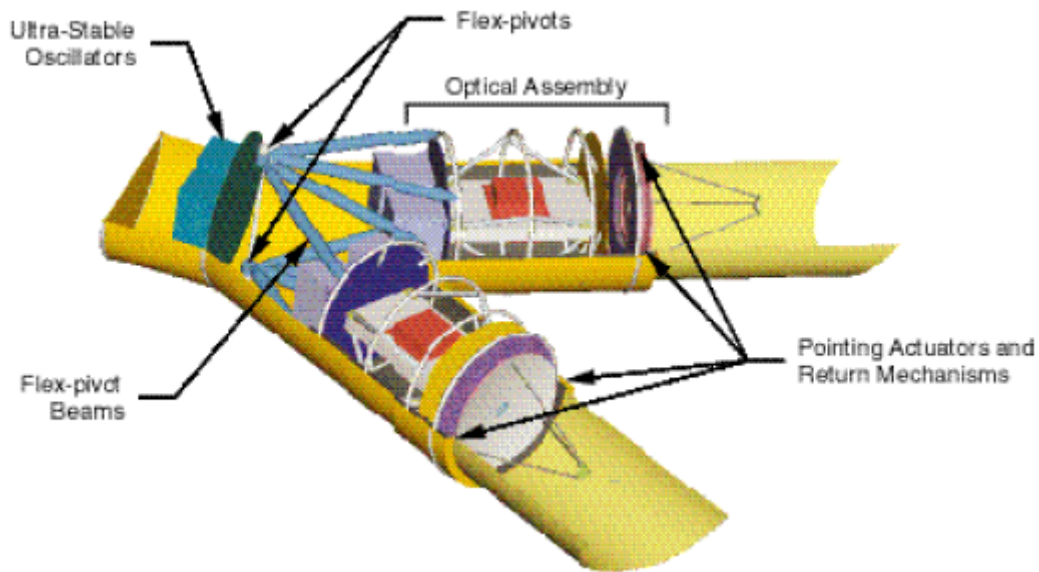
### Le principe du projet

Lisa comprend 3 stations en orbites héliocentriques de rayon 1ua, en retard de 20 jours sur la Terre. Les distances entre stations sont de 5 Mkm. Elles sont continûment connectées optiquement par des faisceaux optiques infra-rouges.

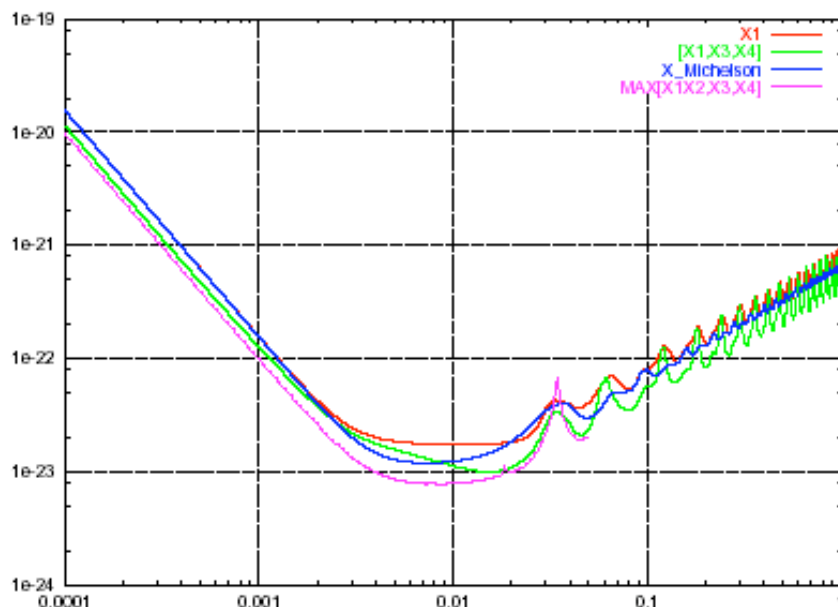


Chaque station contient donc deux lasers de 1W, son système de stabilisation, et deux masses de référence.





Le principe consiste à mesurer en permanence les variations des distances réciproques en analysant le battement entre l'onde arrivant des stations éloignées et l'oscillateur local. Ces battements sont directement reliés (outre les bruits) aux émissions gravitationnelles. La sensibilité spectrale estimée a l'allure suivante :



(Les différentes couleurs représentent diverses combinaisons de données)  
 10.5 La participation française

La contribution française à LISA a été initialement celle de l'ONERA, qui ayant depuis longtemps développé avec succès un accéléromètre électrostatique pour plusieurs missions

spatiales, était bien placé pour étudier et réaliser les masses-test de LISA. En 2002, l'équipe de l'ONERA fut amenée à s'associer à l'équipe italienne de Trente, compétente dans le même domaine, quoique sans expérience. En 2000, l'équipe ILGA de l'Observatoire de Nice obtint un support financier du CNES pour une doctorante dont le sujet de thèse est la stabilisation d'un laser sur une raie d'absorption de l'iode. Cette même équipe a contribué à définir la méthode d'exploitation des données, ceci en collaboration avec une équipe Indienne de l'IUCAA (Pune)[21].

## 10.6 Perspective

La composition du LISA international Science Team (LIST) fait déjà apparaître une énorme disproportion entre le monde anglo-saxon (USA+UK+Allemagne) et la France plus l'Italie. Ceci s'explique par la plus grande disponibilité durant des années des équipes de GEO600 causée par l'échec de GEO, années pendant lesquelles les spécialistes franco-italiens ont été absorbés par Virgo. On discerne cependant, et en sus, une tendance américaine à vouloir substituer un laboratoire américain à tout laboratoire européen pour les développements technologiques.

## 6) Le GDR GREX

La première idée du GDR GREX (Gravitation Expérimentale) est due à Philippe Tourrenc et Alain Brillet. Il semblait en effet intéressant de rassembler dans un GDR autour du groupe définissant Virgo, les chercheurs dont les domaines étaient connexes, et qui pouvaient apporter une expertise complémentaire. La première demande en 91, fut refusée par la direction du secteur MPB. Puis Serge Reynaud du LKB en reprit le principe et sous sa direction, le projet fut adopté en 94 par le département SPM. Il fonctionne depuis cette date avec une réunion annuelle (voir [22]). Ces réunions se déroulent sur deux jours et consistent en présentations et discussions à thème.

Le GREX permet précisément le financement des missions occasionnées par ces réunions. En 2002, il a été renouvelé sous une forme un peu différente, le thème étant devenu « Gravitation et Expérience dans l'Espace ». La réunion de 2002 a été tenue à Pise et a déjà rassemblé sur ce thème des chercheurs français et italiens.

