

Systèmes optiques intégrés dans Advanced Virgo et adaptation au vide poussé

R. Gouaty



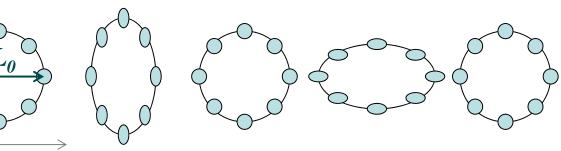




Réseau Optique Photonique, Journée « Optique en milieux extrêmes », Ecole Polytechnique 13/12/2017

Les ondes gravitationnelles

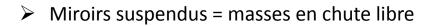
- Générées par des masses en accélération
- > Fluctuations de la courbure de l'espace-temps se propageant dans l'espace
- L'espace se déforme: les distances séparant des masses libres changent
- > Effet opposé sur deux axes orthogonaux
- > Relation entre l'amplitude de l'onde et la variation de longueur:

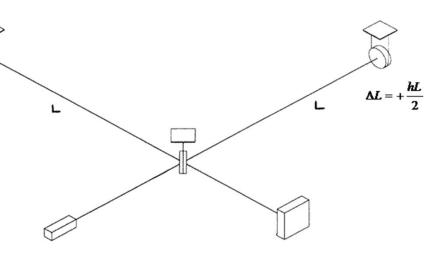


$h = 2 \frac{\delta L}{L}$

Des interféromètres pour les détecter:

- Mesurer une variation de distance entre des masses tests
- Intensité lumineuse des faisceaux interférant dépend de la différence de chemin parcouru dans les deux « bras »

