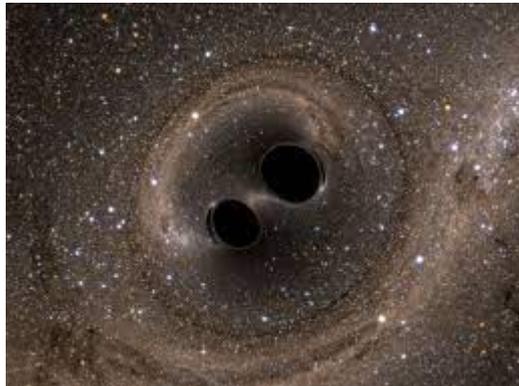
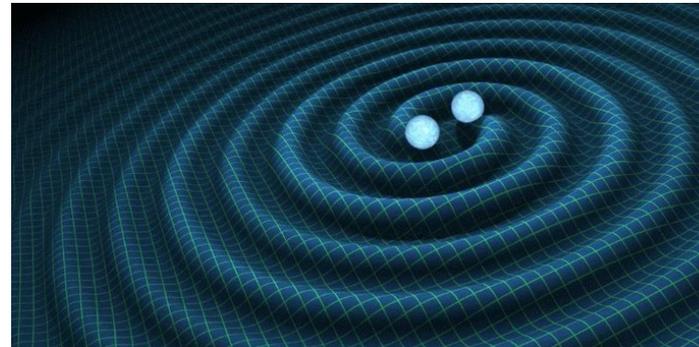




# Principe de détection des ondes gravitationnelles



Angélique Lartaux



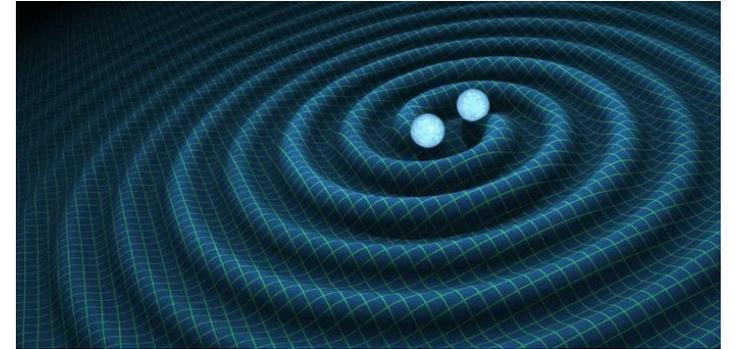


# Une onde gravitationnelle

est une déformation de l'espace-temps produite par une/des masses(s) en mouvement accéléré

## Propriétés des ondes gravitationnelles

- prédites par Albert Einstein en 1916,
- se propagent à la vitesse de la lumière,
- peuvent traverser des millions d'années-lumière sans être absorbées par la matière



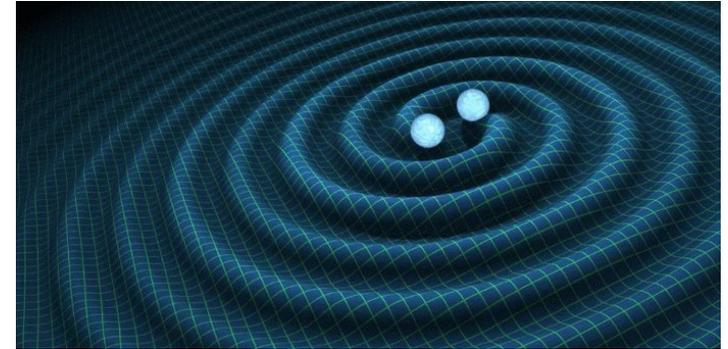


# Une onde gravitationnelle

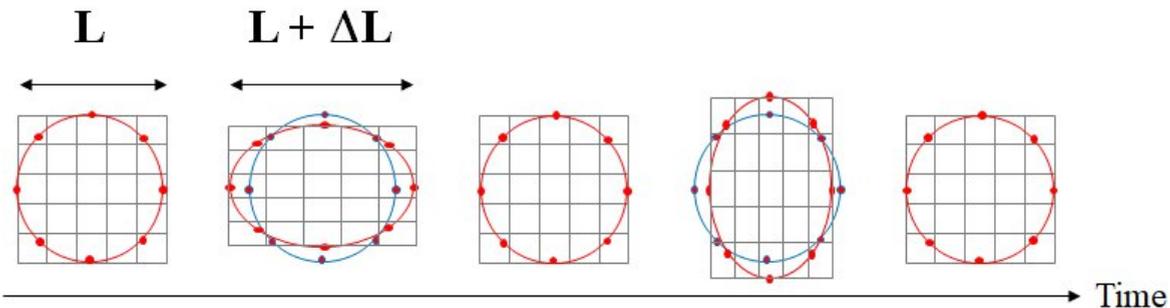
est une déformation de l'espace-temps produite par une/des masses(s) en mouvement accéléré

## Propriétés des ondes gravitationnelles

- prédites par Albert Einstein en 1916,
- se propagent à la vitesse de la lumière,
- peuvent traverser des millions d'années-lumière sans être absorbées par la matière



## Détection des ondes gravitationnelles



La déformation relative de l'espace temps est

proportionnelle à l'amplitude  $h$  de l'onde gravitationnelle  $\frac{\Delta L}{L} \simeq \frac{h}{2}$



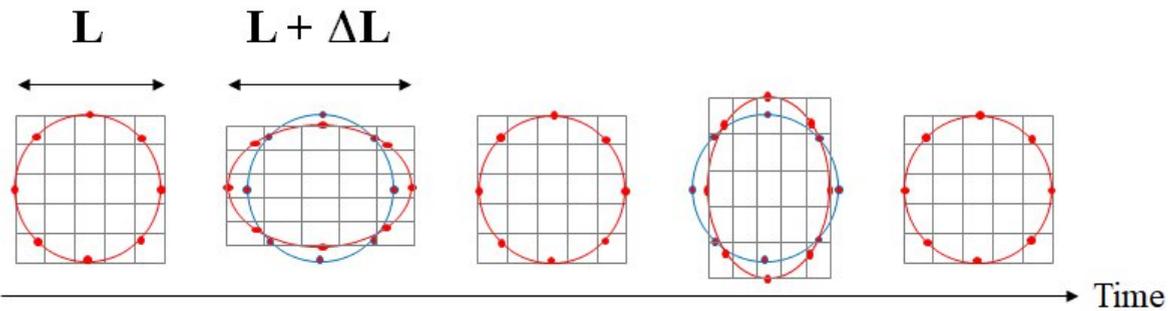
# Une onde gravitationnelle

est une déformation de l'espace-temps produite par une/des masses(s) en mouvement accéléré

## Propriétés des ondes gravitationnelles

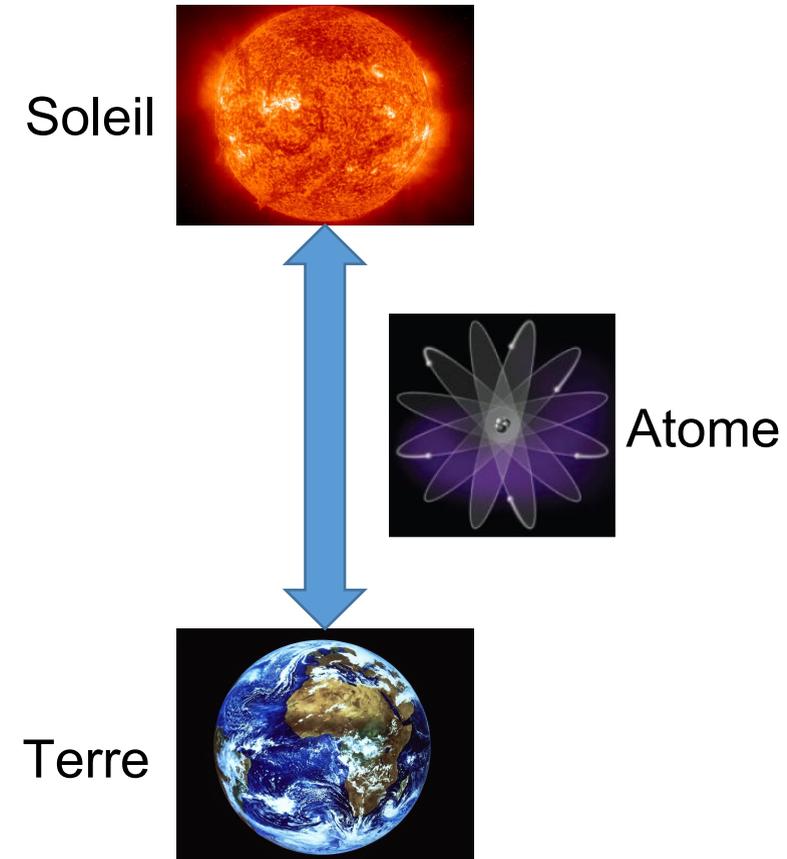
- prédites par Albert Einstein en 1916,
- se propagent à la vitesse de la lumière,
- peuvent traverser des millions d'années-lumière sans être absorbées par la matière

## Détection des ondes gravitationnelles



La déformation relative de l'espace temps est proportionnelle à l'amplitude  $h$  de l'onde gravitationnelle  $\frac{\Delta L}{L} \simeq \frac{h}{2}$