## Références citées

- [1] J. Weber, Phys. Rev., 117, p. 306 (1960)
- [2] J. Weber, Phys. Rev. Lett., 18, p. 408 (1967)
- [3] J. Weber, Phys. Rev. Lett., 22 (24), p.1320 (1969)
- [4] R.L. Forward, Phys. Rev. D. 17, p. 379 (1978)
- [5] R. Weiss, Quarterly Progress Report of the Research Laboratories of Electronics of the MIT, 105 p.54 (1972)
- [6] <http://www.ligo.caltech.edu>
- [7] <http://igec.lnl.infn.it>
- [8] <http://www.geo600.uni-hannover.de>
- [9] <http://www.Virgo.infn.it>
- [10] S.Bonazzola et al., Astron. Astropys. 278,421, (1993)

- [11] <http://www.lorene.obspm.fr>
- [12] S.Bonazzola, E.Gourgoulhon, J-A.Marck, Phys.Rev.Lett. 82, 892 (1999)
- [13] P.Grandclément, E.Gourgoulhon, S.Bonazzola, Phys.Rev. D 65, 044021 (2002)
- [14] T.Damour, A . Vilenkin, Phys. Rev.D64 p.064008 (2001)
- [15] T.Damour, Phys. Rev, D64, p.124013, (2001)
- [16] T.Damour, E. Gourgoulhon, Ph.Grandclément, Phys.Rev.D66 p.024007 (2002)
- [17] A. Buonanno et al., Phys. Rev. D67 (2003) p.024016
- [18] L.Blanchet, Phys.Rev.D65, 124009 (2002)
- [19] L. Blanchet et al. Class Quantum Grav. 13575 (1996)
- [20] L. Blanchet et al. Phys. Rev. D65, 061501R (2002)
- [21] S. Dhurandhar, K. Rajesh Nayak and J-Y. Vinet, Phys. Rev. D65 102002 (2002)
- [22] <http://www.spectro.jussieu.fr/GREX>
- [23] [http://www.pg.infn.it/Virgo/local/gw\\_biblio.htm](http://www.pg.infn.it/Virgo/local/gw_biblio.htm)

NB : Les publications des différents groupes de Virgo sont trop nombreuses pour être citées dans ce document de synthèse. On les trouve référencées sur [23]

### **Annexe : Effectifs des différents groupes français de VIRGO**

Groupe	Physiciens	ITA
Virgo-LAL-Orsay	9	3
Virgo-LAPP-Annecy	10	4
Virgo-OCA-Nice	14	2
Virgo-ESPCI-Paris	2	2
Virgo-SMA-Lyon		4

Le nombre d'ITA a énormément varié au cours des années, particulièrement au LAL et au LAPP dont les services techniques furent très impliqués dans la construction de VIRGO. Maintenant que la construction est terminée, le besoin en ITA (essentiellement info) est devenu beaucoup plus faible.

Evidemment lors d'upgrades ou de construction d'un détecteur de seconde génération, on demanderait à nouveau une forte mobilisation de ces services (mécanique et électronique).

# Eléments de prospective

## 1) Détecteurs terrestres : instrumentation

### 2.1 Introduction

Les interféromètres de première génération sont tous basés sur la même configuration optique: un interféromètre de Michelson avec des grandes cavités Fabry-Perot (FP) dans les bras et l'utilisation de la technique du recyclage de puissance. Les grands FP permettent d'augmenter les chemins optiques parcourus par la lumière dans les bras jusqu'à typiquement une centaine de km alors que le recyclage permet d'obtenir des puissances lumineuses au niveau de la séparatrice de l'ordre du kW. Grâce à l'utilisation conjointe des FP kilométriques et du recyclage, on arrive à une sensibilité limitée par le bruit de photons au niveau de quelques  $10^{-23} / \text{Hz}^{1/2}$ .

Les interféromètres de première génération ne sont en fait limités par le bruit de photons qu'à haute fréquence (typiquement au delà du kHz). Evidemment quand les autres composantes du bruit (bruit thermique essentiellement) auront été réduites, le bruit de photons deviendra une source importante de bruit également à basse fréquence. Changer alors la configuration optique permettra d'optimiser le détecteur en particulier en fonction des sources d'ondes gravitationnelles recherchées. Les études de nouvelles configurations n'ont vraiment de sens que dans une approche d'amélioration globale de la sensibilité d'un détecteur.

### 2.2 Recyclage du signal et RSE

Le principe du recyclage du signal est d'ajouter un nouveau miroir (MSR) en sortie de l'interféromètre afin de former une nouvelle cavité (voir figure X1). La réponse de l'interféromètre se trouve alors multipliée par la fonction de transfert de cette cavité et est donc amplifiée autour de sa fréquence de résonance mais au détriment de la bande passante.

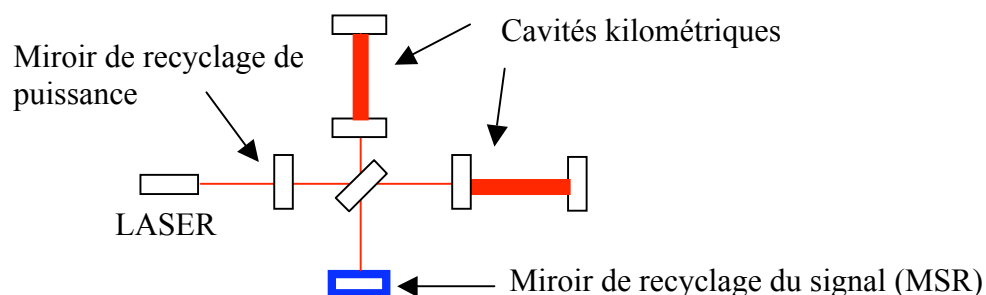


Fig. X1 : schéma d'un interféromètre à recyclage du signal

L'interféromètre (à bande large) devient donc un détecteur à bande étroite si le recyclage du signal est implémenté. La bande passante et le gain de sensibilité dépendent tous deux de la finesse de la cavité de recyclage du signal, et donc essentiellement de la réflectivité du miroir MSR (voir figure X2). De manière évidente, là où la sensibilité est dominée par exemple par le bruit thermique, le recyclage de signal ne peut jouer aucun rôle. Cependant avec l'amélioration conjoint du bruit thermique (nouveaux matériaux, cryogénie ...), il peut devenir très intéressant d'être capable d'ajuster la réponse du détecteur dans telle ou telle bande de fréquence.

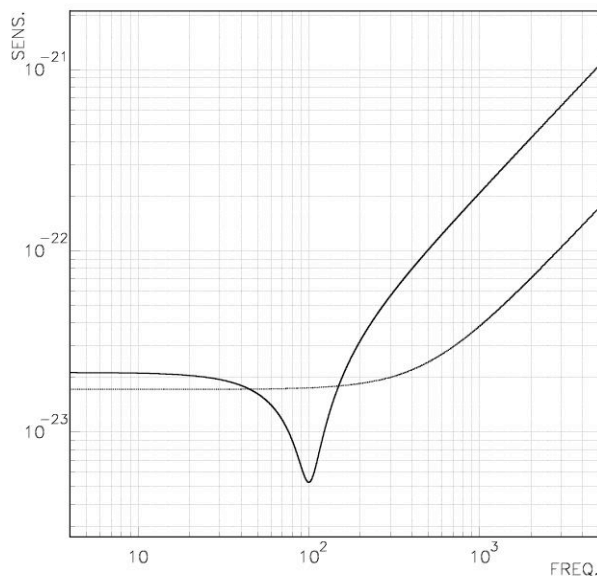


Fig. X2 : sensibilité (bruit de photons uniquement) d'un interféromètre à recyclage du signal. Pour comparaison est aussi rappelée la sensibilité d'un interféromètre à recyclage simple. Les paramètres optiques dans les deux cas sont les mêmes : puissance laser de 20W, finesse des cavités kilométriques de 50 et facteur de recyclage de puissance de 50. Dans le cas du recyclage du signal, la cavité est asservie sur la fréquence  $f=100\text{Hz}$ , et la réflectivité du MSR est  $r_d=0.95$  (et fixe la largeur de bande). Echelle horizontale : fréquence en Hz. Echelle verticale : sensibilité ( $1/\text{Hz}^{1/2}$ ).

