

Advanced Virgo
Rapport en vue du Conseil scientifique de l'IN2P3 de février 2017
Benoit Mours (LAPP), pour les groupes Virgo de l'IN2P3
4 janvier 2017

Introduction

La séance de février du Conseil scientifique de l'IN2P3 évaluera les activités liées aux rayonnements cosmiques. Les ondes gravitationnelles ont été incluses dans ce programme, et en particulier pour Virgo il a été demandé d'aborder les trois sujets suivants :

- Déroulement de la phase de commissioning
- Observations conjointes Virgo-LIGO
- R&D et évolutions attendues de Virgo

Il s'agit donc de discuter principalement les aspects instrumentaux et observationnels d'Advanced Virgo. C'est pourquoi ce rapport est centré sur ces thèmes, sans aborder les sujets liés à l'analyse et l'exploitation des données.

Il commencera par une présentation du contexte international, puis discutera des trois sujets ci-dessus.

Le contexte historique et international

Après la phase des recherches utilisant les barres résonnantes dans les années 60 à 90, la discipline s'est tournée vers les interféromètres qui offrent une bien meilleure sensibilité, bande passante et des perspectives d'évolution bien plus prometteuses. Le projet américain LIGO qui dispose de deux instruments ayant des bras de 4km a été approuvé en 1990 par la NSF. C'est en 1993 et 94 que le projet franco-italien Virgo, qui a des bras de 3 km et est installé près de Pise, a été approuvé par le CNRS puis l'INFN.

Les instruments LIGO ont commencé à fonctionner en 2002¹, en prenant des premières données pendant des durées de quelques semaines, entrecoupées de longues périodes de mise au point de l'instrument (phases de *commissioning*) afin d'améliorer la sensibilité. En novembre 2005 LIGO a démarré sa première prise de données à sensibilité nominale (*run S5*). C'est en mai 2007 que Virgo a rejoint LIGO (*run VSR1*), avec une sensibilité qui était inférieure à celle de LIGO dans une bonne partie de la bande de fréquence mais meilleure à basse fréquence, comparable à haute fréquence et globalement suffisamment intéressante pour justifier une prise de données conjointe avec LIGO. Ce succès ainsi que la vision commune des deux projets d'une perspective de meilleurs résultats scientifique a conduit à un partage complet des données des deux collaborations et une fusion de leurs activités d'analyse des données et de publication des résultats scientifiques.

Dans la période 2007-2011 (voir Figure 1), les instruments LIGO et Virgo ont fonctionné pendant respectivement 3 ans et 1 an. La figure 2 présentant les meilleures sensibilités obtenues avec les détecteurs initiaux. Mais aucune détection n'a eu lieu, confirmant que les possibilités de détection étaient limitées avec les instruments de première génération.

¹ La sensibilité des détecteurs LIGO lors de la première prise de donnée « S1 » était réduite d'un

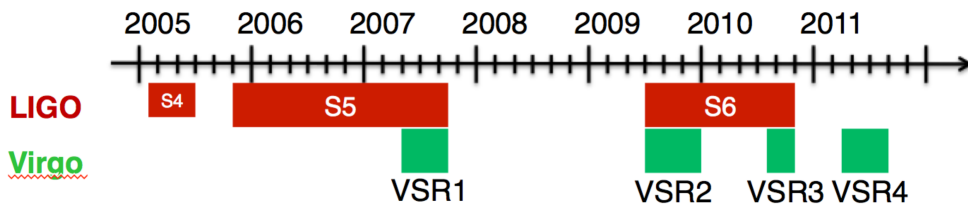


Figure 1: Représentation schématique des prises de données des instruments de première génération

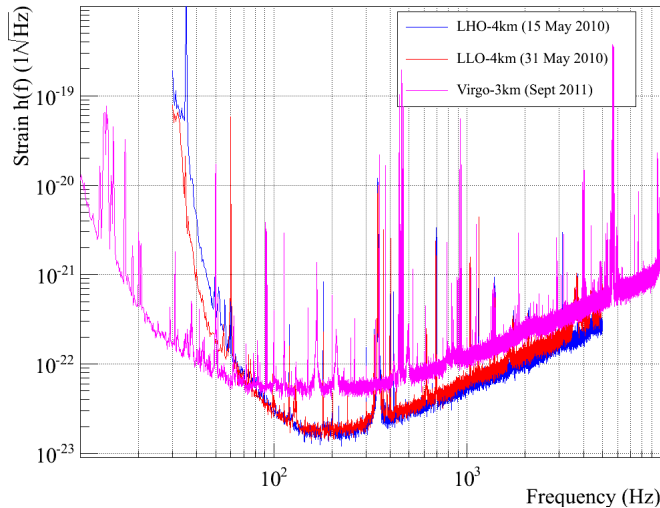


Figure 2: Sensibilité des détecteurs de première génération. La quantité représentée en fonction de la fréquence est la densité spectrale de la déformation relative de l'espace, appelée « h », soit dL/L , c'est à dire la variation de longueur divisée par la longueur. Pour des bras de 3km, une variation h de 10^{-22} correspond à une modification de la longueur des bras de 3.10^{-19} m.

Cependant, le travail accompli au cours de ces années à montré que non seulement il était possible des faire fonctionner de tels instruments à leur sensibilité nominale, mais aussi que des améliorations étaient possibles, comme cela avait été pressenti dès le début de l'aventure des grands interféromètres.

Le design d'instruments dits de deuxième génération a commencé quelques années en amont des premières prises de données, en 2001 pour *Advanced LIGO (aLIGO)* et en 2005 pour *Advanced Virgo (AdVirgo)*. Le passage de la première génération à la deuxième doit à terme permettre un gain d'un ordre de grandeur pour la sensibilité exprimée en déformation relative d'espace temps (« h »), ce qui signifie pouvoir rechercher des sources situées dix fois plus loin et donc explorer un volume mille fois plus grand. Cette évolution majeure a nécessité de multiples changements. Dans le cas de aLIGO, c'est par exemple l'intégralité du contenu des enceintes à vide qui a été remplacé. Ils seront décrits plus tard pour AdVirgo.