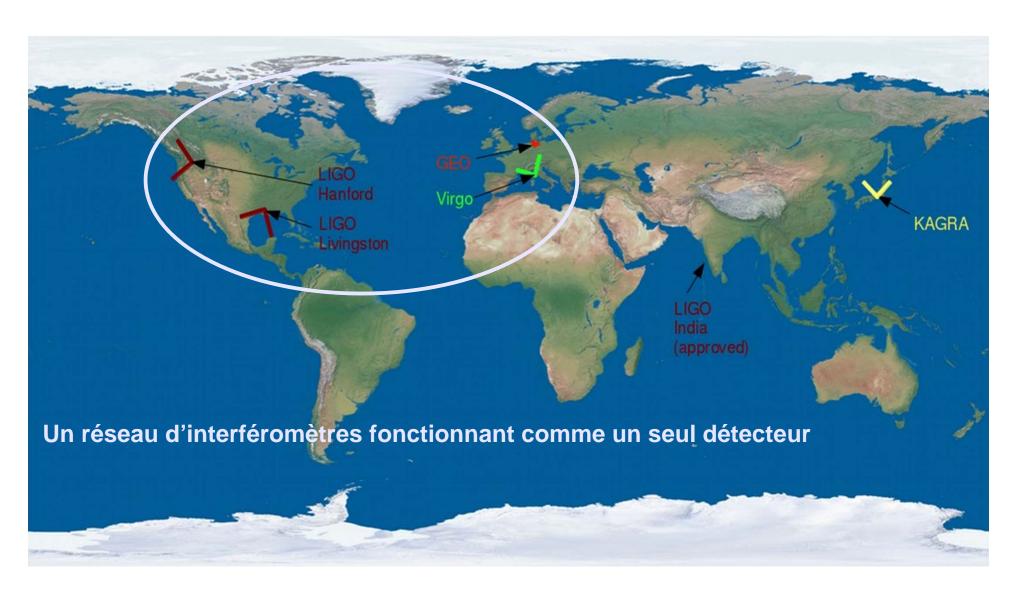




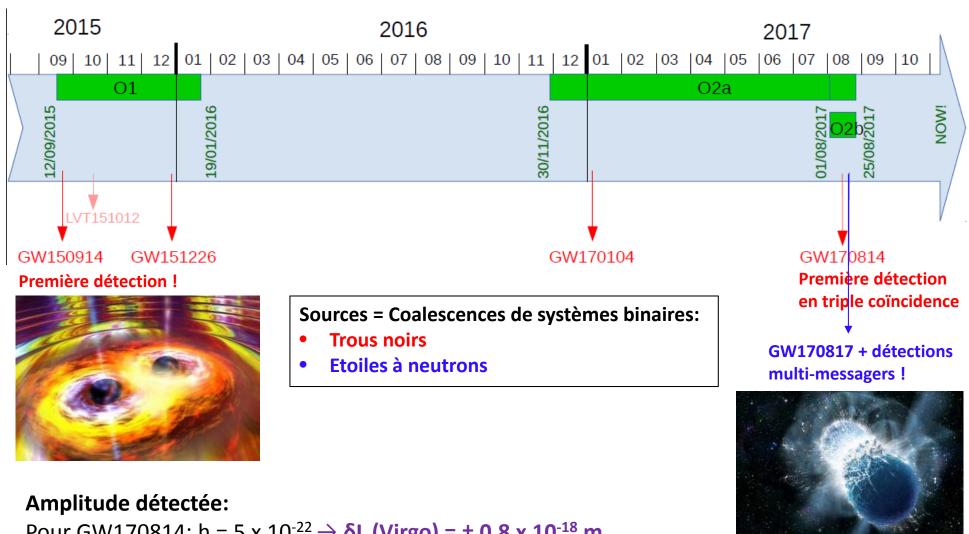
L'interféromètre doit être grand : ΔL proportionnel à L

→ bras de plusieurs km!

Un réseau mondial d'interféromètres



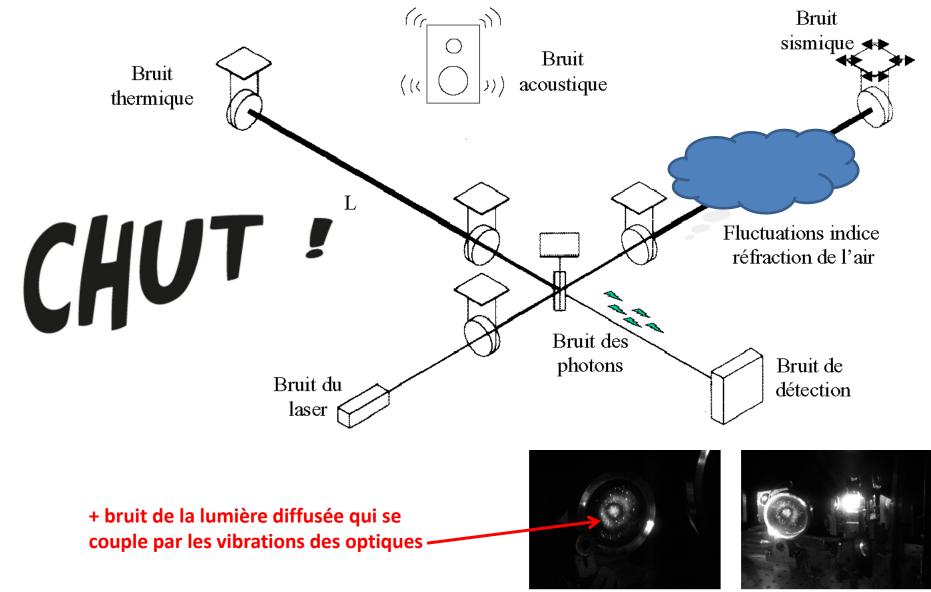
Les premières détections



Pour GW170814: h = 5 x $10^{-22} \rightarrow \delta L$ (Virgo) = ± 0.8 x 10^{-18} m

≡ Observer une variation de la distance entre la Terre et le Soleil correspondant à la taille d'un atome → un défi expérimental

Les sources de bruit de fond



L'interféromètre Advanced Virgo

□ Configuration optique pour minimiser le bruit de photons :

 $\widetilde{h} \geq \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\hbar\omega}{P}}$