L'impact du recyclage du signal dépend donc de l'amélioration du reste de la sensibilité, c'est à dire essentiellement du bruit thermique. On peut imaginer deux scénarios, un scénario d'upgrade raisonnable de VIRGO et un scénario plus ambitieux d'un détecteur cryogénique (VIRGO2 ?). Dans le premier scénario, l'utilisation de suspensions monolithiques, permet en gros de gagner un ordre de grandeur sur le bruit thermique pendulaire et un facteur 3 sur le bruit thermique interne des miroirs. Dans le second cas, le passage à un détecteur

cryogénique permet de gagner plus de deux ordres de grandeur sur l'ensemble du bruit thermique.

configuration	SNR (SN)	SNR (NS-NS)	SNR (BH-BH)
VIRGO	9	20	88
VIRGO FS	15	61	300
+ SR optimisation SN (f=300Hz,rd=0.70)	<b>16.5</b>	59	289
+ SR optimisation CB (f=0Hz,rd=0.5)	14	<b>66</b>	<b>327</b>
VIRGO CRYO	17	214	1095
+ SR optimisation SN (f=300Hz,rd=0.98)	<b>26</b>	67	315
+ SR optimisation CB (f=300Hz,rd=0.98)	4	<b>492</b>	<b>2530</b>

Table T1 : Rapports signal/bruit pour différentes configurations et différentes sources d'OG. VIRGO : détecteur dans sa version initiale. VIRGO FS : même caractéristiques que VIRGO mais avec des suspensions monolithiques. VIRGO CRYO : idem mais cryogénique. Dans chaque cas le système laser est supposé identique. Si le recyclage du signal est utilisé, on donne les SNR correspondant aux types de source (et les paramètres optimisés fréquence de résonance de la cavité et réflectivité du miroir MSR). Les trois types de source correspondent à : supernova (SN) à 10 kpc tirée du catalogue de signaux simulés de Zwerger et Müller, et deux types de coalescences de binaires (CB) situées à 10 Mpc, soit composées de deux étoiles à neutrons (NS) de 1.4 Msol chacune, soit composées de deux trous noirs (BH) de 10 Msol chacun.

Sur la table T1, on peut voir tout le bénéfice qu'on peut tirer des améliorations du bruit thermique et du rôle que peut jouer alors le recyclage du signal. En particulier, dans le cas d'un interféromètre cryogénique (de seconde génération), le gain de détection peut être énorme. Si l'on ne prend que l'exemple des coalescences de deux trous noirs, la technique de recyclage du signal permet de gagner plus d'un facteur 2 sur le SNR et donc le même facteur sur la distance limite de détection (qui est cosmologique dans le cas cryogénique). Ceci se traduit par un ordre de magnitude gagné pour le taux d'événements.

A plus court terme (upgrades de VIRGO), on peut aussi s'intéresser au bénéfice que l'on pourrait tirer du recyclage du signal. Dans ce cas, le détecteur est en fait limité par le bruit de photons qu'à autre fréquence, et le recyclage du signal ne peut donc être effectif que dans cette bande de fréquences. On peut voir globalement l'impact du recyclage à haute fréquence sur la figure X3. Par exemple, l'utilisation du recyclage du signal accordé sur 3 kHz (un trou noir de Kerr de 10 Msol en rotation maximale résonne précisément à 3 kHz) permettrait à VIRGO dans sa configuration initiale de gagner un ordre de grandeur en sensibilité (évidemment à 3 kHz). Le gain de sensibilité serait encore plus grand à plus haute fréquence

et, a fortiori, dans l'optique d'un upgrade à court terme utilisant les suspensions monolithiques (VIRGO FS).

Un autre aspect du recyclage du signal concerne la possibilité d'améliorer le contraste de l'interféromètre. En effet, on peut aussi voir l'implémentation du recyclage du signal comme l'adjonction d'une cavité supplémentaire qui peut donc filtrer les modes d'ordre supérieur qui autrement « pollueraient » la frange noire. Ceci permettrait donc de limiter les pertes de sensibilité à haute fréquence (où la sensibilité est limitée par le bruit de photons) dues aux imperfections des optiques de l'interféromètre.

La technique du RSE (Resonant Sideband Extraction) est une variante du recyclage du signal. La topologie est la même et ce qui diffère est la finesse des cavités kilométriques des bras qui du coup doit être de l'ordre du millier et non plus d'une centaine. Le rôle de la cavité de recyclage n'est alors plus de recycler les bandes latérales dues au signal d'OG, mais au contraire de les extraire des cavités kilométriques à haute finesse où elles sont en fait stockées, en tirant partie des propriétés des cavités couplées. L'intérêt de cette configuration est qu'à sensibilité (limitée par le bruit de photons) équivalente, il n'est pas besoin d'autant de puissance lumineuse au niveau de la séparatrice. Par conséquent le recyclage de puissance n'est même pas indispensable pour atteindre une bonne sensibilité (le manque de puissance est compensé par l'augmentation des longueurs optiques dans les bras). C'est une configuration intéressante par exemple si les effets thermiques dans la lame séparatrice deviennent limitants.

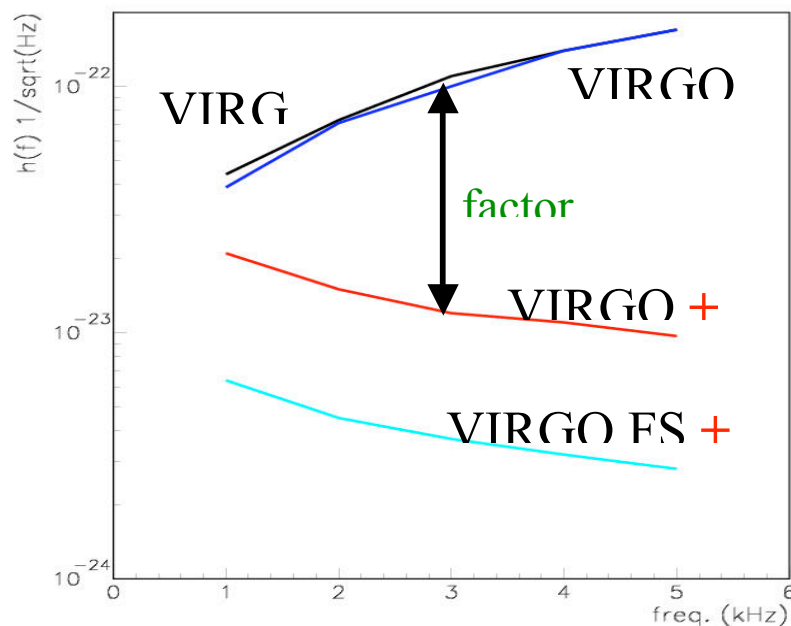


Fig. X3 : sensibilité optimisée à chaque fréquence pour différentes configurations. Dans le cas de VIRGO (à sa sensibilité nominale), le gain en sensibilité dépasse le facteur 10 à partir de 3kHz (ce qui correspond à un facteur 1000 pour le taux d'événements).

### 2.2.1.1 Autres configurations

L'interféromètre de Sagnac est une alternative au schéma de Michelson. Dans cette configuration, les deux faisceaux qui interfèrent ont effectué chacun un aller retour dans chacun des bras, mais dans deux directions de propagation opposées (voir figure X4).