Suite à l'approbation du projet aLIGO par la NSF (205 M\$, coût consolidé) en avril 2008, la phase de démontage de LIGO a commencé en 2010, suivie de l'installation des nouveaux éléments d'aLIGO et de la phase de commissioning. La première prise de données a démarré en septembre 2015 (*run O1*) avec une sensibilité améliorée d'un facteur 3 à 4 (soit un volume 27 à 64 fois plus important) par rapport à LIGO initial. Cela signifie qu'une année de prise de données du détecteur initial correspond à une à deux semaines de cette version améliorée.

Grâce à ce progrès, la première prise de données d'aLIGO a permis d'observer deux signaux non ambigus de coalescence de deux trous noirs et d'annoncer l'observation d'ondes

gravitationnelles. L'analyse de ces données et la rédaction des articles correspondants a été le fruit du travail commun des collaborations LIGO et Virgo, grâce au partenariat mis en place en 2007. La première détection a fait l'objet d'une quinzaine de publications auxiliaires, détaillant principalement la physique qui découle des observations faites, que ce soit pour l'existence de trous noirs stellaires aussi massifs et les implications astrophysiques qui en découlent, mais aussi les tests de la relativité générale, ou encore l'amélioration des limites sur la masse du graviton. La Figure 3, qui présente les statistiques pour les publications de la collaboration Virgo, montrent que l'année 2016 marque un changement notable.

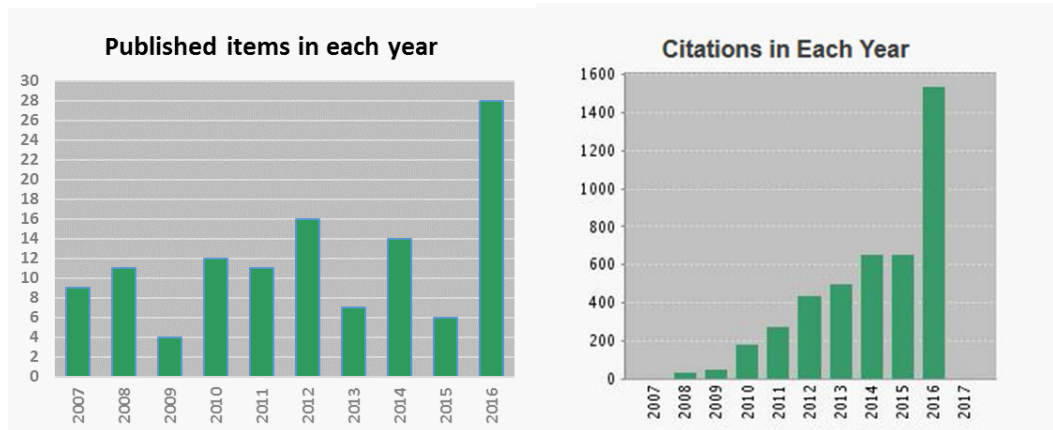


Figure 3 Nombre de publications et de citations par an pour la collaboration Virgo

Ce run O1 s'est arrêté en janvier 2016, pour une nouvelle phase de commissioning afin de rapprocher les détecteurs Advanced LIGO de leur sensibilité nominale, qui devrait être un facteur trois meilleure que celle obtenue pendant le run O1. Alors que le démarrage initial d'aLIGO avait été spectaculaire, la sensibilité obtenue étant dans la fourchette haute des prédictions faites quelques années plus tôt (voir Figure 4), le travail de commissioning d'aLIGO a été plus difficile en 2016, butant sur plusieurs problèmes, dont la difficulté à augmenter la puissance du laser. Une deuxième prise de données (*run O2*) a démarré fin novembre 2017, avec des instruments ayant des sensibilités en léger progrès par rapport à ce qui avait été obtenu pendant O1, rappelant que le fonctionnement de tels instruments reste délicat.

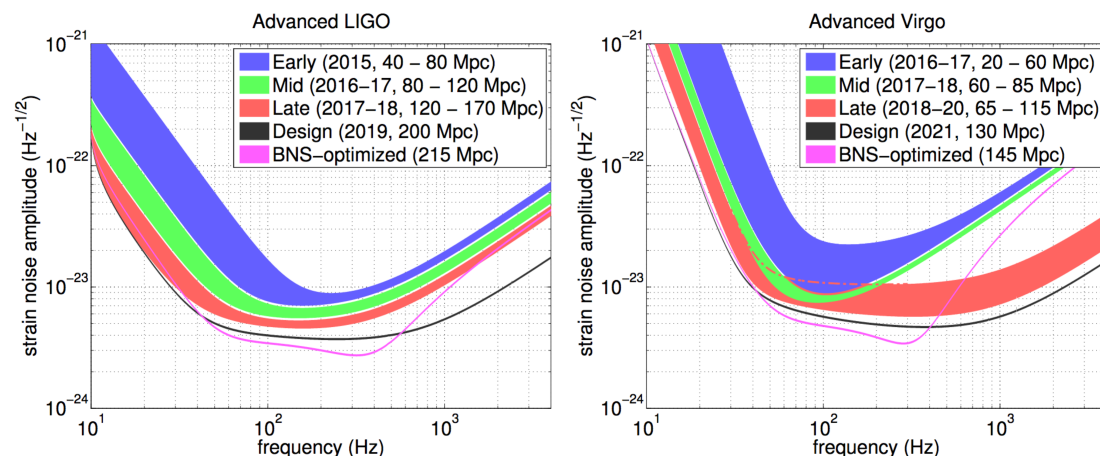


Figure 4: Prédiction de l'évolution des sensibilités des instruments aLIGO et AdVirgo réalisée en avril 2013, soit bien avant la fin de leur construction (arXiv:1304.0670 v1). Les nombres en Mpc correspondent à la distance moyenne à laquelle une coalescence de deux étoiles à neutrons peut être détectée. Si les objets sont plus massifs, comme deux trous noirs, cette distance augmente en fonction de la masse des objets, augmentation qui peut être de plus d'un ordre de grandeur.