L: longueur des bras P: puissance injectée

> Cavités Fabry-Perot : Finesse = 450 → ~280 allers-retours → chemin optique effectif = 840 km

200W laser

Cavité de recyclage: puissance x 39

Isolation sismique des miroirs

> Série de 7 pendules en cascades + atténuation verticale

Minimisation des bruits thermiques

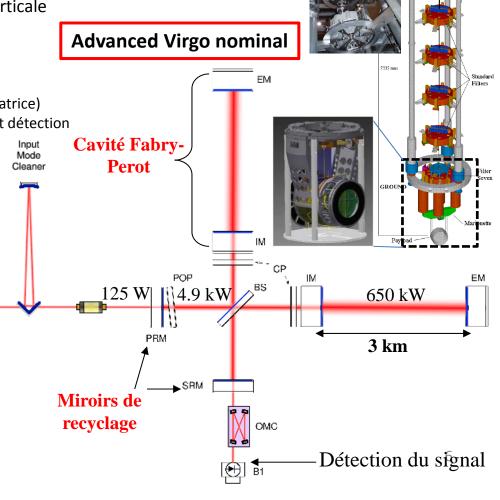
- > Faisceau de grande taille: w = 49-58 mm
 - → miroirs de 35 cm de diamètre (55 cm pour la séparatrice)
 - → télescopes pour réduire la taille des faisceaux avant détection
- Miroirs de 42 Kg
- Suspensions monolithiques (en cours d'installation)

Contrôle actif des aberrations optiques

- > Anneaux chauffants autour des miroirs
- Laser CO2 projeté sur des lames compensatrices

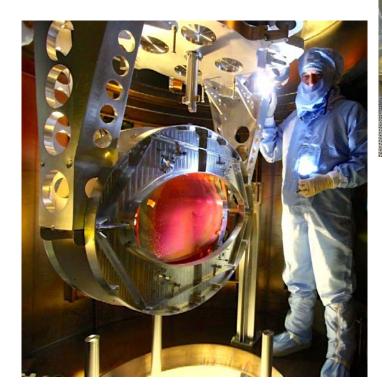
Boucles d'asservissements

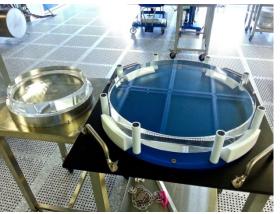
- > contrôler les conditions d'interférence
- > maintenir les cavités résonantes
- > stabilisation du laser

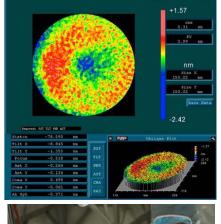


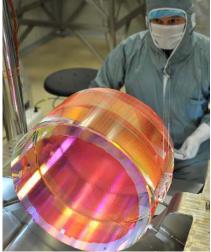
Miroirs

- Grands miroirs
- Miroirs quasi-parfaits
 - Défaut de planéité < 0.5 nm RMS (sur 150 mm de diamètre)</p>
 - > Substrats de très faible absorption (0.2 ppm/cm)
 - Traitements de surface réalisés par le Laboratoire des Matériaux Avancés à Lyon
- Manipulés en salles blanches











Sous ultra vide

Motivations:

- Se protéger du bruit acoustique
- Éviter le bruit de mesure qui proviendrait des fluctuations d'indice de réfraction de l'air
- Conserver la propreté des miroirs

Le vide d'Advanced Virgo en quelques chiffres:

- □ Une enceinte à vide d'un volume de 7000 m³
- Des niveaux de vide différents:
 - > Jusqu'à 10⁻⁹ mbar dans les bras de 3 km
 - $ightarrow 10^{-6}$ à 10^{-7} mbar dans les tours abritant les miroirs et leurs suspensions
- Séparation entre bras et tours assurée par des pièges cryogéniques





Le système de détection

But: extraire les faisceaux de l'interféromètre

Canal pour la détection des ondes gravitationnelles

Canaux de contrôle

En quoi cela consiste:

Six bancs optiques suspendus et placés sous vide

Isolation sismique et acoustique

Evolution de Virgo à Advanced Virgo: 5 nouveaux bancs

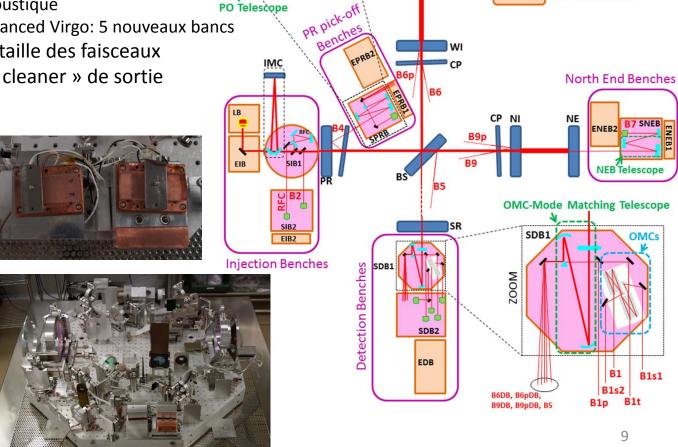
Télescopes pour réduire la taille des faisceaux

Cavités de filtrage: « mode cleaner » de sortie

Photodiodes, cameras

Electronique embarquée





West End Benches

EWEB1

WE

EWEB2

Beams & optical benches for Advanced Virgo

Under-vacuum benches

External benches

Bancs optiques suspendus et sous vide

• Objectifs:

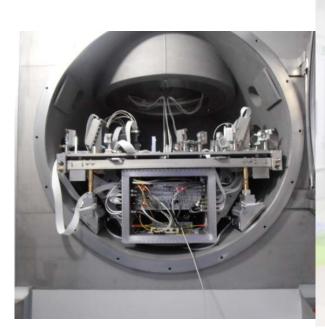
- → Minimiser l'impact de la lumière diffusée
- → Assurer la stabilité de la position du faisceau par rapport aux optiques & photodiodes

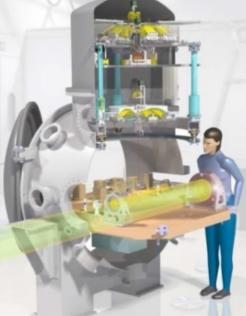
• Parmi les défis : fortes contraintes spatiales

- → Enceintes à vide compactes: « minitours »
- → Système d'isolation sismique compact
- → Electronique embarquée pour ne pas détériorer l'isolation sismique avec le cablage
- → Signaux numérisés transmis à la DAQ par liens optiques

• Enceintes à vide:

- → conçues pour un vide jusqu'à 10⁻⁵ 10⁻⁶ mbar
- → séparées du vide principal par des hublots

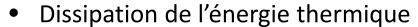




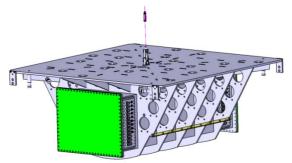


Problématiques liées au vide

- Impact sur le choix des matériaux, des composants
- Contraintes pour l'électronique embarquée
 - → nécessité d'un containeur étanche intégré au banc



- jusqu'à 200W de chaleur dissipée par l'électronique
- la température de la surface du banc doit restée ≤ 40°c
- Contraintes sur la propreté
- Accessibilité des bancs optiques pour les réglages (commissioning)
 - séparation du vide principal facilite l'accès
 - → interventions ponctuelles pour remplacement des composants défectueux avant le run O2: « shut down » ≤ 2-3h
- Contrôles à distance nécessaires
 - → requiert des actionneurs compatibles vide