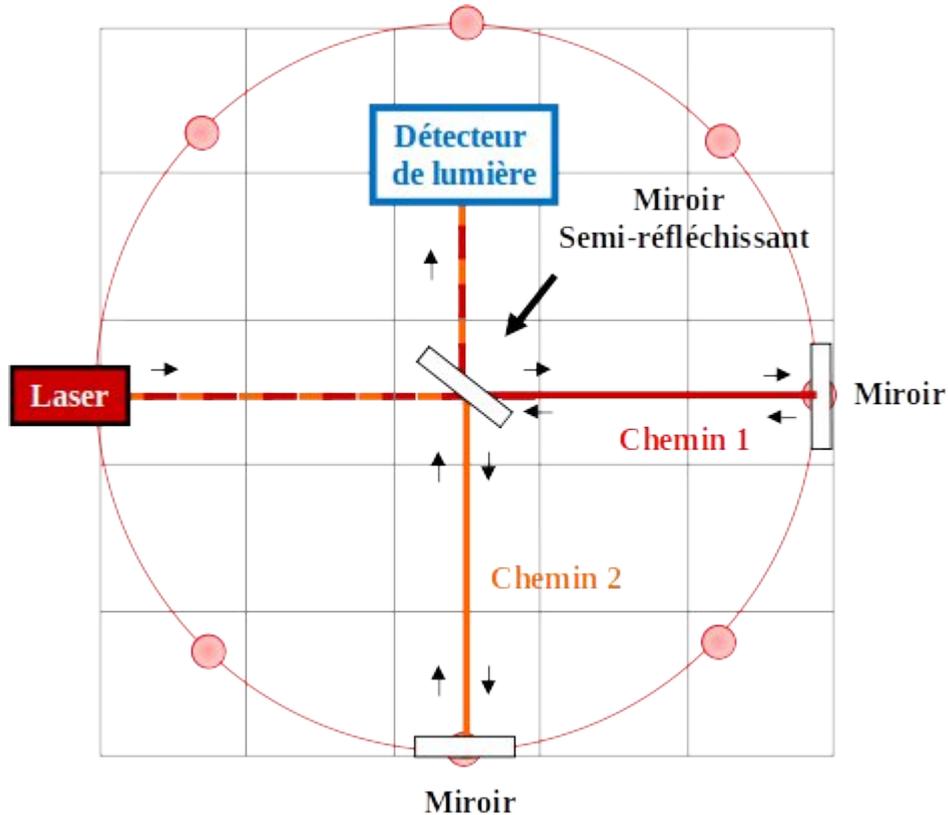
## Déformation de $10^{-21}$





# L'interféromètre de Michelson

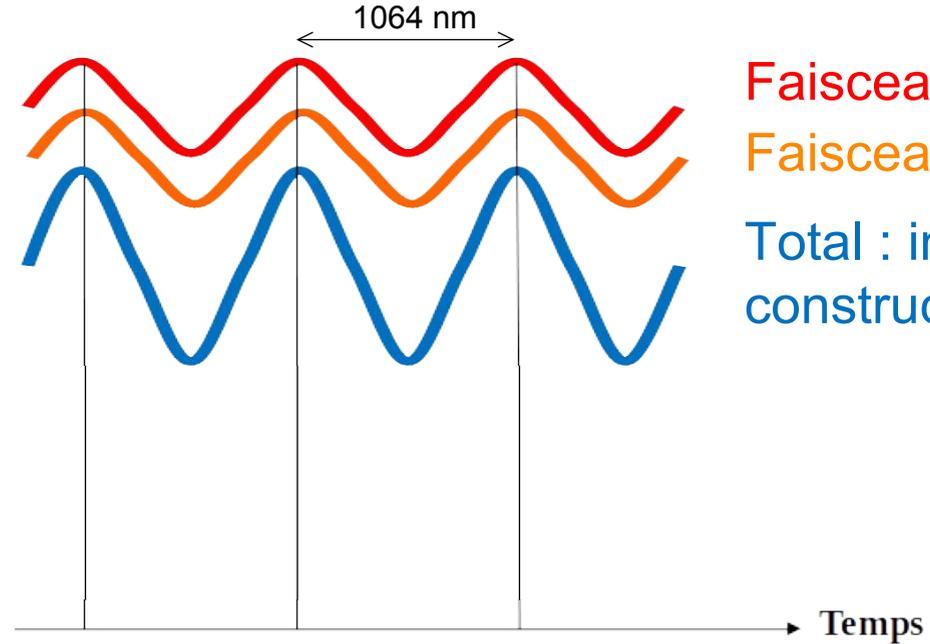
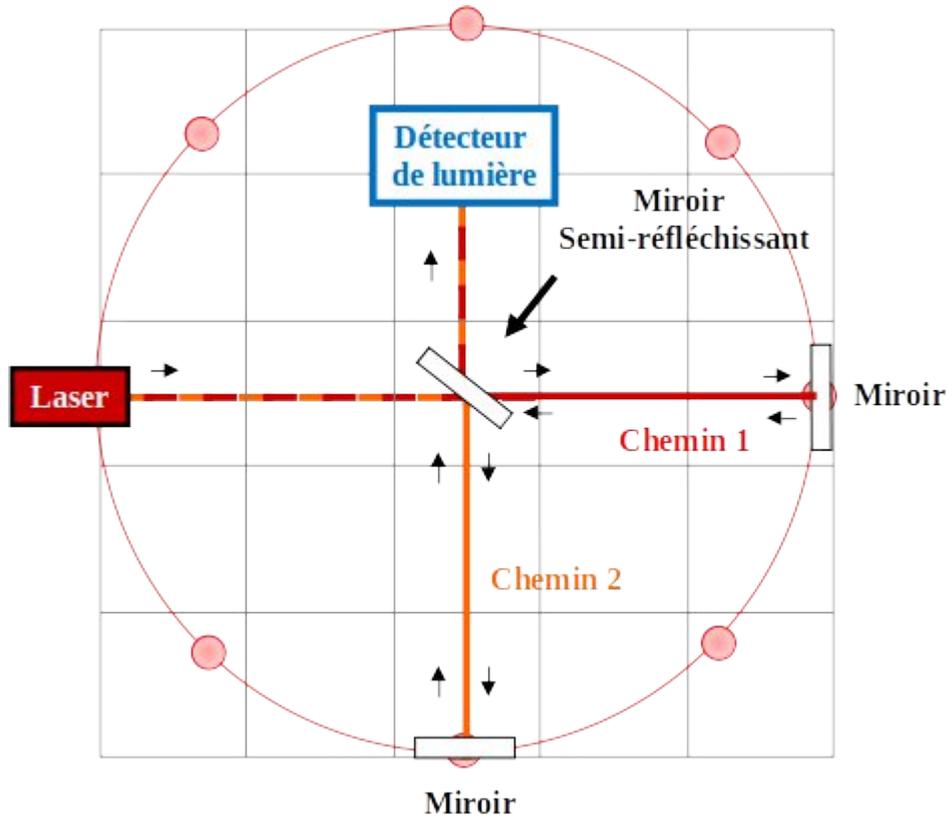
est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles





# L'interféromètre de Michelson

est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles

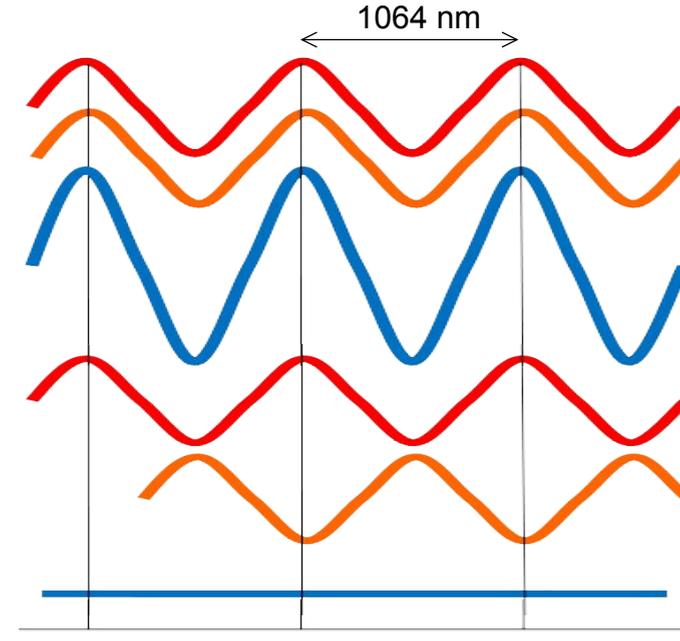
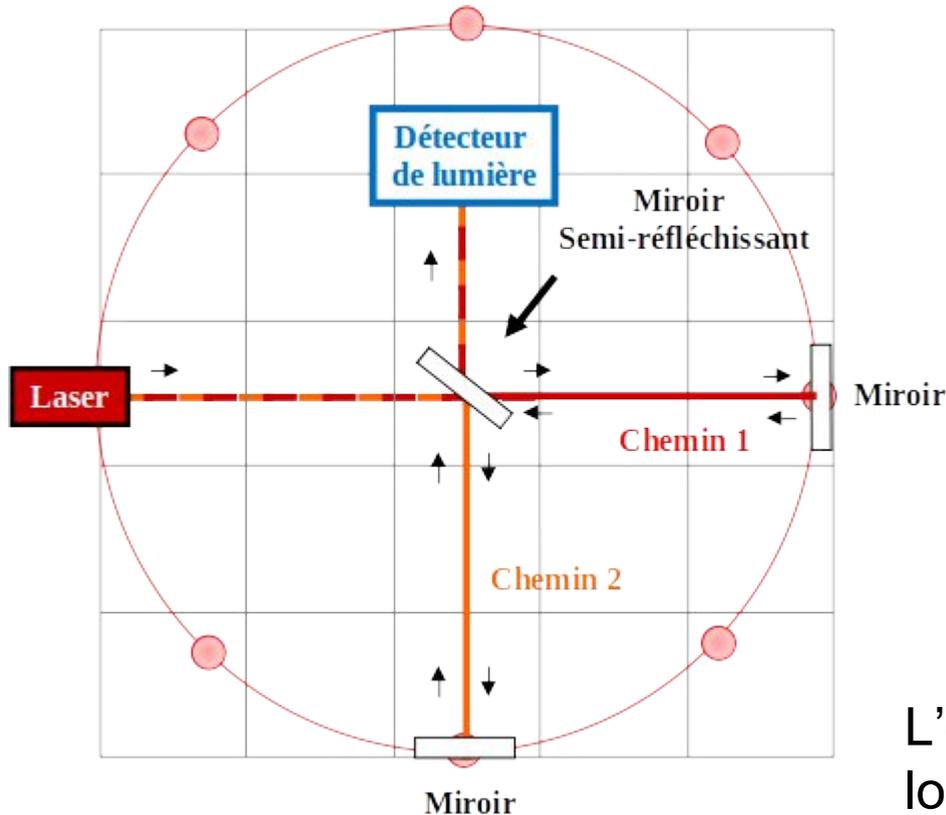