KAGRA

Les Japonais ont fait fonctionner à la fin des années 90 un instrument de 300 m, qui a été l'instrument le plus sensible pendant quelques années, mais n'avait pas le potentiel de ce qu'ont pu faire LIGO et Virgo. Cependant, forts de leur expertise technologique dans le domaine, ils ont proposé vers 2006 la réalisation d'un interféromètre souterrain et cryogénique, ayant des bras de 3 km. Ce projet a été approuvé en 2010, et la construction de l'infrastructure de base (tunnel, système à vide) achevée fin 2015. Cependant la réalisation, l'installation et la mise en route de tous les composants nécessaires pour obtenir une sensibilité similaire à celles d'aLIGO et AdVirgo nécessite encore plusieurs années. Un démarrage effectif pourrait intervenir vers 2020-2021.

LIGO-India

Le projet LIGO a initialement été conçu comme trois interféromètres installés sur deux sites, deux interféromètres partageant les mêmes tubes à vide sur l'un des sites. Avec la mise en service de Virgo, il est apparu comme étant plus intéressant d'essayer d'installer le troisième interféromètre sur un autre site, loin des deux LIGO et de Virgo, à condition de trouver un nouveau partenaire fournissant l'infrastructure (site, bâtiments, système à vide). En effet, la multiplication des sites distants offre une amélioration de la résolution angulaire du réseau de détecteurs. Après une première tentative infructueuse en Australie, c'est finalement l'Inde qui s'est manifestée. L'annonce de la détection d'ondes gravitationnelles en février 2016 a permis d'accélérer le processus de décision et d'obtenir l'approbation de ce projet par le gouvernement indien. La sélection du site est maintenant réalisée, mais compte tenu des temps de construction, installation et mise au point, cet instrument ne devrait être opérationnel que vers 2024.

GEO-600

Au début des années 90, les Allemands et Britanniques ont eux aussi espéré construire un instrument des 3km de long, grâce à leur excellente expérience et expertise dans le domaine de la R&D pour la détection des ondes gravitationnelles. En effet, ils ont été à l'origine de plusieurs avancées technologiques majeures pour le fonctionnement des interféromètres et ont été pionniers dans la réalisation de prototypes. Cependant les difficultés financières de l'époque les ont conduits à ne construire qu'un instrument (GEO-600) dont les bras font 600m de long, ayant donc une sensibilité bien moindre que celle de LIGO ou Virgo. Cet instrument, qui présente un bon cycle utile, a été utilisé à la fois pour explorer certaines techniques comme les suspensions monolithiques et le « squeezing » (voir plus loin), et pour servir d'instrument de surveillance dans l'hypothèse d'un événement astrophysique violent et proche. Les scientifiques de GEO-600 ont également intégré la collaboration LSC, pour contribuer directement à la construction d'éléments de LIGO puis d'aLIGO.

Einstein Telescope (E.T.)

Depuis plus d'une dizaine d'années, les acteurs européens se sont regroupés pour proposer un instrument dit de troisième génération. L'objectif est d'obtenir à nouveau une amélioration d'un ordre de grandeur de la sensibilité par rapport à la sensibilité nominale des instruments de deuxième génération. Cette amélioration de plus de trois ordres de grandeur pour le taux d'événements offre bien évidemment un potentiel de physique extrêmement intéressant. Dans le cadre du programme européen FP7, une première étude a débouché sur la publication d'un « *Conceptual design study* » en 2011. Des études de R&D se poursuivent, tout comme la réflexion sur les possibles sites et financement, le coût étant significatif (de l'ordre du milliard d'euros). LIGO étudie également la perspective d'une nouvelle infrastructure et les échanges entre LIGO et les Européens sont fréquents.

Déroulement de la phase de commissioning

Les principales améliorations faites pour passer de la version initiale de Virgo à AdVirgo sont :

- Le doublement de la masse des miroirs (réduction du bruit à basse fréquence) et l'amélioration de la qualité des surfaces.
- L'utilisation des suspensions monolithiques (réduction à basse et moyenne fréquence). Ces suspensions consistent à remplacer les fils d'acier qui soutiennent les miroirs par des fibres de silice fondue soudées aux miroirs, réduisant les pertes mécaniques et le bruit dans la partie centrale de la courbe de sensibilité. Ce type de suspension avait été déjà utilisé lors de la phase Virgo+ de la première génération, la version pour AdVirgo étant améliorée, principalement dans la partie supérieure de la suspension.
- L'augmentation de la taille du faisceau (amélioration à basse et moyenne fréquence)
- La mise sous vide et l'isolation sismique des photodiodes et capteurs utilisés pour contrôler l'interféromètre. Il s'agit de réduire les bruits techniques liés par exemple à de la lumière diffusée par un élément optique mal isolé sismiquement qui se recombine avec le faisceau principal (amélioration à basse et moyenne fréquence).
- L'addition du miroir de recyclage du signal. Ce miroir permet de réinjecter dans l'interféromètre le signal de sortie et ainsi de l'amplifier (amélioration à haute fréquence).
- L'augmentation de la puissance du laser (amélioration à haute fréquence).

Bien évidemment ces changements rendent l'interféromètre plus performant, mais aussi plus complexe, avec parfois des difficultés importantes.

Le choix qui présentait le plus d'incertitudes a été celui d'augmenter la taille du faisceau, ce qui rend la cavité de recyclage de l'interféromètre (partie centrale) beaucoup plus instable et tributaire de la qualité des miroirs. Cette cavité est instable car elle est formée de miroirs ayant les mêmes rayons de courbure. L'option de rendre cette cavité stable en changeant la courbure de l'un des miroirs n'a pas été retenue pour éviter une trop grande complexité du système de suspension des miroirs et à cause du manque de place dans le bâtiment central. Le prix à payer est une exigence accrue sur la qualité de surface des miroirs et la nécessité d'augmenter le nombre et la nature des capteurs (mesures des front d'ondes des faisceaux et des surfaces des miroirs clefs) et des actionneurs (correction par des déformations thermiques).