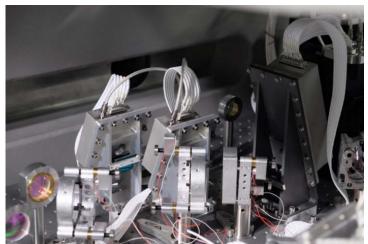




Exemples de composants sur les bancs

- Montures optiques compatibles vide: acier inox et aluminium
- Actionneurs pour l'alignement fin des optiques
 - picomoteurs compatibles vide
 - miroirs actionnés par couples aimant-bobine (galvanomètre)
 - → pilotage de ces actionneurs à partir de l'électronique placée dans containeur
- Photodiodes et caméras placées dans de petits caissons étanches
 - → inclue un PCB avec premier étage de préamplification
 - → monitoring de la température et pression
 - → obturateur automatisé pour protéger les photodiodes des excès de lumière
 - → bloqueurs de faisceaux intégrés (verre noir ou acier poli traité AR) pour le contrôle des réflexions parasites

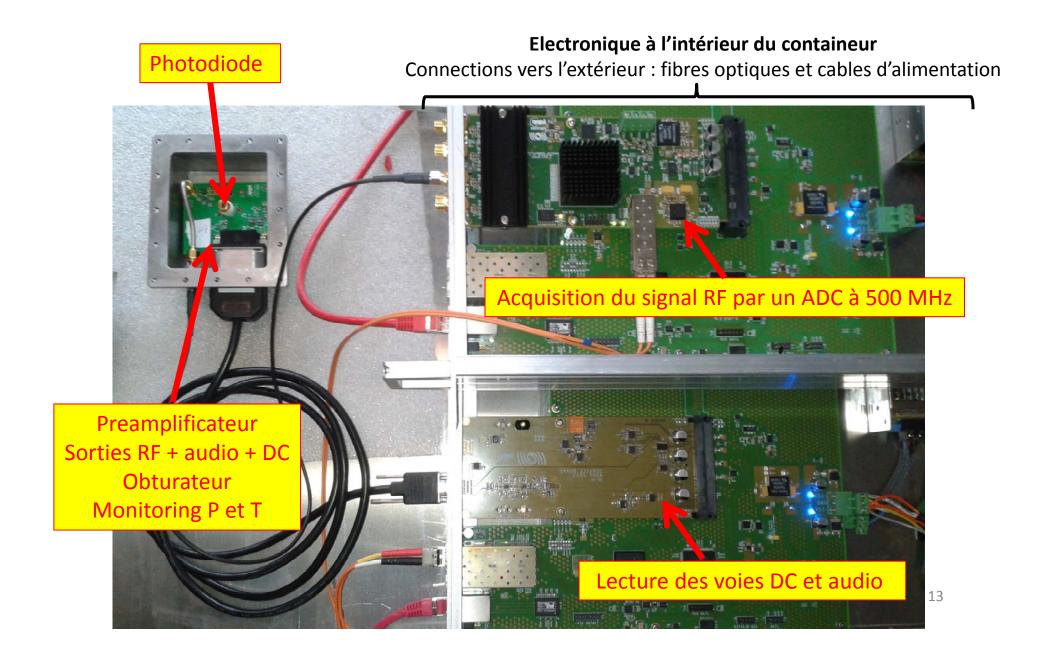






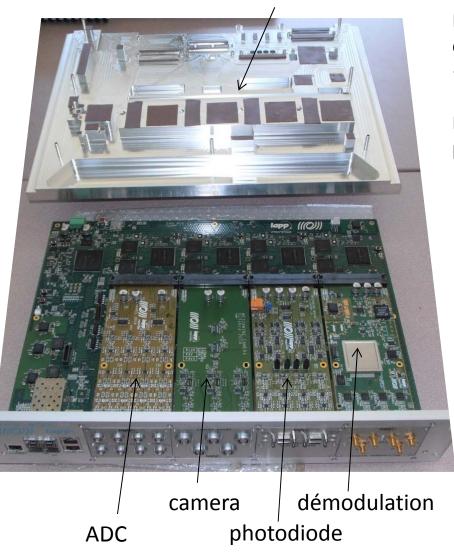


Electronique des photodiodes



Extraire la chaleur des composants électroniques

Radiateur



Extraction de la chaleur dissipée par les composants électroniques par conduction thermique → chaleur propagée dans le corps du banc

Problème: comment dissiper la chaleur emmagasinée par le banc ?