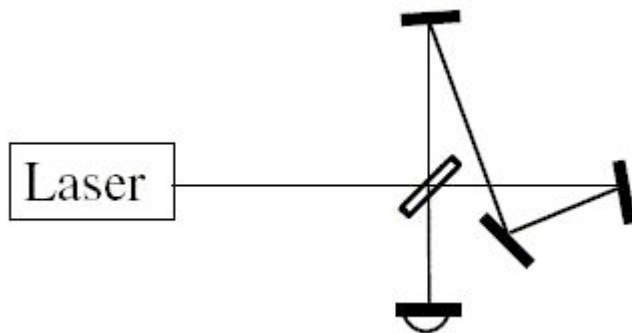


Fig.X4 : schéma de l'interféromètre de Sagnac.

L'intérêt premier de cette configuration se situe au niveau du contrôle. En effet, l'interféromètre de Sagnac est très peu sensible aux variations de longueur à basse fréquence, à cause de la symétrie des trajets des deux faisceaux interférant.

En ce sens, l'interféromètre de Sagnac est naturellement « locké » et on n'a pas besoin de système d'asservissement (contrôles locaux et contrôle global) aussi sophistiqué que pour le détecteur interférométrique traditionnel. On remarque ainsi sur la figure X5 que la réponse de l'interféromètre est effectivement nulle en DC, alors qu'elle est maximale pour l'interféromètre de Michelson. Une autre conséquence de cette symétrie intrinsèque de l'interféromètre de Sagnac est qu'il est beaucoup moins sensible au bruit de fréquence de la source LASER que ne l'est le Michelson.

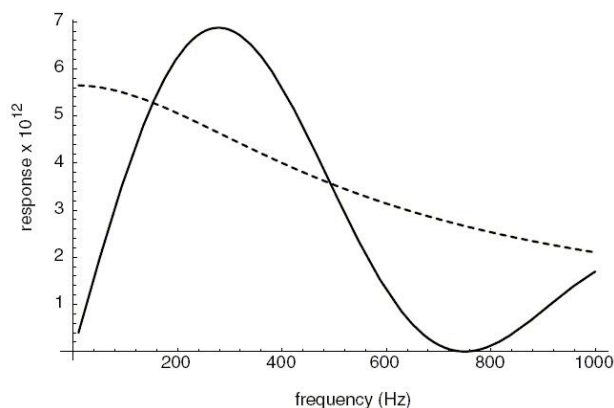


Fig.X5 : réponse de l'interféromètre de Sagnac (avec des lignes à retard – 50 rebonds- dans les bras de 4 km) comparée à celle du Michelson traditionnel (traits pointillés).



Mais l'interféromètre de Sagnac semble limité aux détections haute fréquence (>200 Hz) car il sera difficile de compenser la perte de sensibilité aux fréquences inférieures.

### 2.3 Technologie optique

La principale limitation à la sensibilité des antennes gravitationnelles interférométriques est actuellement le bruit thermique dans les miroirs, c'est-à-dire l'agitation de la matière à la température ambiante. Plus exactement, le bruit thermique provient du couplage de l'onde optique stockée dans les cavités avec la surface mouvante des miroirs. Ce couplage dépend du profil des faisceaux stockés. Jusqu'à présent, on s'est borné à utiliser des faisceaux gaussiens de type TEM<sub>00</sub>, obtenus classiquement par des grandissements d'un faisceau laser. Le profil gaussien n'est pourtant pas optimal, du point de vue du couplage au bruit thermique. Il vaudrait mieux disposer d'un faisceau mieux réparti sur la surface du miroir. Un tel profil plat peut être obtenu en modifiant la forme des miroirs, et en abandonnant la géométrie sphérique. On a pu montrer que certains profils en forme de fond d'assiette produisent des faisceaux plats. Encore faut-il être capable de produire ces profils. La technologie de coating correctif peut permettre d'atteindre cet objectif, et il est prévu de mener une étude de R&D sur ce thème. Par ailleurs, la détérioration du facteur de qualité mécanique des substrats par le processus de coating est encore mal connu. Il est indispensable de comprendre comment les couches diélectriques déposées sur un substrats dissipent l'énergie élastodynamique.

Une autre idée pour les futures générations de détecteur serait d'utiliser des optiques exclusivement réfléchives. L'intérêt est double. Tout d'abord, comme il est prévu d'augmenter les puissances lumineuses circulant dans les futurs détecteurs, les effets thermiques risquent d'être un facteur limitant. Ceux ci se manifestent car les optiques absorbent de la puissance lumineuse et, comme le profil des faisceaux lumineux est en première approximation gaussien, une conséquence est l'apparition de gradients de température et donc de gradients d'indice dans les miroirs. Ces lentilles thermiques vont dégrader le contraste de l'interféromètre ou même être à l'origine d'un nouveau bruit. Pour s'en affranchir, il «suffit» donc, après avoir amené la technologie des coatings à une absorption bien moindre que le ppm, d'empêcher la lumière de traverser les optiques. Le second point est que si il n'est plus nécessaire d'utiliser des matériaux transparents pour les substrats des masses-test, on peut se tourner vers des matériaux aux propriétés mécaniques intéressantes pour diminuer le bruit thermique. Le Silicium est un choix possible d'un tel matériau.

Alors comment remplacer la lame séparatrice ou les miroirs d'entrée des FP kilométriques par des optiques réfléchives ? Simplement par l'utilisation de réseaux en réflexion dont on peut utiliser les différents ordres pour séparer différents faisceaux.. Sur la figure X6 on peut voir un schéma possible de cavité FP utilisant un tel principe.

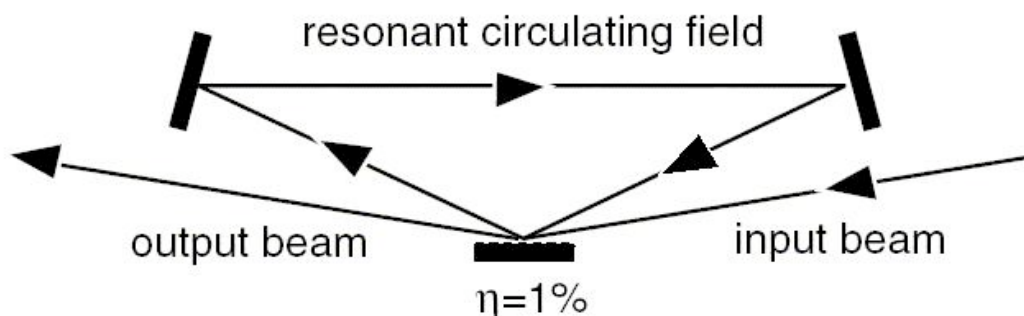


Fig.X6 : principe d'une cavité FP n'utilisant que des optiques en réflexion. On note la présence du réseau en réflexion qui remplace en quelque sorte le miroir d'entrée d'une cavité FP traditionnelle.

Remarquons que les optiques réfléchives ne sont potentiellement intéressantes que si l'absorption dominante est dans le matériau massif. De façon générale, compte tenu du stockage d'énergie dans les cavités Fabry-Perot, il y a aujourd'hui plus d'énergie absorbée dans les coatings que dans les substrats.

Bibliographie sommaire:

B.J. Meers, Recycling in laser-interferometric gravitational wave detectors, *Phys. Rev. D* **38**, 2317 (1988).