Pour que l'interféromètre fonctionne (la Figure 5 montre les principaux éléments), il faut que non seulement tous les miroirs soit correctement alignés et positionnés, afin que les cavités des bras et de recyclage soient résonnantes, que l'interféromètre soit sur le frange noire, mais aussi que les cavités de filtrage d'entrée et de sortie soit verrouillées sur leur résonance, que les puissances soient stabilisées, que les bancs optiques suspendus soient correctement alignés, que la température des différents éléments soit stabilisée, etc. Les précisions requises sur la longueur des cavités pour un fonctionnement correct de l'interféromètre varient de 10^{-11} à 10^{-15} m suivant les cas. Un interféromètre n'est donc pas qu'un ensemble de capteurs passifs indépendants les uns des autres, mais également une multitude de boucle de contrôle, qui doivent être réglées soigneusement. Le parallèle peut être fait avec un accélérateur de particules dont la luminosité dépend de réglages et contrôles fins, luminosité qui progresse au cours de la longue mise en service de l'accélérateur pour dévoiler de plus en plus de physique, tout comme la sensibilité des interféromètres.

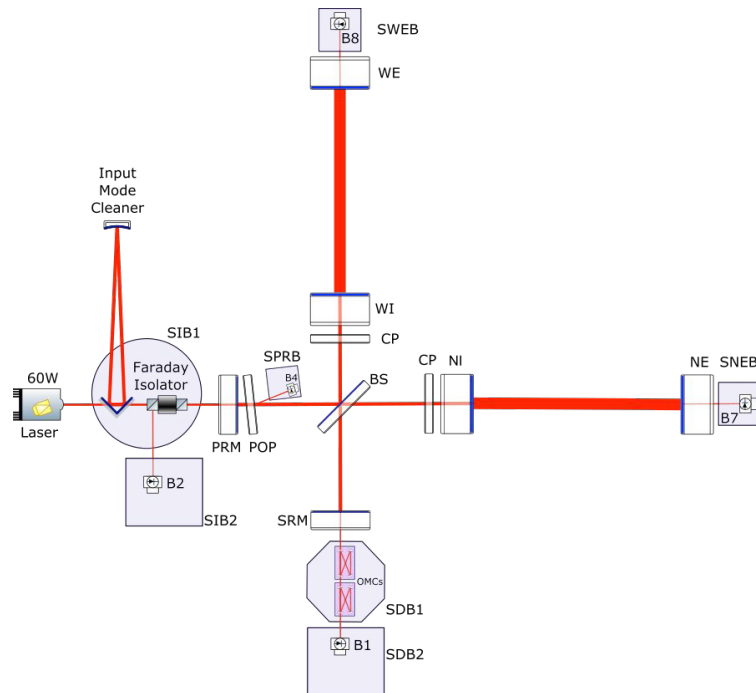


Figure 5 Schéma de principe de l'interféromètres montrant les principaux miroirs et bancs optiques suspendus

Un autre choix stratégique fait au début de la construction d'AdVirgo a été de ne pas installer le recyclage du signal lors du démarrage. Cela supprime une cavité supplémentaire et simplifie donc la mise en route des contrôle. L'impact est une réduction de la sensibilité à haute fréquence, qui explique la différence observée sur la Figure 4 au dessus de 200 Hz entre les courbes verte/bleue et la courbe rouge. Ce choix, tout comme d'autres faits au moment de l'installation et du commissioning, est dû à la pression mise sur le planning de AdVirgo par l'avancée d'aLIGO qui avait démarré son programme bien plus tôt.

L'installation de l'interféromètre a rencontré plusieurs problèmes inhérents à la complexité de ce type d'instruments, introduisant des retards. Les problèmes les plus sérieux rencontrés en 2015 et 2016 ont été:

- **La rotation du *wedge* de la séparatrice** : une erreur de 90° dans la spécification du positionnement du *wedge* (petit angle existant entre les deux faces de l'optique) de la séparatrice a été découverte une fois celle-ci installée. Cela modifiait légèrement la direction des faisceaux réfléchis et la traversant. Compte tenu de la dimension de cette optique (55cm de diamètre), elle n'a pas été remplacée, mais les positions nominales de plusieurs éléments de l'interféromètre ont été ajustées et des bancs optiques ont été modifiés pour correctement recueillir le faisceau auxiliaire réfléchi pas sa deuxième face.
- **Les ruptures de lames des suspensions** : Une dizaine de lames des grandes suspensions ont cassé en 2015 sur quelques suspensions. Ces lames qui sont utilisées pour l'isolation sismique verticale avaient plus de 15 ans d'âge car elles étaient déjà installées dans la version initiale de Virgo. Un défaut de la protection en nickel est probablement à l'origine de ce problème et l'ensemble des lames suspectes ont été remplacées. Un accident similaire s'est produit sur les nouvelles suspensions des bancs optiques. L'ensemble des lames de la suspension incriminée a été remplacé.

- **Les ruptures des suspensions monolithiques** : une première suspension monolithique a cassé en novembre 2015 alors que le miroir était suspendu depuis cinq mois. Cet accident s'est reproduit six fois, le dernier ayant eu lieu en octobre 2016. Le diagnostic a été difficile à établir car ces accidents se sont produits après de temps d'installation variables (de une semaine à sept mois), en corrélation avec la présence du vide, mais là aussi avec des durées variables. Des éléments de la suspension ont d'abord été mis en cause, avant que l'augmentation du nombre d'accidents permette d'établir un lien clair avec le système de pompage. Heureusement, la rupture de ces suspensions n'a pas endommagé les miroirs. Ils ont été réinstallés en quelques semaines à chaque fois. La solution retenue pour assurer le progrès du commissioning a été de remplacer temporairement ces fibres de silice par des fils d'acier.
- **L'impossibilité d'utiliser les anneaux chauffants autour des miroirs** : Afin d'ajuster finement le rayon de courbure des miroirs, des anneaux chauffants ont été installés autour de ceux-ci. Mais il s'est avéré que lors de leur utilisation, les bobines qui servent à contrôler la position des miroirs chauffaient de manière excessive. Leur utilisation a été différée jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée, compliquant les problèmes de stabilité de la cavité de recyclage. Mais la redondance du système de contrôle des surfaces des miroirs, qui utilise également un laser CO2 devrait pallier ce problème au prix d'un fonctionnement plus complexe.