Préparation de joints thermiques

Dissipation de l'énergie thermique

Problématique:

- jusqu'à 200W de chaleur dissipée par l'électronique contenue dans le banc
- la surface du banc doit restée ≤ 40°c (température max de fonctionnement des picomoteurs)
- dissipation par rayonnement thermique uniquement: émissivité de l'aluminium ≤ 10%

→ insuffisant d'après modélisation thermique

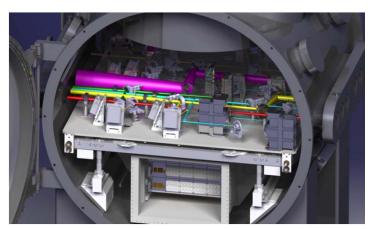
Solutions mises en œuvre:

- Anodisation du banc en aluminium:
 - → émissivité augmentée (proche de 100%)
 - → fine couche d'anodisation (~10 µm): compatible avec le niveau de vide recherché
- Sablage de l'enceinte à vide en acier inox:
 - → émissivité augmentée d'un facteur 2 (~45-50%)

Modélisation thermique validée avec un prototype de banc

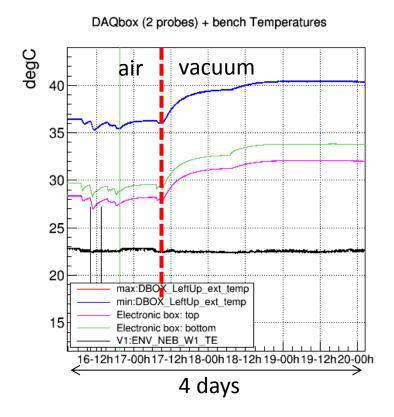


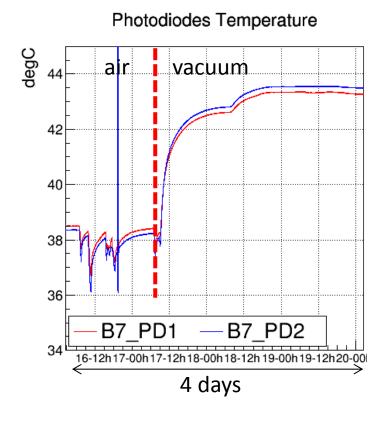




Transitoire thermique observé avec un banc d'Advanced Virgo

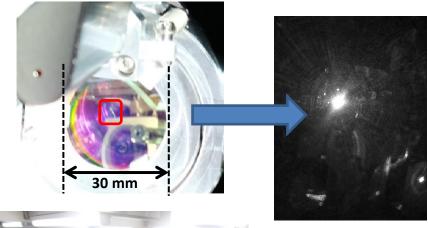
- Puissance dissipée par l'électronique ≈ 120 W
- Variation de température mesurée dans le containeur électronique ≈ 4°c
 - En accord avec la modélisation thermique
 - Température de surface du banc ≤ 40°c même avec deux fois plus de dissipation
 → Objectif atteint





Préservation de la propreté

- Nécessaire pour le vide mais également pour les optiques (lumière diffusée + risque de dommages par exposition au laser)
- Assemblage des bancs optiques en salle blanche:
 - → local en surpression d'air filtré + plafonds soufflants
 - \rightarrow taux de particules de taille ≥ 1µm : 0









Résumé et conclusion

- ☐ Le vide est essentiel pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles:
 - → Isolation du faisceau laser, des miroirs, et des bancs optiques
- L'extraction et la lecture des faisceaux de l'interféromètre est réalisée à partir de bancs optiques suspendus et sous vide, intégrant de l'électronique
- ☐ La problématique du vide a fortement contraint le design de ces bancs optiques:
 - Optimisation du rayonnement thermique
 - Electronique placée dans des caissons étanches
 - Un grand nombre d'actionneurs pour permettre des ajustements à distance
- ☐ Ces bancs optiques sont opérationnels et ont rempli leur fonction avec succès pendant la prise de données O2