D.E. McClelland et al., Tolerance of dual recycling interferometric gravitational wave detectors to mirror tilt and curvature errors, *Phys. Rev. D* **48**, 5475 (1993).

J. Mizuno et al., Resonant sideband extraction : a new configuration for interferometric gravitational wave detectors, *Phys. Lett. A* **175**, 273 (1993).

J. Mizuno, Comparison of optical configurations for laser interferometric gravitational wave detectors, These (MPI, Garching, 1995).

P.T. Beyersdorf, The polarization Sagnac interferometer for gravitational wave detection, These (Stanford, 2001).

Il est aussi possible de trouver un meilleur compromis en changeant à la fois de lasers et de matériaux optiques. Par exemple, il semble prometteur d'augmenter un peu la longueur d'onde optique aux alentours de  $1.5 \mu\text{m}$ , pour bénéficier à la fois de la technologie laser développée pour les télécommunications, et de la possibilité d'utiliser des composants optiques en Silicium, préférables à la silice du point de vue du bruit thermique, et très transparents. Un effort important de R&D reste nécessaire pour comparer et valider ces choix

#### 2.4. Approches quantiques des interféromètres

La limite actuelle de sensibilité des interféromètres à OG est due à l'agitation thermique dans les miroirs. Cette limite n'est pas fondamentale, car d'autres matériaux, d'autres modes de suspension et des températures plus basses peuvent la faire disparaître d'une façon technologique. Toutefois subsistent des limites imposées par la nature quantique du rayonnement des lasers « ordinaires ». Ces limites sont d'une part le bruit de photons, dû à la statistique poissonnienne de l'émission cohérente, et d'autre part au bruit de pression de radiation, qui a la même cause et qui se traduit par des fluctuations de pression sur les miroirs. Ces miroirs sont suspendus librement et traduisent ces fluctuations de pression par des fluctuations de position. Depuis des décennies, on propose des méthodes pour contourner ses limites, soit en introduisant des sources lumineuses ayant une statistique d'émission sub-poissonnienne, soit en corrigeant par feed-back les effets des fluctuations quantiques.

L'équipe *Mesure et Bruits Fondamentaux* du Laboratoire Kastler Brossel (P.F. Cohadon, J.M. Courty, A. Heidmann, M. Pinard) s'intéresse aux bruits fondamentaux dans les mesures optiques de très grande sensibilité, et aux limites associées à ces bruits. Les physiciens de ce groupe étudient en particulier les limites de sensibilité induites par les bruits classiques et

quantiques dans les antennes gravitationnelles, telles que l'interféromètre VIRGO ou de nouveaux types de détecteurs basés sur des résonateurs doubles. Ils ont développé une expérience capable de détecter les déplacements d'un miroir à l'échelle de l'attomètre ( $10^{-18}$  m), ce qui leur a permis d'observer et de caractériser le bruit thermique interne des miroirs. Ils ont également refroidi le miroir à l'aide d'un mécanisme de contrôle actif basé sur la pression de radiation exercée par un faisceau laser sur le miroir.

Alessandra Buonanno (IAP-APC) a également étudié en détail les principes du recyclage de signal dans une approche quantique incluant la pression de radiation. En collaboration avec Y. Chen, elle a produit durant sa collaboration avec LIGO des résultats utiles pour la conception du LIGO-avancé.

Battre les limites quantiques :

Sur le plan théorique, l'équipe du LKB s'intéresse aux limites quantiques fondamentales dans les mesures optiques. Elle a ainsi proposé de réduire ces limites dans les détecteurs interférométriques à l'aide d'un dispositif très simple de contrôle actif du bruit de pression de radiation. Ses objectifs expérimentaux consistent à améliorer la sensibilité de son expérience de façon à observer les déplacements induits par les fluctuations quantiques de la pression de radiation. Ceci permettra de mener pour la première fois une étude expérimentale des limites quantiques dans les interféromètres, et de tester les possibilités de réduction de ces limites. Elle compte développer également une nouvelle expérience pour étudier et contrôler les bruits thermiques et thermoélastiques dans le domaine de fréquence des antennes gravitationnelles.

D'un point de vue théorique, son objectif est d'étudier précisément le bruit quantique dans les interféromètres gravitationnels et les possibilités de le réduire. Il s'agit de développer un modèle numérique complet du bruit quantique de VIRGO en s'appuyant sur sa connaissance des systèmes modèles. Avec cet outil théorique, elle sera en mesure de comparer dans des configurations réalistes de fonctionnement les solutions proposées actuellement pour battre le bruit quantique dans les interféromètres de la prochaine génération.

Références:

P.F.Cohadon et al. Phys. Rev. Lett. 83, 3174 (1999)

A. Buonanno et al. Phys. Rev. D67 (2003) p.122005

“*Optical phase-space reconstruction of mirror motion at the attometer level*”, T. Briant, P.F. Cohadon, M. Pinard, and A. Heidmann, Eur. Phys. J. D **22**, 131 (2003)

“*Quantum locking of mirrors in interferometers*”, J.M. Courty, A. Heidmann, and M. Pinard, Phys. Rev. Lett. **90**, 083601 (2003)

### 3) Détecteurs terrestres : Analyse des données

#### 3.1 La recherche des sources brèves d'ondes gravitationnelles

##### 3.1.1 Introduction

Cette recherche couvre plusieurs types de sources d'ondes gravitationnelles : effondrement d'étoiles massives, fin de la phase de coalescence de deux objets compacts, oscillations de trous noirs nouvellement créés, instabilités dues à la rotation dans les étoiles à neutrons. La forme d'onde du signal n'est pas précisément connue. La principale caractéristique de ces signaux est leur courte durée : quelques dizaines de milli-seconde. Ils présentent donc un large spectre en fréquence (quelques centaines de Herz) allant de quelques centaines de Herz à plusieurs kilo-Hertz.

La variété du type de ces sources conduit à envisagé une grande variété de technique d'analyse de traitement du signal :

- Filtrage robuste dans le domaine temporel
- Filtrage robuste dans le domaine fréquentiel
- Filtrage de Wiener pour la recherche des oscillations de trous noirs
- Méthode temps-fréquence

Le fait que la forme d'onde ne soit pas assez bien connue a conduit les expérimentateurs à développer depuis la fin des années 90 des méthodes de filtrage robustes à la forme exacte de l'onde. Ces filtres (catalogue d'une dizaine) font tous une hypothèse sur la durée du signal. Ainsi donc, la largeur de la fenêtre d'analyse est bien souvent le seul paramètre libre de la plupart de ces filtres ce qui limite grandement le temps de calcul nécessaire pour effectuer cette recherche. Dans le cas de la recherche des oscillations de trous noirs (QNM), l'espace des paramètres est à 2 dimensions (sinusoïdes amorties), mais le nombre de patrons utilisés reste très limité (inférieur à 1000) par comparaison avec les autres sources d'ondes gravitationnelles pour lesquelles l'espace des paramètres est nettement plus grand.