Faisceau Chemin 1  
Faisceau Chemin 2  
Total : interférence constructive



# L'interféromètre de Michelson

est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles



Faisceau Chemin 1

Faisceau Chemin 2

Total : interférence constructive

Total : interférence destructive appelée frange noire

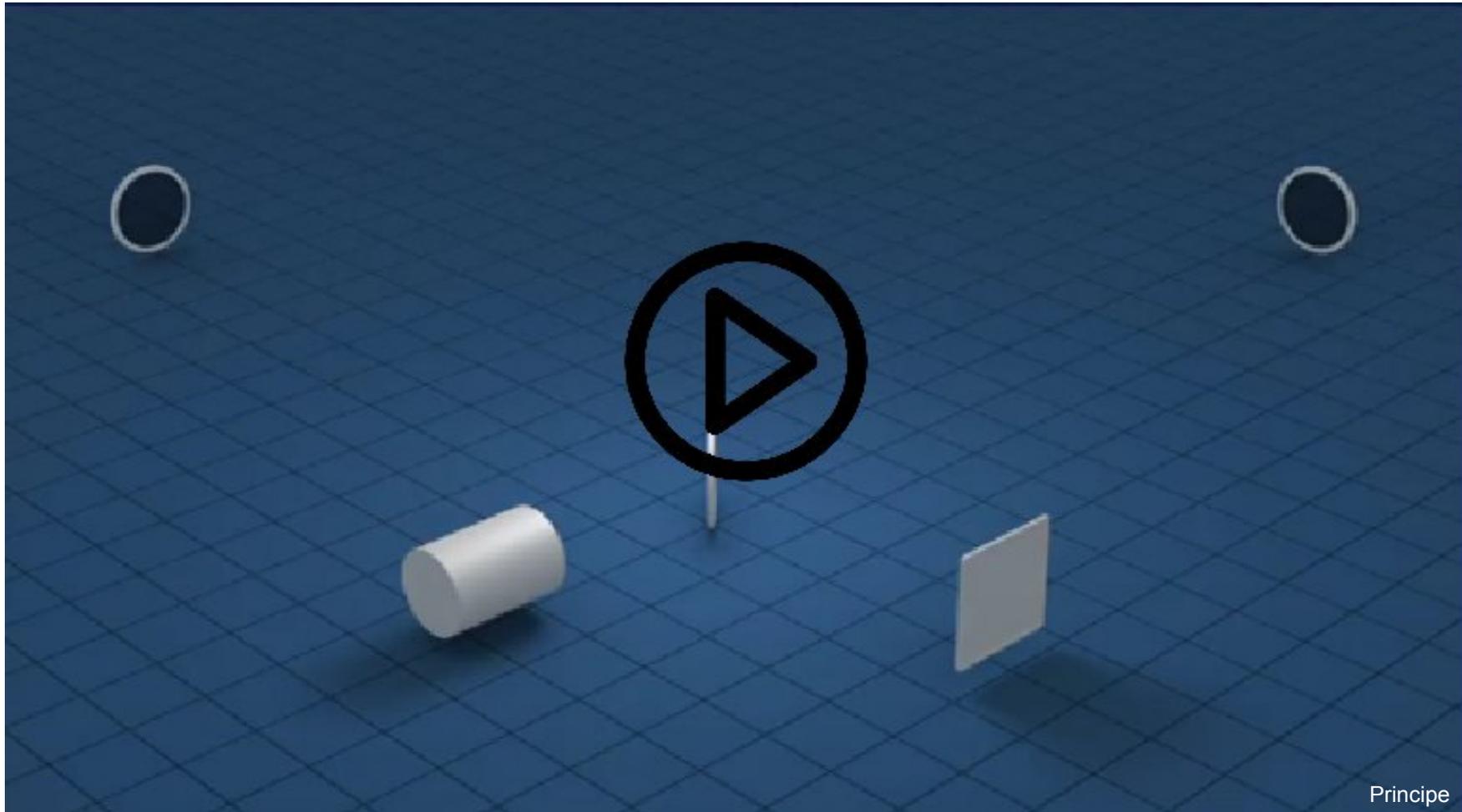
→ Temps

L'état d'interférence dépend de la différence de longueur entre les deux chemins  
L'interféromètre est réglé proche de la frange noire



# L'interféromètre de Michelson

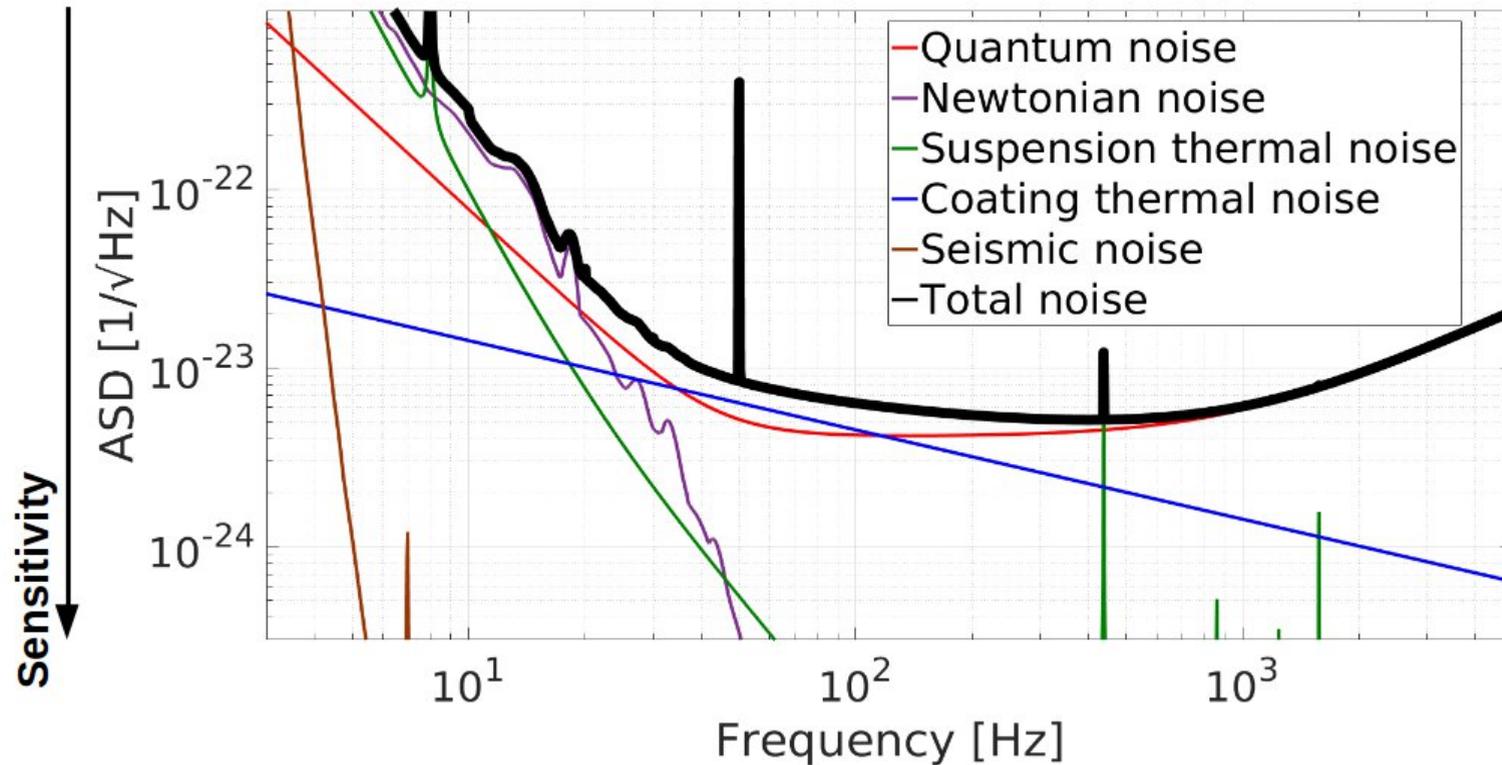
est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles





# La sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles

est la somme de plusieurs bruits ayant un impact dans différentes bandes de fréquences





# Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

## Le vide

~ 10 000 m<sup>3</sup> de vide à pression de 10<sup>-9</sup> mbar



## L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

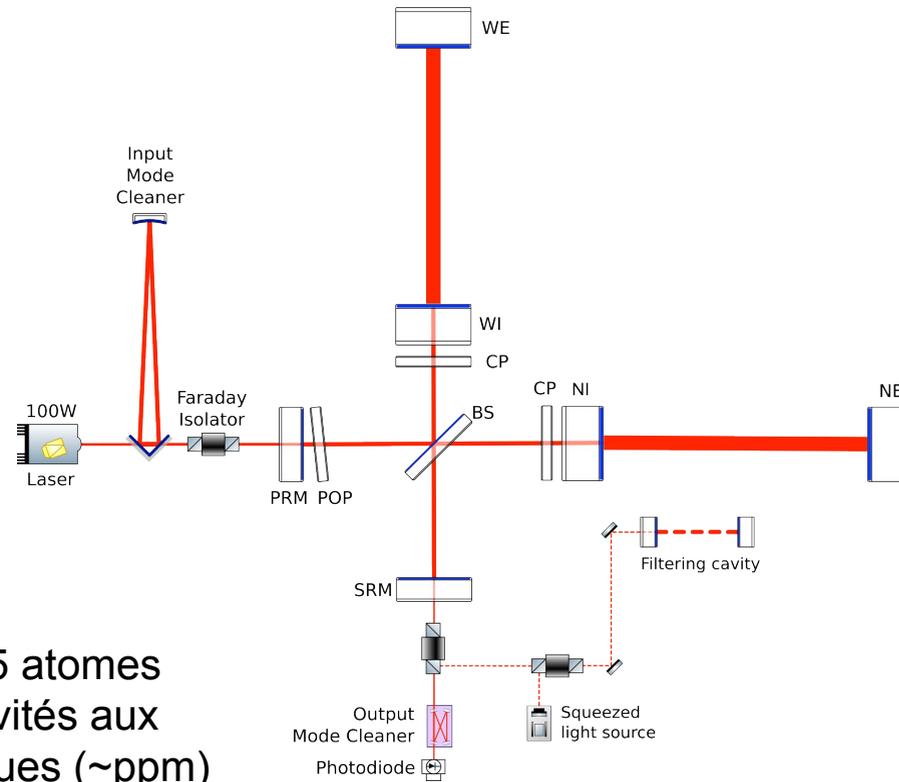


## Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



## Un interféromètre de Michelson amélioré





# Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

## Le vide

~ 10 000 m<sup>3</sup> de vide à pression de 10<sup>-9</sup> mbar



## L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

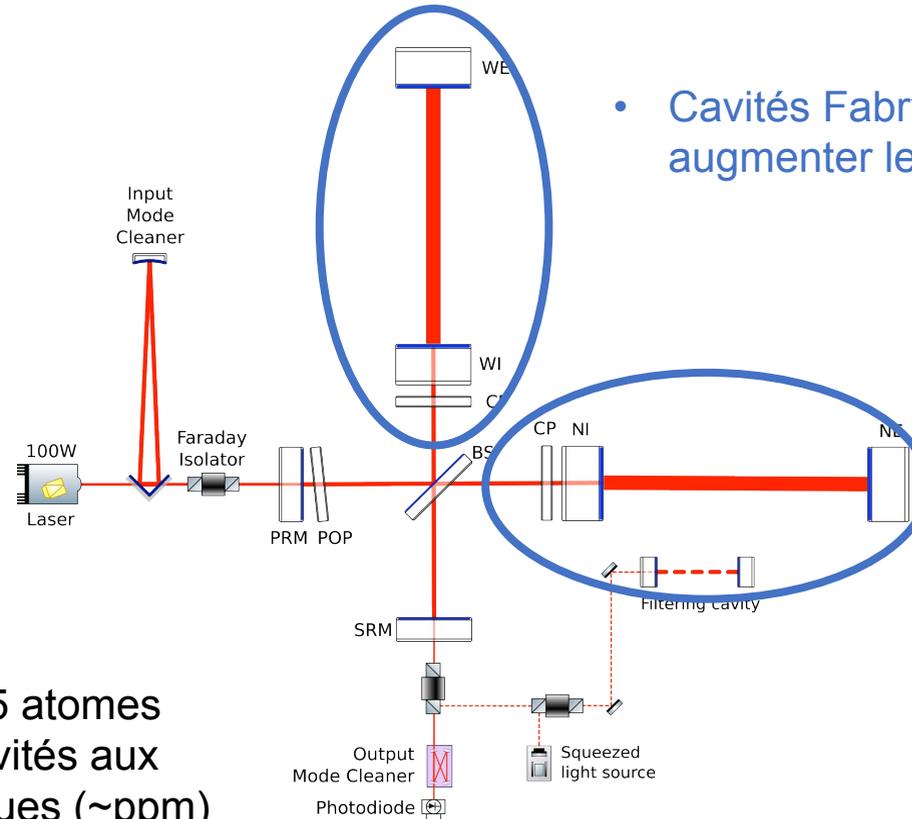


## Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



## Un interféromètre de Michelson amélioré



- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique



# Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

## Le vide

~ 10 000 m<sup>3</sup> de vide à pression de 10<sup>-9</sup> mbar



## L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

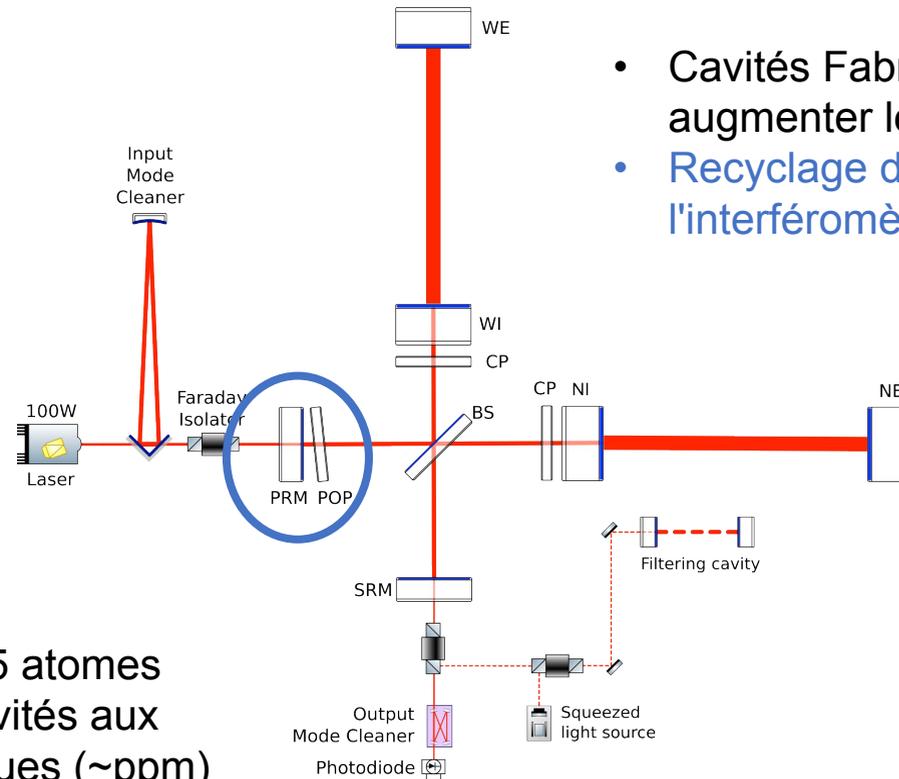


## Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



## Un interféromètre de Michelson amélioré



- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique
- Recyclage de la puissance rejetée par l'interféromètre



# Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

## Le vide

~ 10 000 m<sup>3</sup> de vide à pression de 10<sup>-9</sup> mbar



## L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

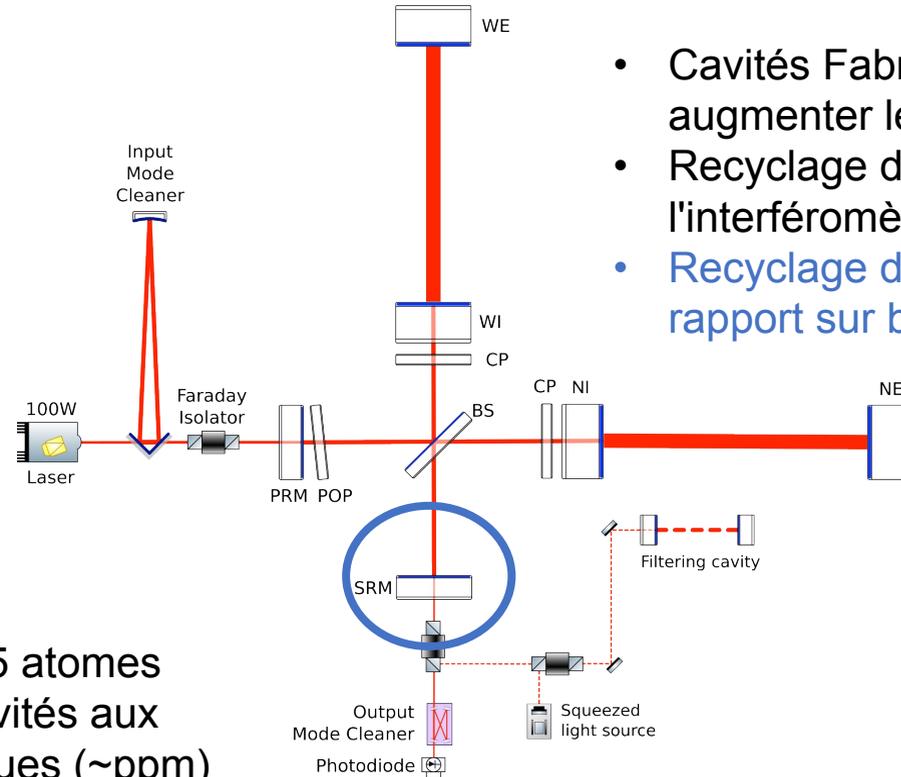


## Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



## Un interféromètre de Michelson amélioré

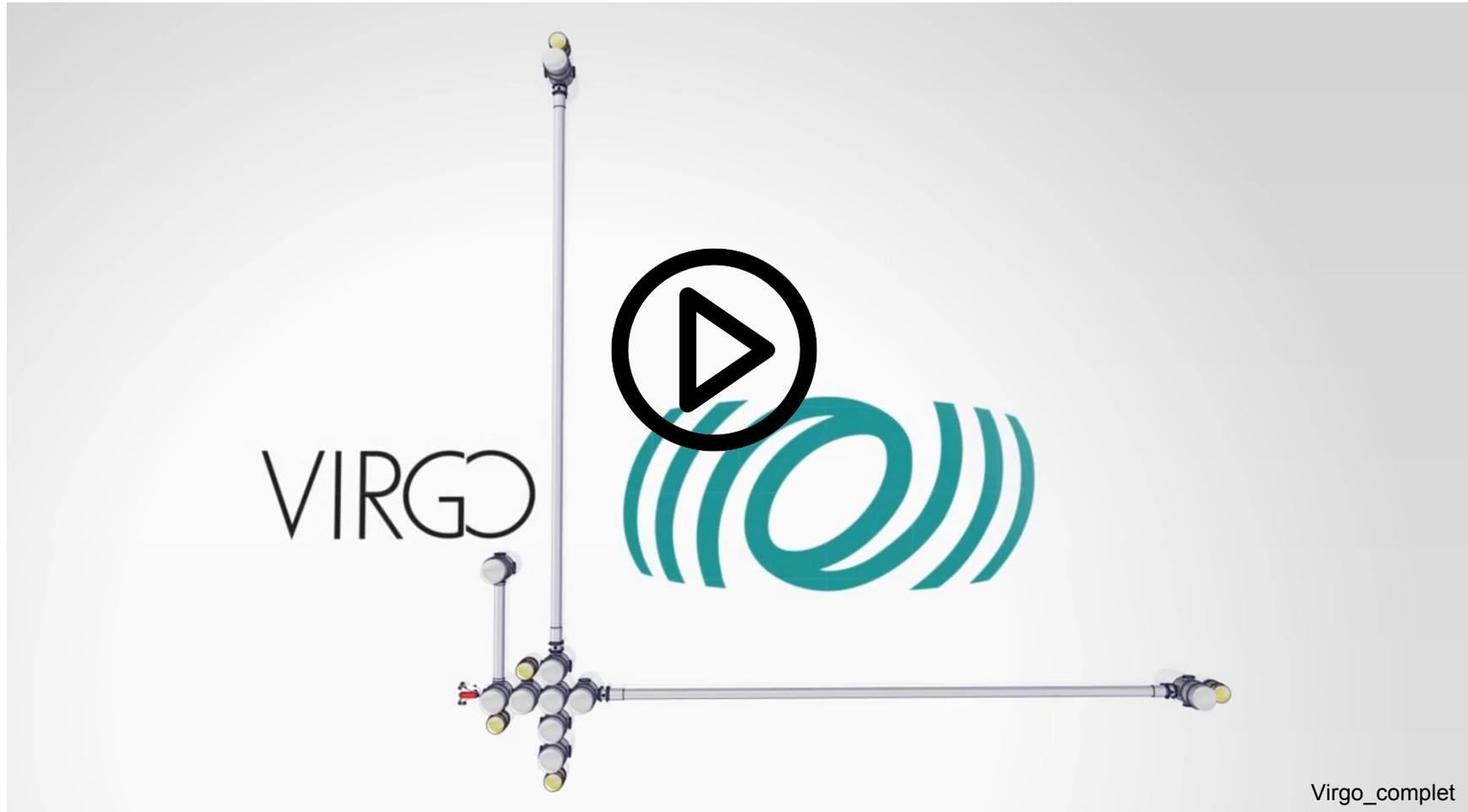


- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique
- Recyclage de la puissance rejetée par l'interféromètre
- **Recyclage du signal pour améliorer le rapport sur bruit de la détection**



# Advanced Virgo

un interféromètre de Michelson doublement recyclé





# Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

## Le vide

~ 10 000 m<sup>3</sup> de vide à pression de 10<sup>-9</sup> mbar



## Les miroirs

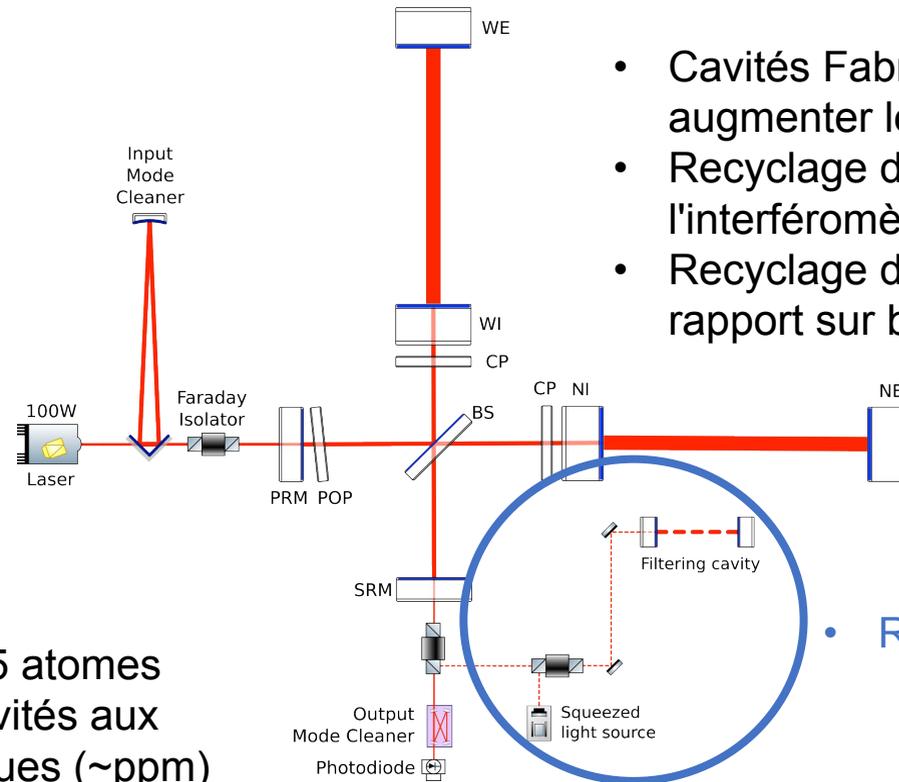
Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)

## L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol



## Un interféromètre de Michelson amélioré



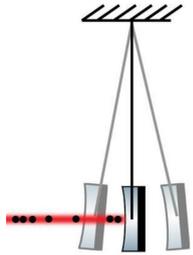
- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique
- Recyclage de la puissance rejetée par l'interféromètre
- Recyclage du signal pour améliorer le rapport sur bruit de la détection

• Réduction du bruit quantique



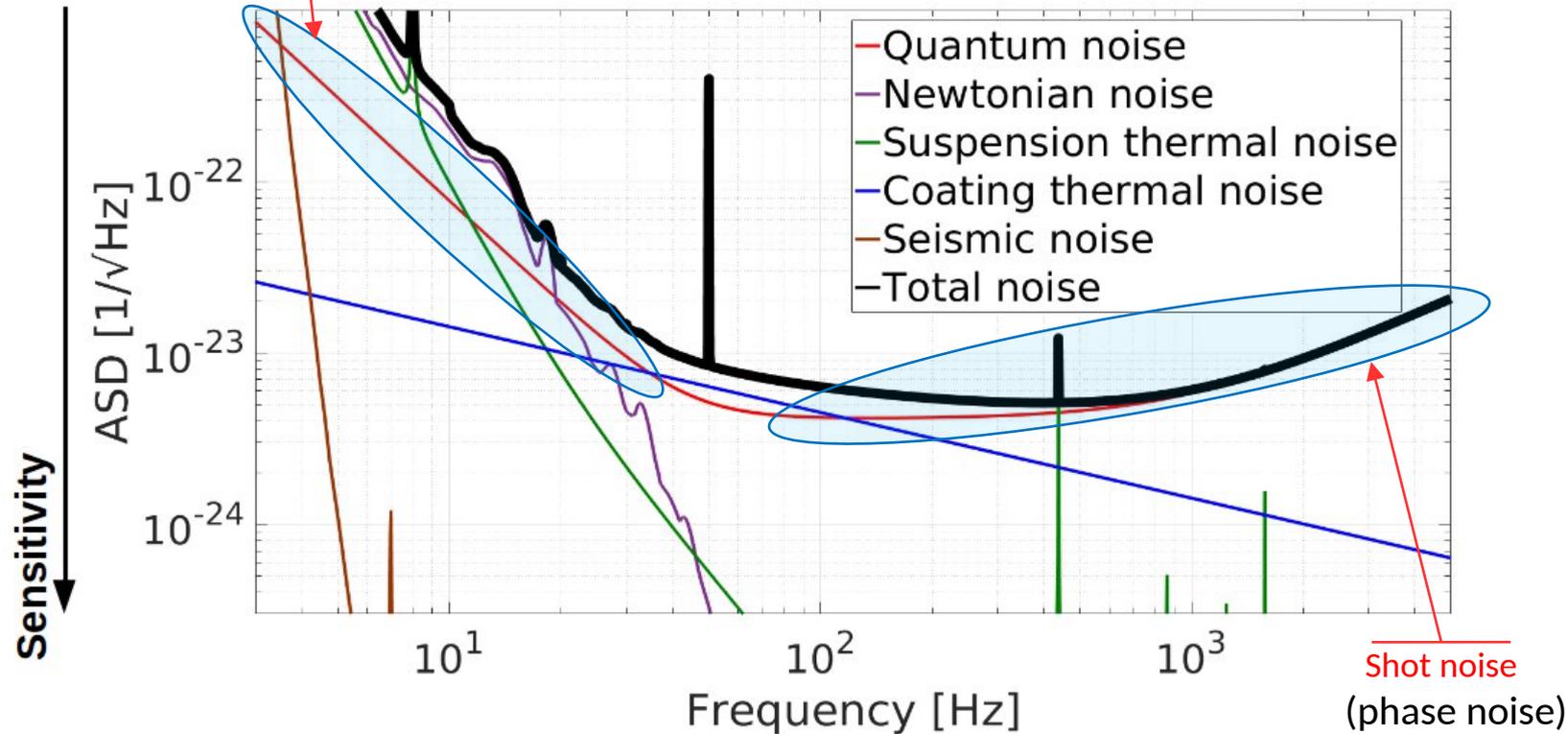
# Le bruit quantique

est limitant à hautes fréquence et proche des bruits limitants à basse fréquence et composé de deux sources de bruit