Le commissioning partiel de l'interféromètre a débuté dès que suffisamment d'éléments étaient disponibles et que le faisceau laser pouvait les atteindre. Il a démarré lors de la remise en route du laser et de son système d'injection et de la cavité de filtrage d'entrée en juin 2014. Les étapes suivantes ont eu lieu en 2016, une fois que l'installation d'AdVirgo avait suffisamment avancé :

- **20/04 : Verrouillage de la cavité PR-NI**. C'est la cavité formée du miroir de recyclage de la puissance et du miroir d'entrée du bras nord. C'est la première étape qui mettait en œuvre deux grandes suspensions, les capteurs et contrôles associés.
- **25/05 : Verrouillage de la cavité nord**. Ce résultat a été obtenu trois semaines après la fin de l'installation des éléments nécessaires et la mise à disposition du bras nord. Ces trois semaines ont été consacrées à aligner et régler les différents éléments impliqués (miroirs, télescopes, banc optiques, photodiodes, etc.).
- **03/08 : Verrouillage de la double cavité de filtrage de sortie**. Ces cavités sont installées sur un banc suspendu.
- **17/08 : Verrouillage de la cavité ouest** : une semaine après la mise à disposition du bras.
- **06/10 : Verrouillage des deux cavités et de la séparatrice sur la frange noire**. C'est une configuration quasi complète, à l'exception du miroir de recyclage qui est légèrement tourné afin d'empêcher la formation de la cavité de recyclage.
- **30/12 : Verrouillage des deux cavités et de la cavité de recyclage à mi-frange**. Dans cette configuration, tous les miroirs sont correctement alignés et contrôlés, mais la séparatrice est positionnée de manière à ce que la moitié de la lumière qui la traverse soit dirigé vers la sortie, ce qui limite le gain de la cavité de recyclage à un facteur 2 au lieu de 37, réduisant d'autant la puissance dans l'interféromètre.

Chacune de ces étapes marque le début de la période d'optimisation et d'automatisation des contrôles associés, et des ajustement des composants de l'interféromètre. Des activités ont suivi comme par exemple l'ajout de feuillets d'indium pour assurer un meilleur contact thermique des cavités de sortie, les études d'adaptation de faisceaux à différents points de l'interféromètre, l'ajustement des aimants des contrôles des miroirs, etc.

La prochaine étape de la mise en route est de faire fonctionner l'interféromètre sur la frange noire. Cette étape est délicate car la puissance augmente et jusqu'à des valeurs importantes bien que la puissance du laser ne soit pas encore la valeur nominale d'AdVirgo. C'est la phase pendant laquelle les effets des instabilités de la cavité de recyclage vont devenir importants et devront être maîtrisés.

Une fois le fonctionnement complet de l'interféromètre obtenu, il faudra régler les capteurs et actionneurs en mode bas bruit. En effet, lors des phases d'acquisition des positions nominales, des forces plus importantes qu'en fonctionnement normal sont nécessaires. La dynamique des signaux observé par les capteurs est également très différente.

Enfin, la calibration, l'analyse de la courbe de sensibilité et l'identification des différentes contributions au bruit de l'instrument (injection de bruits et *noise budget*) sont alors les outils qui permettent d'identifier les excès de bruit et de réduire les sources ou les couplages mis en cause. Une fois que ce travail aura permis d'obtenir une sensibilité suffisante, la prise de données avec LIGO pourra démarrer.

Observations conjointes Virgo-LIGO

Les observations conjointes de la phase initiale de LIGO et Virgo ont été décrites plus haut.

Les perspectives pour les prises de données avec aLIGO et AdVirgo ont été évaluées au début de l'année 2013 (voir Figure 4). Ces estimations étaient basées sur une évaluation des plannings de construction des deux instruments, planning qui était très serré pour AdVirgo et qui a un peu glissé.

Lors de l'accord de collaboration entre LIGO et Virgo, un comité en charge de planifier les prises de données a été mis en place. Une de ses activités est d'évaluer le **planning à court, terme** dont la dernière version est présentée sur la Figure 6. La prise de donnée O2 a commencé pour aLIGO le 30 novembre 2016. Elle a été suspendue pendant presque deux semaines pendant les fêtes de fin d'année. L'évolution du commissioning de Virgo sera évalué à la fin janvier, et la décision d'une prise de donnée commune pendant O2 sera alors prise.

Il n'est pas évident de définir un critère de décision simple, car la forme des courbes de sensibilité n'étant pas la même, l'apport d'AdVirgo dépend des sources considérées. Dans le cas de coalescences de système binaires, AdVirgo serait utile à partir du moment où sa sensibilité est égale au cinquième ou au quart de celle d'aLIGO. Dans ces conditions, le fonctionnement de Virgo permet d'améliorer la localisation des sources, même dans le cas où Virgo ne voit pas de signal (ce qui permet d'exclure une partie du ciel). Bien sûr, si AdVirgo observe également un signal, cela serait une confirmation très intéressante et permettrait d'affiner les paramètres de la source.