##### 3.1.2 Recherches à court terme

Les années prochaines seront en grande partie consacrées à la recherche des OG dans les données enregistrées dans les différents détecteurs. Il est déjà apparu que le bruit possède une composante non stationnaire et ne suit pas parfaitement une statistique Gaussienne. Dans le cas des signaux de courte durée cela rend d'autant plus difficile la découverte que l'on ne connaît pas très bien la forme d'onde recherchée. Seule une analyse en réseau avec plusieurs détecteurs permettra de rejeter des faux candidats de manière ultime. Deux types d'analyse sont prévus [ARNAUD]:

- Analyse en coïncidence : on demande que l'événement soit vu dans différents interféromètres (coïncidence double, triple, quadruple, ...). Du fait de l'orientation des différents détecteurs actuels (seulement les détecteurs de LIGO sont alignés) et de leur répartition géométrique dans le monde, il apparaît que les coïncidences triple ne sont pas très probables (13 % pour le réseau LIGO Hanford + LIGO Livingston + Virgo, un signal de SNR 10 et pour un taux de fausse alarme de 1 par an avec les courbes de sensibilité attendue). Un paramètre essentiel dans l'analyse en réseau est le nombre de d'interféromètres. Si on veut faire des coïncidences il faut que les détecteurs aient relativement la même orientation, mais si on veut couvrir toutes les directions du ciel,

il faut pour cela orienter de manière différente les interféromètres. Il faut donc un réseau contenant plus des 6 interféromètres en construction actuellement.

- Analyse cohérente : il s'agit de « sommer » la sortie des détecteurs et ensuite d'appliquer un seuil sur la sortie du filtre. Cette analyse est plus performante que la simple analyse en coïncidence des événements sélectionnés par chaque détecteur car toute l'information du signal dans les détecteurs est prise en compte (55% à comparer au 12% de l'analyse coïncidente) mais en plus lourde à mettre en œuvre. De plus, étant donné qu'on ne connaît pas la position de la source dans le ciel il faut utiliser plusieurs patrons de filtre pour faire la recherche, mais le nombre de patrons reste raisonnable (jusqu'à 6000 patrons dans le cas d'une recherche avec 6 interféromètres) et donc ce genre d'analyse ne semble pas nécessiter d'importants moyens de calcul.

Il est à noter que les méthodes de traitement du signal « temps-fréquence » n'ont jusqu'à présent été assez peu mises en œuvre [SYLVESTRE]. En effet, il existe une variété de transformation temps-fréquence qui n'a jamais été étudiée pour la recherche des ondes gravitationnelles brèves. Il s'agit d'une voie à explorer dans les prochaines années.

### **3.2 L'analyse de coalescences binaires d'objets compacts :**

Au cours des prochaines années, la recherche de signaux provenant de coalescences binaires d'objets compacts devrait être centrée sur la recherche des tout premiers événements. Pour cela, il faudra multiplier les méthodes mises en œuvre afin de maximiser les chances de détection. Ceci passera entre autres par la multiplication des modèles et paramètres utilisés pour le calcul des trains d'ondes attendus (prise en compte de la rotation des objets, de l'excentricité résiduelle, recherche d'objets de faible masse, utilisation de différentes techniques numériques...) ainsi que par la mise en œuvre d'algorithmes plus robustes au prix d'une efficacité moindre. En parallèle à cet effort propre à chaque détecteur, il faudra mettre en place l'analyse commune et cohérente des données provenant de différents détecteurs afin, dans un premier temps, d'augmenter les chances de détection ainsi que la confiance dans le signal observé.

Après les premières détections, l'analyse de signaux provenant de coalescences binaires devrait prendre plusieurs directions. Tout d'abord, la comparaison des signaux observés avec les différentes prédictions devrait nous permettre de choisir et valider les modèles décrivant le mieux les sources. L'amélioration future de la sensibilité des détecteurs permettra d'obtenir des informations plus précises sur chacune des phases de la coalescence qui deviendra ainsi un laboratoire privilégié pour l'étude de la gravitation en champ fort. L'étude des taux d'événements, de leurs différents paramètres et de la fin de la coalescence devrait permettre une exploitation astrophysique des données recueillies. Enfin, avec un nombre croissant d'événements, il faudra développer l'interprétation cosmologique des données, en particulier pour les coalescences de trous noirs qui devraient être de bonnes 'chandelles standards'.

### **3.3 La recherche des sources continues d'ondes gravitationnelles**

#### **3.3.1 Introduction**

Il s'agit de rechercher une émission continue d'ondes gravitationnelles émises par des étoiles à neutrons en rotation rapide (pulsar). Pour qu'il y ait émission d'ondes gravitationnelles il faut que l'étoile à neutrons soit tri axiale ou que ses axes de symétrie ne coïncident pas avec l'axe de rotation. La fréquence des ondes gravitationnelles est une et/ou deux fois la fréquence

de rotation du pulsar. La fréquence principale peut être modulée par des effets de précession. Le dénombrement des pulsars de la Galaxie fait l'objet d'une intense recherche (projet Multibeam Survey) [PARKES]. On connaît à l'heure actuelle un peu plus de 2600 pulsars galactiques. La grande majorité de ceux-ci ont des périodes de l'ordre de la seconde (pulsars normaux). Une plus petite quantité a une période située entre 1.5 et 30 ms (pulsars « millisecondes »). Cette dernière population contient des pulsars dont l'augmentation de la période (spindown) est beaucoup plus faible que celle des pulsars normaux ( $dP/P = 10^{-19}$  au lieu de  $10^{-15}$ ). Il s'agit des pulsars anciennement créés qui accrètent de la matière d'un compagnon. 80% environ des pulsars « millisecondes » connus appartient à un système binaire ce qui a des conséquences pour l'analyse [LORIMER]. Cela est d'autant plus remarquable qu'il s'agit des pulsars qui rentrent dans la bande de fréquence de détection des interféromètres.

Par ailleurs, l'ellipticité de l'étoile à neutron est un paramètre très mal connu qui conditionne entièrement le potentiel de découverte. L'amplitude des OG est proportionnelle à l'ellipticité. Les pulsars « millisecondes » ont une ellipticité assez faible ( $<10^{-8} - 10^{-9}$ )

La première génération des interféromètres Virgo et LIGO sera sensible à des ellipticités descendant jusqu'à  $10^{-6}$ . Le gain obtenu sur la sensibilité de la prochaine génération de détecteur (au moins un ordre de grandeur sur toute la gamme de fréquence) permettra de sonder des valeurs de l'ellipticité des pulsars que les dernières estimations théoriques considèrent comme réalistes ( $10^{-7}$ ) [CUTLER].

Pour la détection dans les interféromètres plusieurs stratégies sont à envisager :

- La détection individuelle des OG émises par un pulsar en considérant un ensemble très grand de paramètres : fréquence, spindown, position dans le ciel, phase, ...
- La détection du fond de rayonnement gravitationnel émis par l'ensemble des pulsars [GIAZOTTO]. La recherche du fond de rayonnement émis par l'ensemble des pulsars consiste à chercher une modulation du signal liée à l'anisotropie de la distribution spatiale des pulsars. Le signal recherché est la somme quadratique des rayonnements émis par chaque pulsar. En fait, seuls 1 ou 2 pulsars contribuent au signal (les plus rapides et les plus proches). Cette méthode n'apporte donc pas beaucoup par rapport à la recherche individuelle.

### 3.3.2 Recherche à court terme

Si la forme d'onde du signal recherché est simple, l'amplitude reste très faible. Pour que le rapport signal sur bruit devienne non négligeable pour la première génération de détecteur il faut considérer des périodes très longues de données (~année). Il faut alors tenir compte de la modulation du signal par l'effet Doppler lié au mouvement de rotation propre de la Terre et de son mouvement de rotation autour du Soleil dans le cas d'un pulsar isolé. Dans le cas d'un pulsar binaire l'effet Doppler engendré par le mouvement du pulsar autour de l'autre objet compact domine les deux autres contributions.