Radiation pressure noise

(amplitude noise)



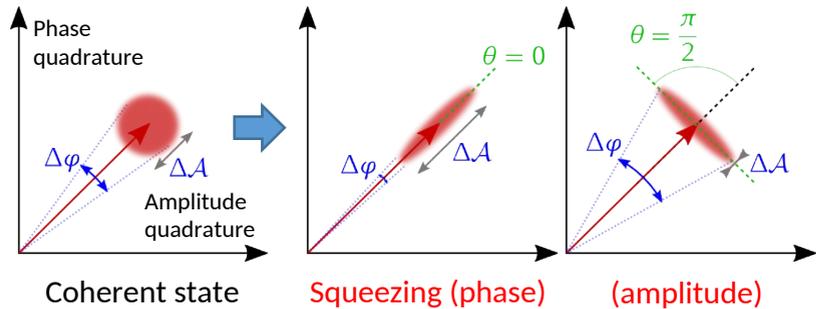


# Squeezing, des états comprimés de la lumière

pour réduire le bruit quantique dans toute la bande de fréquences

## Propriété quantiques

Relation d'incertitude de Heisenberg :  $\Delta A \times \Delta \varphi \geq 1$



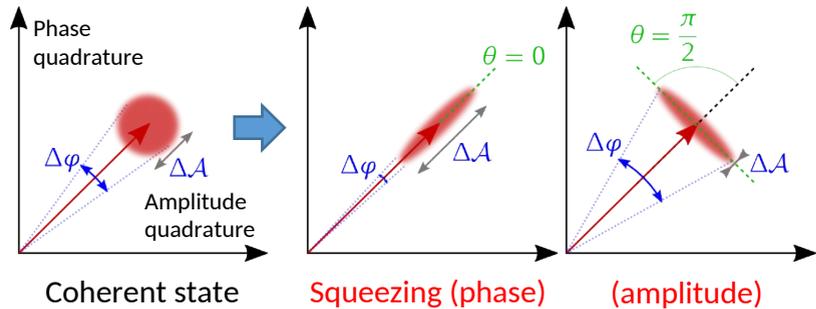


# Squeezing, des états comprimés de la lumière

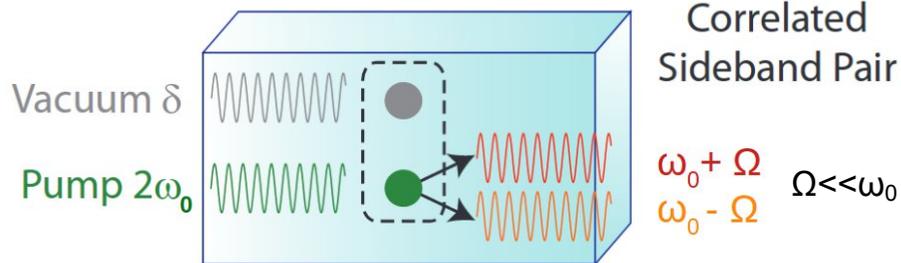
pour réduire le bruit quantique dans toute la bande de fréquences

## Propriété quantiques

Relation d'incertitude de Heisenberg :  $\Delta A \times \Delta \varphi \geq 1$



## Interaction non linéaire



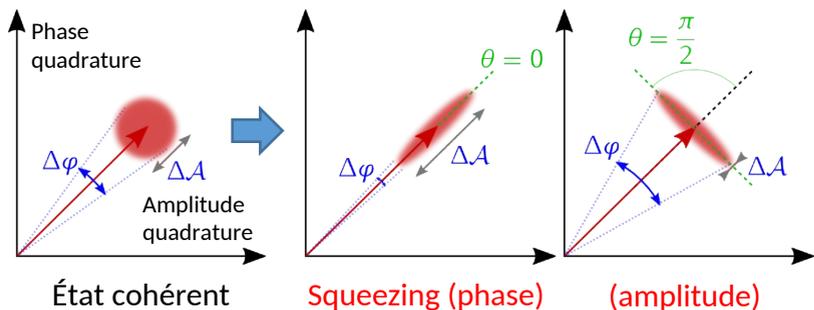


# Squeezing, des états comprimés de la lumière

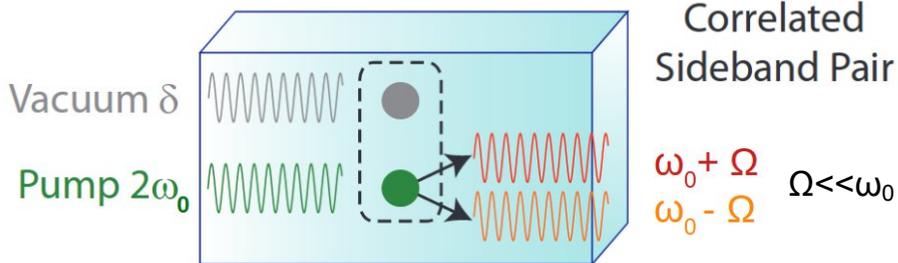
pour réduire le bruit quantique dans toute la bande de fréquences

## Propriété quantiques

Relation d'incertitude de Heisenberg :  $\Delta A \times \Delta \varphi \geq 1$

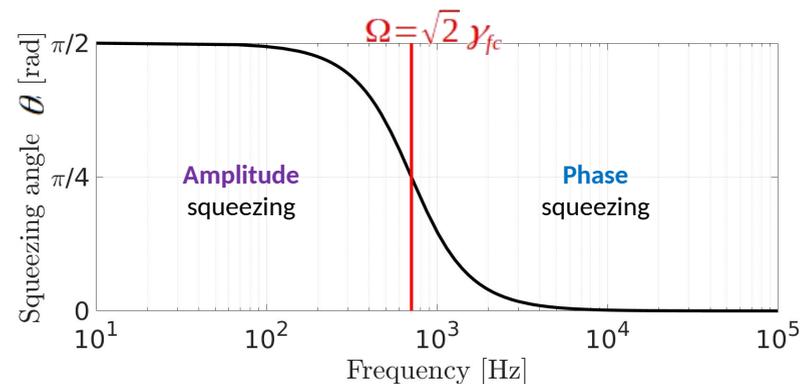
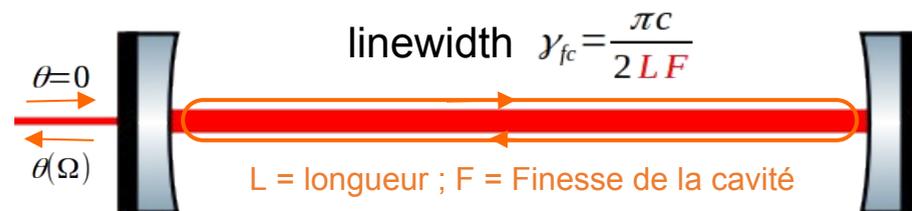


## Interaction non linéaire



## Dépendance en fréquence

Cavité Fabry-Perot surcouplée et détunée



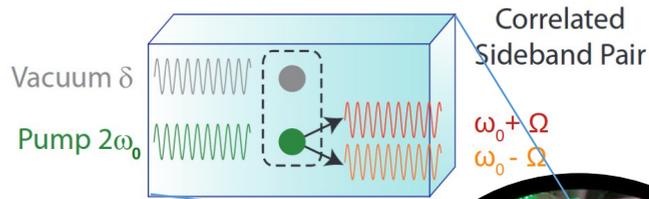
$$\text{Angle de l'ellipse de squeezing : } \theta = \frac{\varphi(\omega_0 + \Omega) + \varphi(\omega_0 - \Omega)}{2} [\pi]$$



# Le plateau technique CALVA à IJCLab

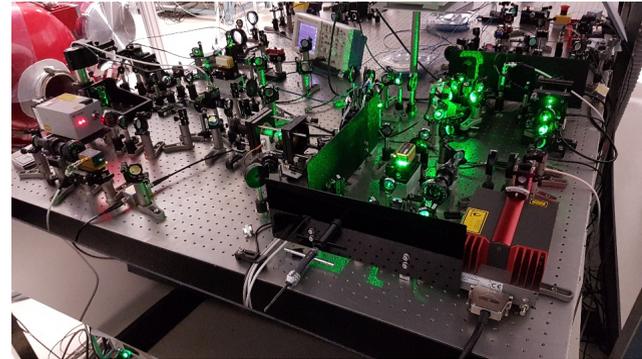
teste la technique de squeezing dépendant de la fréquence