Ce planning prévoit donc de prendre une décision à peu près au moment de la séance du CS de l'IN2P3. Il est difficile de prévoir ce que sera cette décision car rien n'exclut des progrès rapides, mais obtenir une sensibilité suffisante en un temps aussi court sera très difficile. Si AdVirgo semble pouvoir être prêt, alors une prise de donnée de deux mois démarrant fin mars est prévue afin d'exploiter ce réseau de nouveaux instruments. S'il s'avère que cette option n'est pas possible, il est probable que la prise de données de LIGO soit raccourcie, car

LIGO souhaite reprendre bientôt la phase de commissioning afin d'améliorer les sensibilités des deux détecteurs aLIGO.

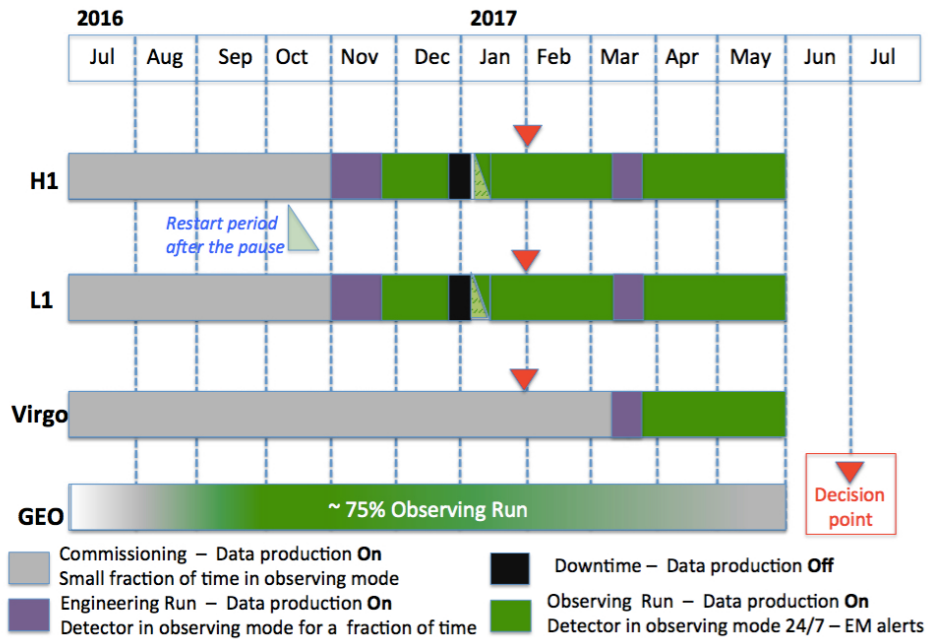


Figure 6 Planning court terme de prises de données.

Quoi qu'il en soit, la prise de donnée suivante (O3) sera commune, sauf problème majeur. Sa date de démarrage n'est pas encore connue mais devrait être probablement pour la fin 2017, début 2018. Une estimation à plus long terme des périodes de prise de données, réalisée à l'occasion d'un workshop sur le futur de LIGO en juillet 2016, est présentée par la Figure 7. Elle montre la volonté de coordonner les prises de données pour avoir si possible trois instruments fonctionnant simultanément. Les évolutions de LIGO sont présentées dans la prochaine section.

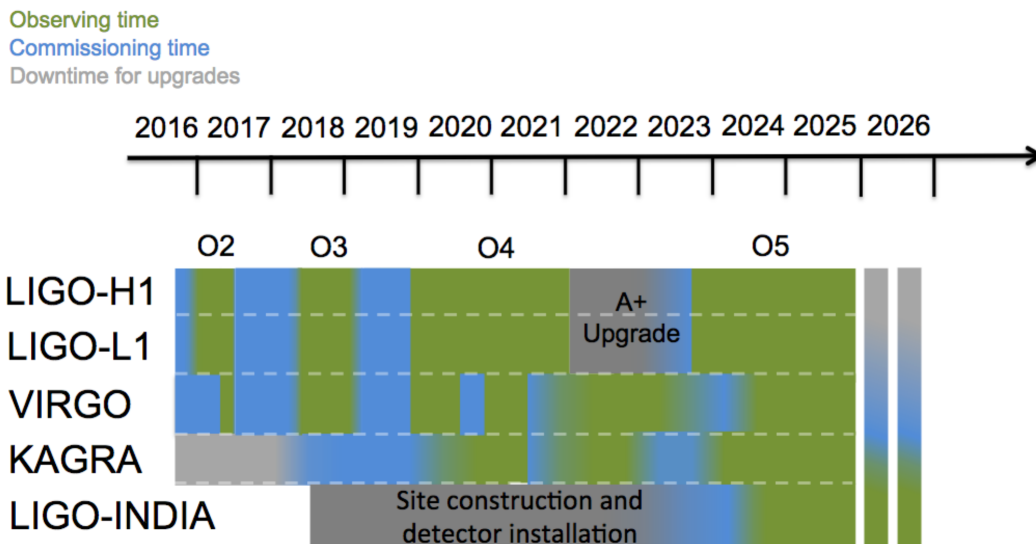


Figure 7 Scénario type pour le déploiement à moyen et long terme des interféromètres (source <https://wiki.ligo.org/pub/LSC/LIGOworkshop2016/WebHome/Dawn-II-Report-SecondDraft-v2.pdf>)

R&D et évolutions attendues de Virgo

La recherche des ondes gravitationnelles avance avant tout grâce au progrès des instruments. Ce sont des décennies de développements instrumentaux qui ont permis d'atteindre les sensibilités requises pour les premières détections et ainsi d'accéder à de nouveaux tests fondamentaux de l'interaction gravitationnelle et de l'exploration de l'Univers avec les ondes gravitationnelles.

Dans cette course à la sensibilité, le tempo est donné par LIGO. Depuis quelques années, des équipes de LIGO réfléchissent aux améliorations futures. Des améliorations incrémentales sont envisagées.