Jusqu'à présent, les différentes méthodes de recherche individuelle des OG émises par un pulsar sont toutes basées sur la recherche d'une courbe périodique (décalage Doppler du signal monochromatique et prise en compte du spindown de l'étoile à neutrons) dans un plan temps-fréquence qui est la juxtaposition de périodogramme effectué sur un ensemble de données dont la taille est choisie de telle sorte que la fréquence du signal est entièrement contenue à l'intérieur d'un bin de fréquence. La mise en évidence de cette courbe fait appel à des techniques telles que la transformation de Hough et/ou de Radon qui sont coûteuses en temps de calcul. Cette étape est appelée « incohérente » par opposition à la première étape cohérente où on applique une transformée de Fourier.

La recherche individuelle des OG émises par un pulsar pose donc un réel problème de moyens de calcul : la recherche « en aveugle » d'un an de données nécessitent  $10^{14}$  Tflops [FRASCA]. De ce constat plusieurs voies sont envisagées à court terme:

- Recherches « ciblées » du rayonnement émis par des sources dont on connaît la position et la fréquence.
- Recherche « en aveugle » restreinte au disque de la Galaxie puisqu'on s'attend à ce que 90% des pulsars soient dans le disque.
- Recherches « en aveugle » hiérarchiques [FRASCA] : cette recherche itérative des candidats est sous-optimale mais en fait la perte d'un éventuel signal est limitée par rapport au cas de la recherche sur l'ensemble de l'espace des paramètres car afin de limiter le taux de fausses alarmes il serait nécessaire de travailler avec des seuils élevés. La première étape cohérente consiste à estimer une database contenant les transformées de Fourier de vecteurs de données de courte durée pour 4 bandes de fréquence (afin de réduire le volume de données à stocker en mémoire). La deuxième étape (incohérente) consiste à rechercher dans les plans temps-fréquences des modulations de fréquence correspondant à l'effet Doppler puis à sélectionner un certain nombre de candidats. Cette procédure est ré-appliquée plusieurs fois avec plus de précisions à chaque fois (à la fin la totalité du temps d'observation est inclus), mais en limitant la recherche aux candidats sélectionnés le temps de calcul reste raisonnable. Une attention toute particulière est portée sur une implémentation optimale des transformées de Hough et de Radon afin de limiter le temps de calcul à la première itération. Cet effort est poursuivi dans le cadre d'une collaboration qui inclut des groupes de GEO600, LIGO et Virgo. Finalement, notons que « la perte de signal » par l'utilisation des méthodes hiérarchiques a été estimée en comparant, à un SNR donné, l'amplitude du signal détecté par la méthode hiérarchique par rapport à la recherche optimale : on obtient un facteur 2 en moyenne sur l'amplitude du signal [Palomba].

### 3.4 La recherche du bruit de fond stochastique d'ondes gravitationnelles

#### 3.4.1 Introduction

La recherche du rayonnement stochastique d'ondes est d'autant plus intéressante que sa nature cosmologique donnera des informations sur les premiers instants de l'Univers. En effet on s'attend à ce qu'une composante du rayonnement stochastique soit formée des ondes gravitationnelles émises lors du Big-Bang et que ces ondes arrivent jusqu'à nous sans altération depuis le moment du découplage des gravitons avec la matière (Planck time  $\sim 10^{-43}$ s), c'est à dire bien avant le découplage des photons. L'estimation de la densité d'énergie des ondes gravitationnelles d'origine cosmologique est très incertaine (dépendance en fonction des modèles) et très spéculative [ALLEN].

En revanche, l'autre composante astrophysique au rayonnement stochastique constituée de la somme des ondes émises par les sources astrophysiques (pulsars, systèmes binaires, désexcitations de trous noirs, instabilités des étoiles à neutrons en rotation (modes r, mode barre)) peut être grossièrement estimée si on a un modèle de répartition des sources dans l'Univers. Les prévisions actuelles [REGIMBAUa] donnent une valeur du paramètre sans dimension  $\Omega_{gw} = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{gw}}{d\log\nu_0}$  (où  $\rho_{gw}$  est la densité d'énergie des ondes gravitationnelles) entre  $10^{-9}$  et  $10^{-11}$  où la contribution des étoiles à neutrons égale pratiquement celle modes normaux des trous noirs [FERRARI].

L'amplitude des ondes gravitationnelles est reliée à  $\Omega_{gw}$  par la relation :

$$h(f) = 3 \cdot 10^{-20} \frac{H_0}{H_{100}} \sqrt{\Omega(f)} \frac{100 \text{ Hz}}{f}$$

où  $H_0$  est la constante de Hubble et  $H_{100} = 100 \frac{\text{km}}{\text{sec Mpc}} = 3.24 \times 10^{-18} \text{ Hz}$ .

### 3.4.2 Recherche à court terme

La recherche de ce rayonnement se fait en corrélant les données des différents détecteurs car contrairement au bruit de fond stochastique de photons (CMB) le rayonnement est isotrope et ne peut être distingué du bruit de fond. La corrélation prend en compte l'orientation relative des détecteurs et leur courbe de sensibilité. Pour ce genre d'analyse il est avantageux de corréler la sortie de détecteurs qui sont alignés et proches l'un de l'autre pour avoir le maximum de rapport signal sur bruit. La figure 1 montre la fonction de recouvrement des deux détecteurs LIGO en fonction de la fréquence : cette fonction indique la réduction de la sensibilité à un signal (fonction sans dimension qui varie entre 0 et 1).

Les limites actuelles venant d'autres observations (CMB, chronométrage des temps d'arrivée des impulsions des pulsars, limites directes mises par les antennes résonnantes) ne permettent pas de contraindre la valeur de  $\Omega_{\text{gw}}$  dans la bande de fréquence de détection des interféromètres.

Il est certain que la première génération de détecteur n'aura pas la sensibilité pour voir un signal : un rapport signal sur bruit optimal de  $10^{-3}$  est attendu dans le meilleur des cas (corrélation entre les deux détecteurs LIGO d'un an de données). En revanche l'amélioration de la sensibilité prévue pour la seconde génération de détecteurs permettra d'obtenir de tester des rapports signal sur bruit de l'ordre de 3. [REGIMBAUb]

Pour réduire la perte de rapport signal sur bruit due à l'éloignement des détecteurs et à leur mauvais alignement il est envisagé à moyen et long terme de faire des corrélations avec d'autres types de détecteurs tels que les antennes résonnantes placées à côté d'un interféromètre à condition que ces antennes aient la sensibilité suffisante et la largeur de bande nécessaire. Les efforts de R&D sur les antennes sphériques vont dans ce sens [ref Cerdonio]

## Bibliographie

[ARNAUD] N. Arnaud *et al*, PRD **68**, 102001 (2003)

[SYLVESTRE] J. Sylvestre, PRD **66**, 102004 (2002)

[PARKES] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar>

[LORIMER] D. R. Lorimer, *Binary and millisecond pulsars at the new millennium*, Living Reviews in Relativity, June 2001. <http://www.livingreviews.org>

[CUTLER] C. Cutler, K. S. Thorne, an overview of gravitational-wave sources, submitted to World Scientific, gr-qc/0204090

[GIAZOTTO] A. Giazotto, S. Bonazzola, E. Gourgoulhon, PRD **55**, 2015 (1997)

[FRASCA] S. Frasca, *Rome all-sky search for periodic sources*, GWDAW 4 proc, Int. J. Mod. Phys. **D 9** (2000) 369-372

[PALOMBA] L. Brocco *et al*, The search for continuous sources in the Virgo experiment. Full sky incoherent step: 'local' and 'grid' tests, GWDAW 7 proc, Class. Quantum Grav. **20** (2003) S655-S664



[ALLEN] B. Allen, *The stochastic gravity-wave background: sources and detection*, Les Houches School on Astrophysical Sources of Gravitational Waves proceedings, 1996, gr-qc/9604033

[REGIMBAUa] T. Regimbau, J.A. de Freitas Pacheco, A&A astro-ph/0105260

[REGIMBAUb] T. Regimbau, *Etoiles à neutrons et ondes gravitationnelles*, Thèse de l'Université Nice-Sophia Antipolis (2001)

[FERRARI] V. Ferrari, S. Matarrese, R. Schneider, MNRAS 303 (1999) 247

## 4) Détecteurs spatiaux : technologie

### 4.1 Technologie pour LISA

La définition de la mission LISA n'est pas encore dans un état de stabilité tel qu'aucune R&T ne puisse plus être envisagée. Deux types de développement sont encore pertinents. Le premier concerne les accéléromètres dont l'ONERA a la maîtrise de principe et l'expérience en vol. Le second concerne les lasers stabilisé en fréquence.

#### 4.1.1

Accéléromètres : Les accéléromètres qui seront embarqués dans le vol de démonstration LISA Pathfinder (ex SMART2) seront produits d'une part par un groupe de Stanford supporté par la NASA dans un package « Disturbance Reduction System » développé au JPL, et d'autre part par l'Université de Trente, associée à l'ONERA dans un package « LISA test Package » développé par l'ESA. Le résultat de la mission sera en principe le juge qui permettra de savoir quelle technologie sera préférée. Il est donc essentiel de pouvoir être en mesure de proposer un instrument à cette échéance. L'ONERA devrait être mis en situation de préparer cet effort.

L'ONERA possède un savoir-faire reconnu en accélérométrie spatiale avec les trois missions réalisées sur Shuttle (vols Columbia 96 et 97), sur satellite CHAMP (lancement juillet 2000) et sur satellites GRACE (lancement mars 2002). Ce savoir-faire se développe encore avec la réalisation des accéléromètres électrostatiques tri-axiaux du gradiomètre gravifique de la mission GOCE de l'ESA (Observation de la Terre) et celle de la charge utile de la mission MICROSCOPE du CNES pour le test du Principe d'Equivalence.

L'ONERA dès l'origine de la mission LISA au sein de l'Agence Spatiale Européenne a participé au concept de la mission et à la définition du capteur inertielle : Ron Hellings pour SAGITARIUS et Peter Bender pour LISA nous ont contacté en parallèle afin de répondre aux appels à propositions que l'ESA émettait pour la sélection des missions M3 (Mid Size Mission), avant que LISA ne soit considérée et sélectionnée comme une mission Corner Stone. Entre 97 et 2000, l'Onera a conçu et réalisé sous financement R et T du Cnes, un modèle de laboratoire du capteur inertielle de LISA. Depuis, notre participation active au capteur inertielle s'est arrêtée après la remise, en juillet 2003, à la société Carlo Gavazzi (maître d'œuvre industriel), du boîtier d'électronique pour le modèle d'identification du capteur inertielle de la mission SMART2, démonstrateur technologique de la mission LISA.

L'ONERA ne participe plus aux activités liées à LISA Pathfinder (SMART 2), faute de financement du Cnes sur ce projet.

L'ONERA reste intéressé par la mission LISA pour :

- Les senseurs inertiels (conception, réalisation, qualification), leurs caractéristiques et performances (optimisation) vis à vis de celles du satellite et de la mission, le traitement des données associé à l'élimination des signaux artefacts induits par le senseur ; mais également,
- L'aspect contrôle d'orbite et d'attitude et le vol en formation des satellites (pour lequel des accords de collaboration sont en cours avec le Cnes),
- Certains aspects du banc laser (peut-être).

L'ONERA ne pourra participer à la future mission LISA que si une équipe française s'intéresse au dépouillement des futures données de la mission et que le Cnes contribue à celle-ci. Nos contributions dans les missions GOCE et MICROSCOPE permettront de qualifier en orbite un savoir-faire nécessaire à LISA qui nous permettra peut-être d'être présents sans avoir participé à LISA Pathfinder

#### 4.1.2

Lasers : Le système de stabilisation de fréquence actuellement prévu pour la mission repose sur l'utilisation de cavités résonantes-étalons. Il est douteux, d'après certains d'entre nous, que ce choix soit le meilleur. Il existe des alternatives plus prometteuses, du point de vue spatialisation. En particulier, la stabilisation par verrouillage sur une ligne de résonance moléculaire présente une meilleure aptitude. Le groupe ARTEMIS de Nice entend poursuivre cette filière.

#### 4.2 Vol en formation

LISA est l'une des premières missions qui réclament plusieurs stations volant « en formation ». Ce concept désigne des stations dont les positions réciproques sont asservies de telle sorte que l'ensemble soit « rigide » au moins dans une certaine bande de fréquence. Ce concept se retrouve dans la plupart des grandes missions spatiales du secteur « astroparticules » et dans les missions astrométriques de l'avenir, du type DARWIN. Le CNES a lancé un appel à contributions dans ce domaine, et l'Observatoire de la Côte d'Azur propose un programme qui bénéficierait de la compétence de ses équipes en matière de transfert de temps, d'optique des lasers, d'interférométrie, de coronographie interférentielle et de traitement de données.

### **5) Détecteurs spatiaux : Analyse des données**

L'analyse des données de LISA se présente très différemment de celle des interféromètres au sol. D'abord, LISA n'est pas un interféromètre, on dispose de données « Doppler » résultant de la comparaison de la fréquence de la lumière reçue et d'un oscillateur local. Ensuite, les signaux reçus seront nombreux et intenses (binaires compactes galactiques, trous noirs supermassifs) si bien que se pose le problème de l'isolation des différentes sources, et de la superposition non-linéaire des signaux. Enfin, l'existence de trois liens bilatéraux entre stations crée une redondance qui peut être exploitée pour éliminer des bruits instrumentaux.

Le fait que les orbites des trois stations leur communiquent un mouvement de rotation global autour de leur centre de gravité qui se superpose à la révolution annuelle, ajoute à la difficulté de reconstruction du signal. Pour figurer dans l'exploitation des données, il est nécessaire de former une équipe capable de maîtriser les techniques d'extraction d'information des données Doppler. Ce travail est initié dans le groupe ARTEMIS de Nice, qui entend le poursuivre. Sur une demande de l'OCA, le CNAP a inclus dans la définition des « tâches de service des astronomes » l'analyse des données de LISA.

## **6) Conclusions**

Plusieurs domaines de recherche sont d'importance stratégique pour figurer dans la course aux ondes gravitationnelles, et devraient être soutenus :

Un effort de R&D vers les détecteurs de seconde génération :

Configurations optiques alternatives, miroirs de seconde génération, atteindre (battre) la limite quantique ... mais aussi cryogénie (un effort en ce sens est déjà lancé côté italien), domaine où l'IN2P3 et le DAPNIA ont des arguments solides.

Une implication dans LISA des groupes IN2P2/DAPNIA est peut-être à discuter. L'APC pousse par exemple dans cette direction.