La première étape sera l'upgrade appelé « A+ » qui envisage principalement deux améliorations : l'utilisation de lumière comprimée (*squeezing*) dépendant de la fréquence² qui permet de réduire le bruit quantique à basse et haute fréquence, ainsi que le remplacement des miroirs par des nouveaux ayant des traitements de surface plus performants en termes de bruit de déplacement de leur surface (*coating thermal noise*) améliorant la sensibilité aux fréquences intermédiaires. La Figure 8 de gauche montre l'évolution attendue de la courbe de sensibilité, comparée à la sensibilité nominale d'aLIGO et celle de la première prise de données d'aLIGO. Le gain en sensibilité d'un facteur environ 1.7, et donc quasiment 5 du taux d'évènements, est clairement visible sur la figure de droite qui montre l'évolution du volume accessible fois le temps ($V \times T$), indicateur du nombre de sources observables. Les périodes d'arrêt pour l'amélioration de la sensibilité sont rapidement compensées grâce au taux d'évènement plus élevé. Les options d'une mise à niveau simultanée en 2020 ou décalée dans le temps des deux interféromètres LIGO sont présentées. Le coût de A+ est estimé à 30 M\$, soit bien moins que les 205 M\$ de la construction d'aLIGO.

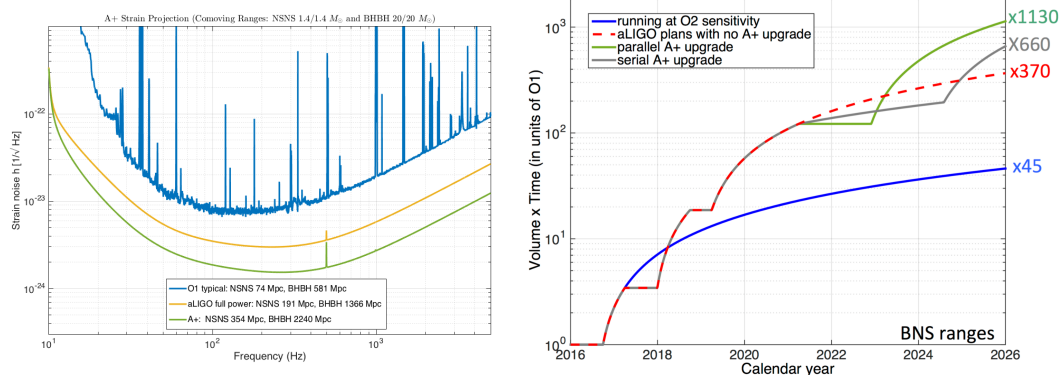


Figure 8 Gauche : courbe de sensibilité de l'upgrade LIGO A+ comparée à celle de aLIGO et à la sensibilité obtenue pendant la prise de données O1. Droite : volume fois le temps pour des coalescence d'étoiles à neutrons intégré au cours des prochaines années en fonction de plusieurs hypothèses.

A plus long terme, LIGO étudie l'amélioration appelée « *Voyager* » qui apporterait une amélioration supplémentaire de la sensibilité d'environ un facteur 2, soit un ordre de grandeur en nombre d'évènements, ou encore pourrait observer des coalescences de deux trous noir avec des rapport signal sur bruit allant jusqu'à quelques centaines et donc des tests très précis de la relativité générale. *Voyager* nécessitera des changements plus

² Une installation du squeezing indépendant de la fréquence permettant de travailler à puissance laser plus réduite sans trop perdre en sensibilité devrait probablement être installée avant l'upgrade A+. Cette technologie a déjà été testée à la fin de LIGO initial.

important comme l'utilisation de miroirs de plus de 100 kg, leur refroidissement, l'utilisation d'une nouvelle longueur d'onde pour le laser, autant de développements technologiques auxquels les équipes LIGO commencent à s'intéresser.

Du côté Virgo, des évolutions sont également envisagées, même si ces projections n'étaient guère encouragées jusqu'à l'année dernière et que la priorité reste la mise en route de l'instrument pour réaliser les premières observations d'ondes gravitationnelles avec AdVirgo.

Il y a tout d'abord la finition de l'installation du programme de base d'AdVirgo.

- La mise en route du **recyclage du signal** avait été différée dès le début du projet. Il devrait être possible de l'installer courant 2017, ce qui nécessite de remplacer une grande optique de sortie de l'interféromètre qui actuellement n'est pas réfléchissante et d'ajouter les éléments permettant de contrôler ce miroir, en particulier des lasers auxiliaires pour la phase de verrouillage de la cavité.
- L'utilisation d'un **laser plus puissant** avait également été repoussée, pour éviter d'avoir à affronter les problèmes liés à des puissances trop importantes et aussi de se donner le temps d'identifier une solution viable pour le laser de puissance. Un laser d'une centaine de watts devrait être disponible en 2017, permettant une étape intermédiaire avant le passage à la valeur nominale de 200 W, probablement l'année suivante.
- La réinstallation des **suspensions monolithiques**. Si les études en cours confirment l'hypothèse actuelle d'une interaction défavorable entre la suspension monolithique et le système de pompage, elle ne remet pas en cause le design des suspensions monolithiques qui peuvent être mises en place relativement rapidement. Cependant des modifications seront nécessaires, comprenant l'installation de protections pour les fibres des suspensions, et d'éventuelles modifications du système de pompage. Bien évidemment, des tests seront nécessaires pour s'assurer que la solution trouvée fonctionne correctement.

Il est intéressant de noter que ces trois modifications sont relativement indépendantes les unes des autres, ce qui laisse une bonne flexibilité dans le planning de mise en œuvre. Cette remarque s'applique également aux améliorations présentées dans la suite de ce rapport.

Parmi les **nouvelles améliorations** envisagées, la plus immédiate et significative est probablement l'utilisation du **squeezing**. Cette technique, déjà démontrée par GEO-600 puis dans un test réalisé par LIGO, permet de réduire les bruits quantiques associés à la lumière. Dans sa version la plus simple, elle permet de réduire le bruit de photons à haute fréquence. Cette réduction se fait au prix d'une augmentation du bruit lié aux fluctuations de la pression de radiation. Différents groupes de Virgo travaillent sur le sujet. Les groupes de l'INFN sont en train de construire un démonstrateur pour un squeezing indépendant de la fréquence. Des groupes de l'IN2P3 en collaboration avec le Laboratoire Kastler Brossel (qui est membre de la collaboration Virgo et qui a une solide expertise en optique quantique), préparent une version qui permettrait un squeezing dépendant de la fréquence, offrant donc de surcroît une réduction du bruit de pression de radiation à basse fréquence. Ce projet a obtenu un financement de l'ANR pour son étude du squeezing dépendant de la fréquence en utilisant la cavité CALVA installée au LAL.

L'intérêt du squeezing est d'améliorer la sensibilité de la même manière que si la puissance du laser augmentait, sans pour autant effectivement l'augmenter. C'est finalement à moyen terme une **réduction du risque**, car faire fonctionner aLIGO ou Adv à leur puissance nominale se révèle être délicat. En effet, avec plus d'un demi-mégawatt de puissance stocké

dans les bras d'AdV, les miroirs sont non seulement susceptibles d'être déformés par la moindre poussière qui se trouverait à leur surface³, mais aussi à cause des interactions entre les modes propres internes des miroirs et les modes d'ordre supérieur des cavités optiques (*instabilités paramétriques*).

La mise en place du squeezing dans AdV devrait se faire en deux étapes : version indépendante de la fréquence, puis dépendante car elle nécessite une cavité optique supplémentaire de quelques centaines de mètres. En fait, il ne s'agit pas juste d'installer un laser supplémentaire qui fournit une lumière ayant les bonnes caractéristiques, mais également d'intégrer cette source dans l'interféromètre, et de réduire les pertes dans le système de détection pour profiter pleinement du squeezing. Le projet technique, son calendrier ainsi que les ressources financières devrait être défini dans les prochains mois en vue d'une utilisation dans les toutes prochaines années.

La réduction du bruit Newtonien

Les infimes déplacements des sols et des bâtiments introduisent un déplacement parasite des miroirs à basse fréquence par coulage gravitationnel classique (Newtonien). Ce bruit qui devrait être visible à la sensibilité nominale peut être prédit et donc soustrait, si les mouvements du sol sont suffisamment bien mesurés et le couplage caractérisé. Le déploiement d'un réseau d'accéléromètres est en cours d'étude afin d'éliminer ce bruit. Les équipes de l'IN2P3 ne sont pas impliquées dans ces développements, en dehors d'un support pour l'intégration avec le système d'acquisition des données de Virgo.

La réduction du bruit thermique des miroirs

Tout comme pour LIGO, ce bruit limitera la sensibilité aux fréquences intermédiaires. Il est donc nécessaire de développer de nouveaux traitements de surface réduisant ce bruit. L'IN2P3, avec le LMA qui a réalisé les traitements de surfaces des miroirs d'aLIGO et d'AdVirgo est au cœur de cette problématique. Il y a un effort important de R&D à réaliser pour trouver et optimiser les meilleurs coatings. Une fois que la technique sera trouvée, il ne faudra pas juste l'appliquer sur quelques cm², mais sur des miroirs de 35 cm de diamètre pesant 42 kg. La mise au point de ces nouveaux coatings prendra probablement plusieurs années avant que les progrès justifient le changement des miroirs, compte tenu de leur coût.

D'autres améliorations plus ambitieuses ont été suggérées, allant de l'augmentation du diamètre des faisceaux, l'utilisation de miroirs plus lourds, jusqu'à l'option radicale de rallonger les bras de l'interféromètre. Ces améliorations nécessitent des études préliminaires pour être sérieusement considérées dans le plan d'upgrade d'AdV. Il est cependant impératif de pouvoir faire ces études qui demandent du temps, afin d'être éventuellement prêts si le rapport bénéfice sur coût (au sens large) se révélait être favorable.

Cependant, ces améliorations des bruits « fondamentaux » (ou limites intrinsèques de la sensibilité), ne pourront être utiles que si les **bruits techniques** restent maîtrisés. Les bruits dits techniques sont ceux qui a priori peuvent être réduits pour être négligeables comme par exemple le bruit de l'électronique ou des systèmes de contrôles. La maîtrise de ces bruits techniques est un travail continu, car lorsqu'un bruit diminue dans la courbe de sensibilité, les bruits sous-jacents apparaissent et doivent être réduits. Les techniques de calibration devront aussi évoluer avec les progrès de la sensibilité pour obtenir des précisions

³ Ce qui réduirait le gain de la cavité, la puissance stockée et donc la sensibilité.

compatibles avec des SNR potentiellement de plus en plus élevés. Tout ceci ne peut se faire qu'en conservant des équipes d'ingénieurs et physiciens maîtrisant l'instrument AdVirgo.

Bien que les aspects analyse de données ne fassent pas partie des sujets qui doivent être traités lors de ce CS de l'IN2P3, il est important de souligner que c'est une activité qui nécessite aussi des moyens technique - le calcul - qui doivent évoluer. L'accès aux centres de calcul, en particulier le CCIN2P3, doit pouvoir être garanti sur la durée afin de disposer pleinement des moyens d'exploiter les données de ces instruments de plus en plus performants. Ces moyens seront d'autant plus nécessaires que la complexité des analyses augmentera et que la mise en évidence d'ondes gravitationnelles rend cette activité de plus en plus compétitive.

De manière plus générale, le succès de la mise au point d'instruments comme AdVirgo réside dans la capacité à intégrer des technologies différentes et non pas dans la maîtrise d'une technologie unique. L'IN2P3 a l'avantage de disposer dans ses laboratoires d'équipes connaissant l'ensemble de ces techniques et les interactions entre elles. C'est ce qui a permis à l'IN2P3 d'être à l'avant poste de cette recherche pour le CNRS. L'IN2P3 a tous les atouts pour le rester, mais cela nécessite un effort, en particulier humain, soutenu sur le long terme. Il est important de renforcer aussi les équipes pour participer pleinement à l'exploitation scientifique des ces instruments.