Génération du squeezing dans une enceinte sous vide



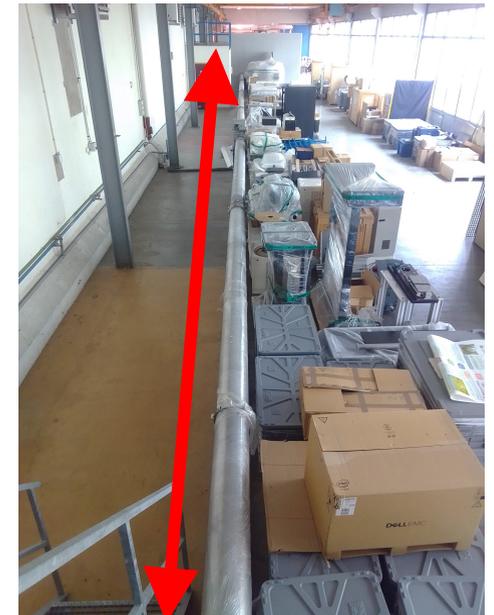
+ mesure du squeezing

Banc de préparation sous air (7 faisceaux générés à partir de 2 têtes laser)



⇒ installation et premières caractérisations réalisées  
⇒ la prochaine étape consiste à mesurer une réduction du bruit quantique

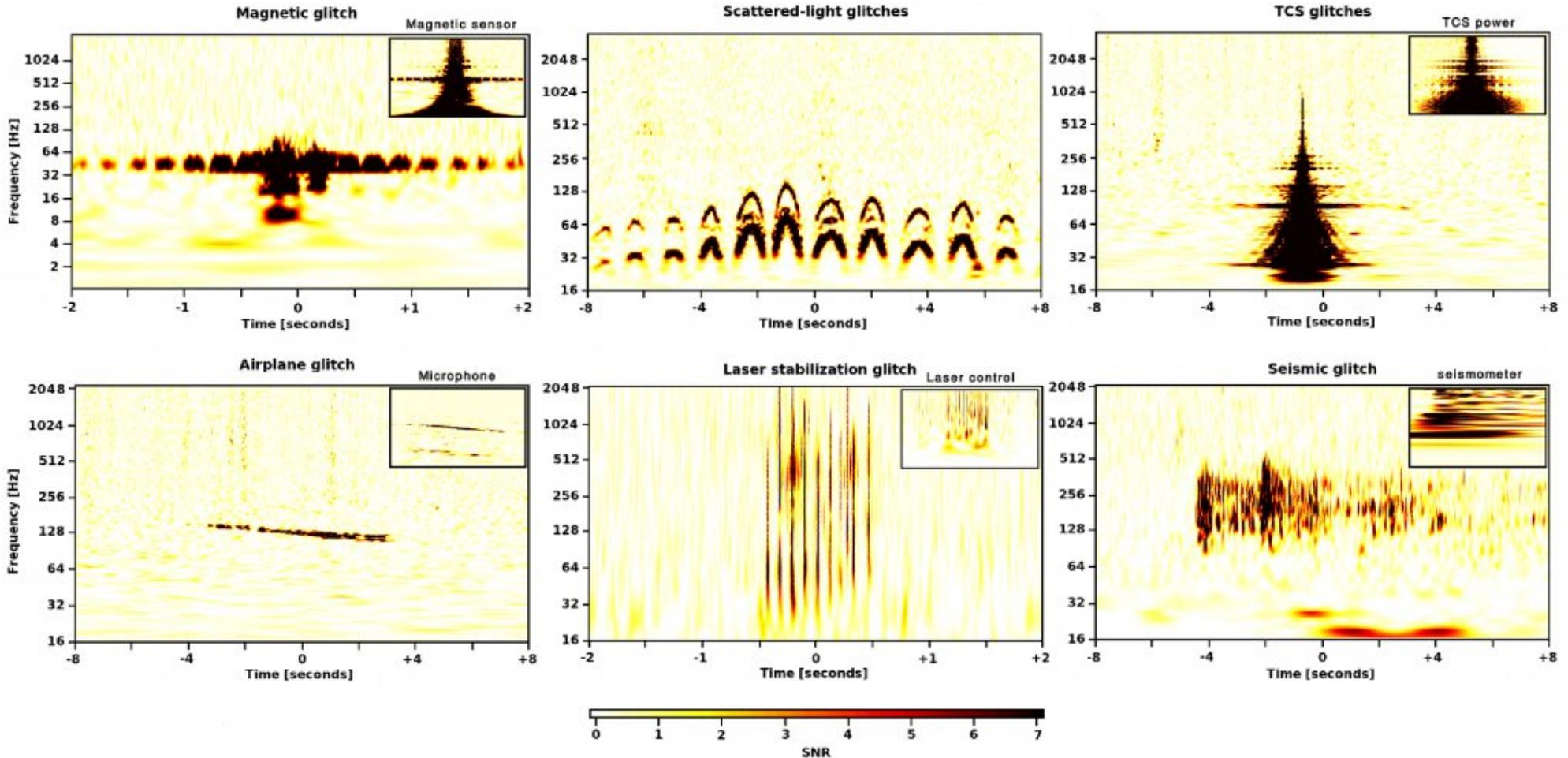
Cavité de 50 m pour obtenir la dépendance en fréquence





# La caractérisation des bruits du détecteur

est primordiale pour la détection des ondes gravitationnelles





## Un réseau international de détecteurs

permet une meilleure reconstruction des paramètres de la source

HL



Par exemple pour GW170817, en utilisant les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs :

- 2 détecteurs => 1 bande circulaire

Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

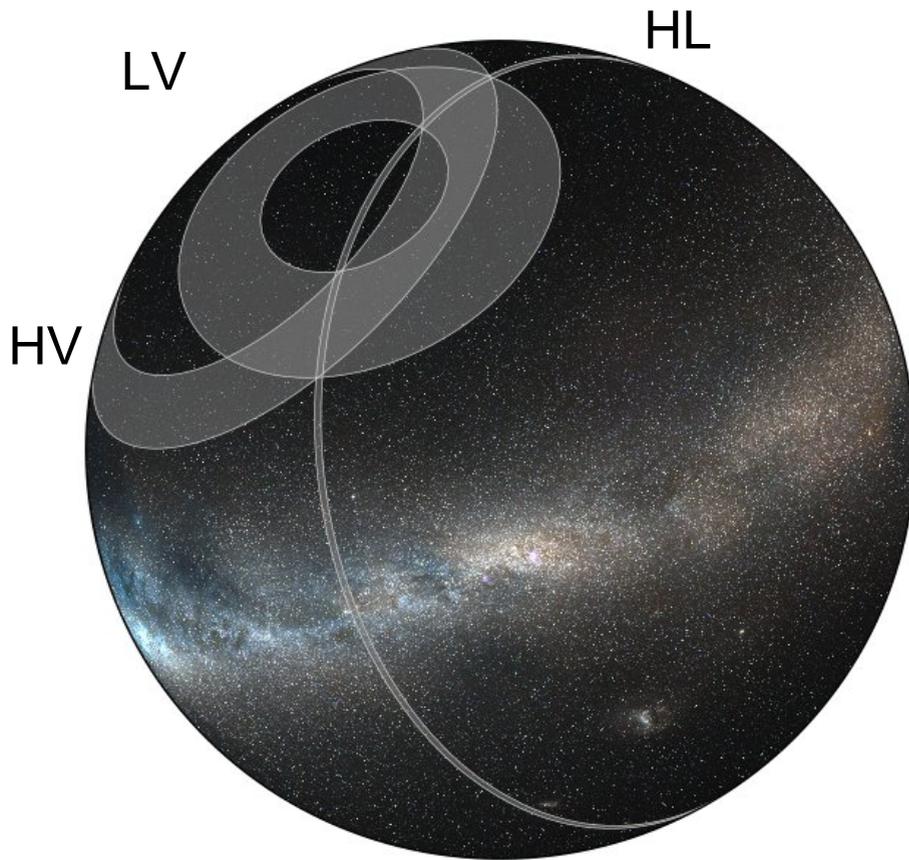


## Un réseau international de détecteurs

permet une meilleure reconstruction des paramètres de la source

Par exemple pour GW170817, en utilisant les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs :

- 2 détecteurs => 1 bande circulaire
- 3 détecteurs => 2 zones



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

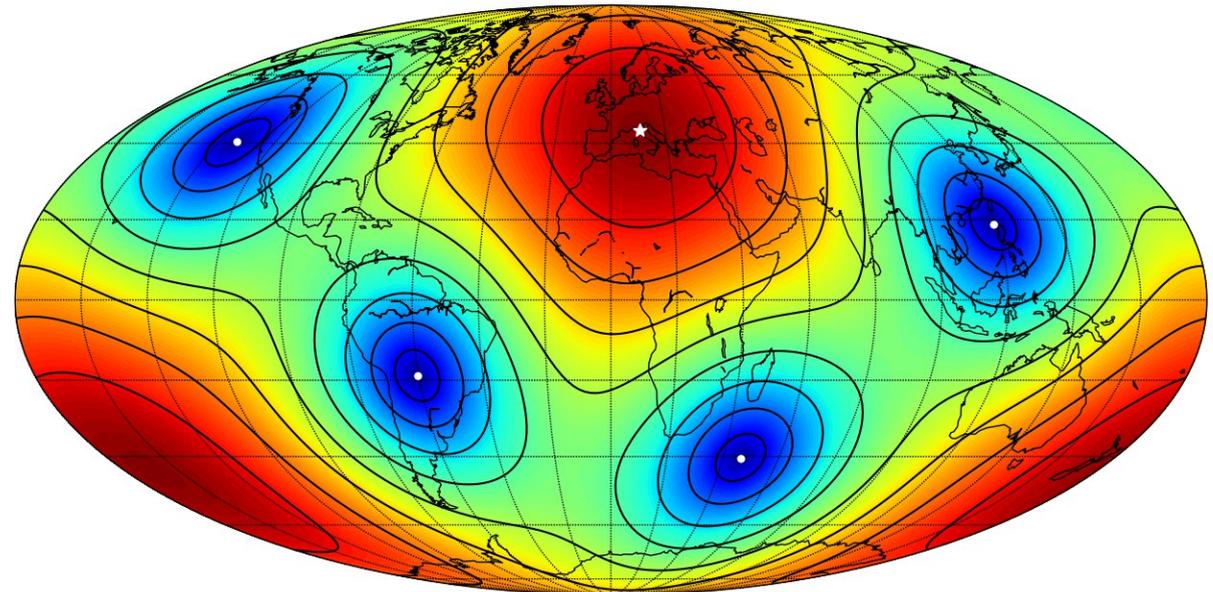
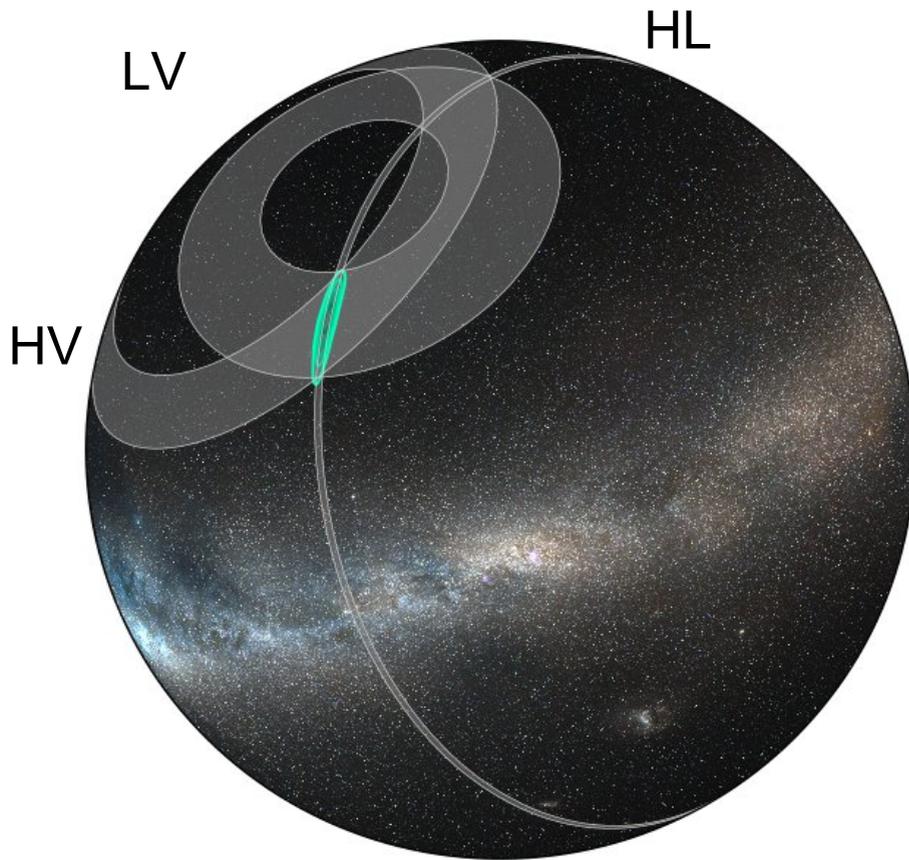


# Un réseau international de détecteurs

permet une meilleure reconstruction des paramètres de la source

Par exemple pour GW170817, en utilisant les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs :

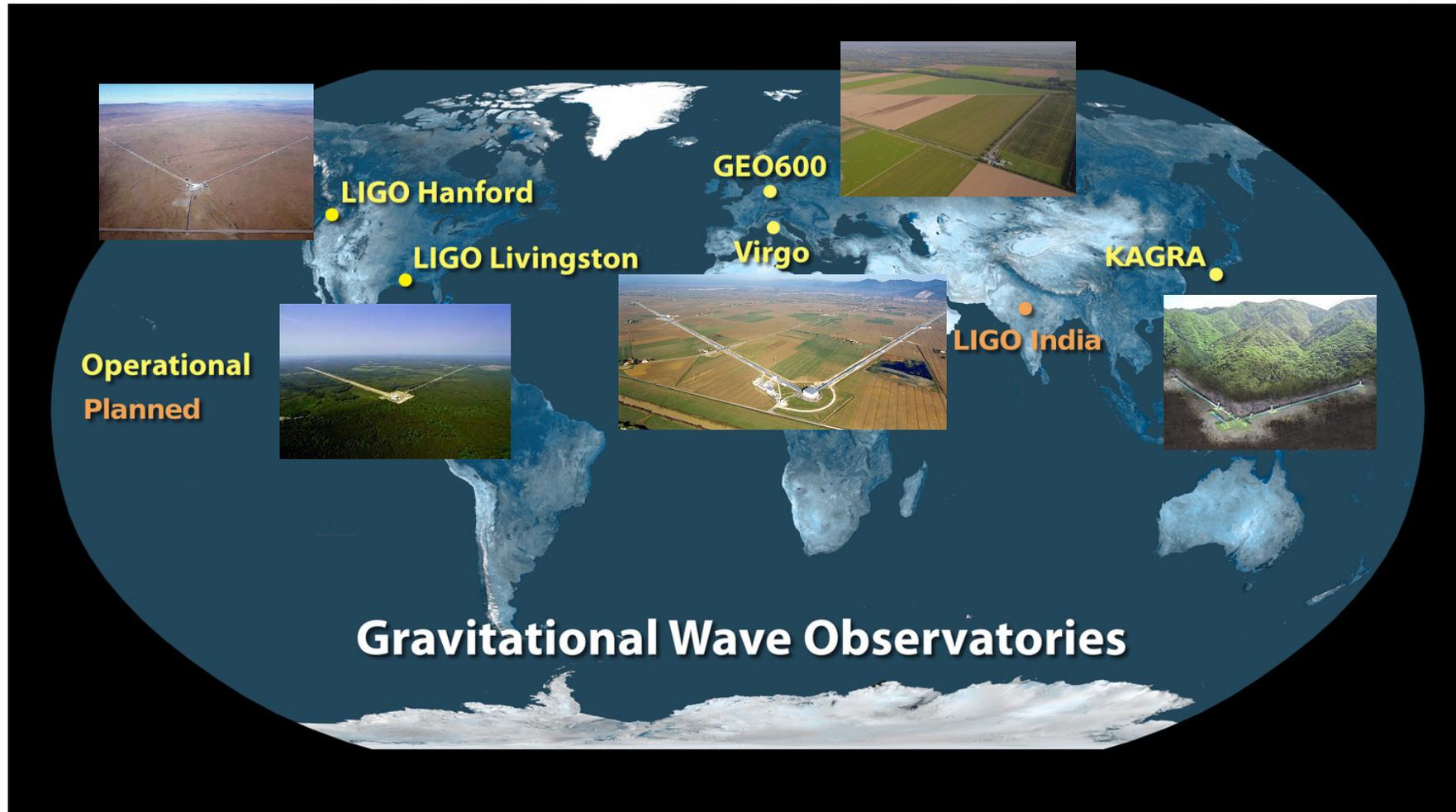
- 2 détecteurs => 1 bande circulaire
- 3 détecteurs => 2 zones
- 3 détecteurs + diagramme d'antenne => 1 zone



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)



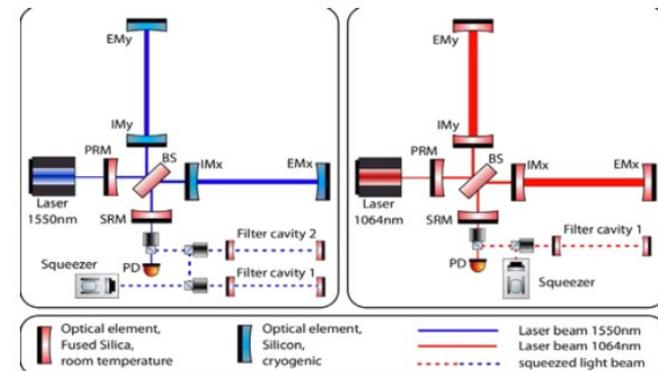
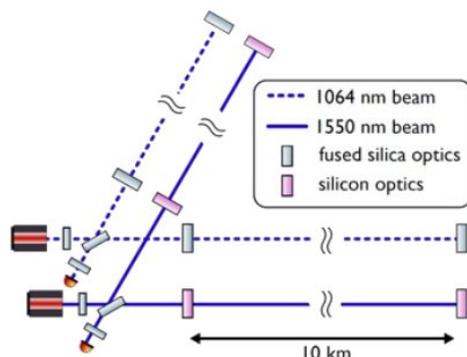
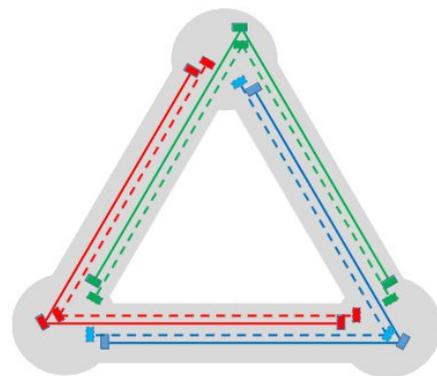
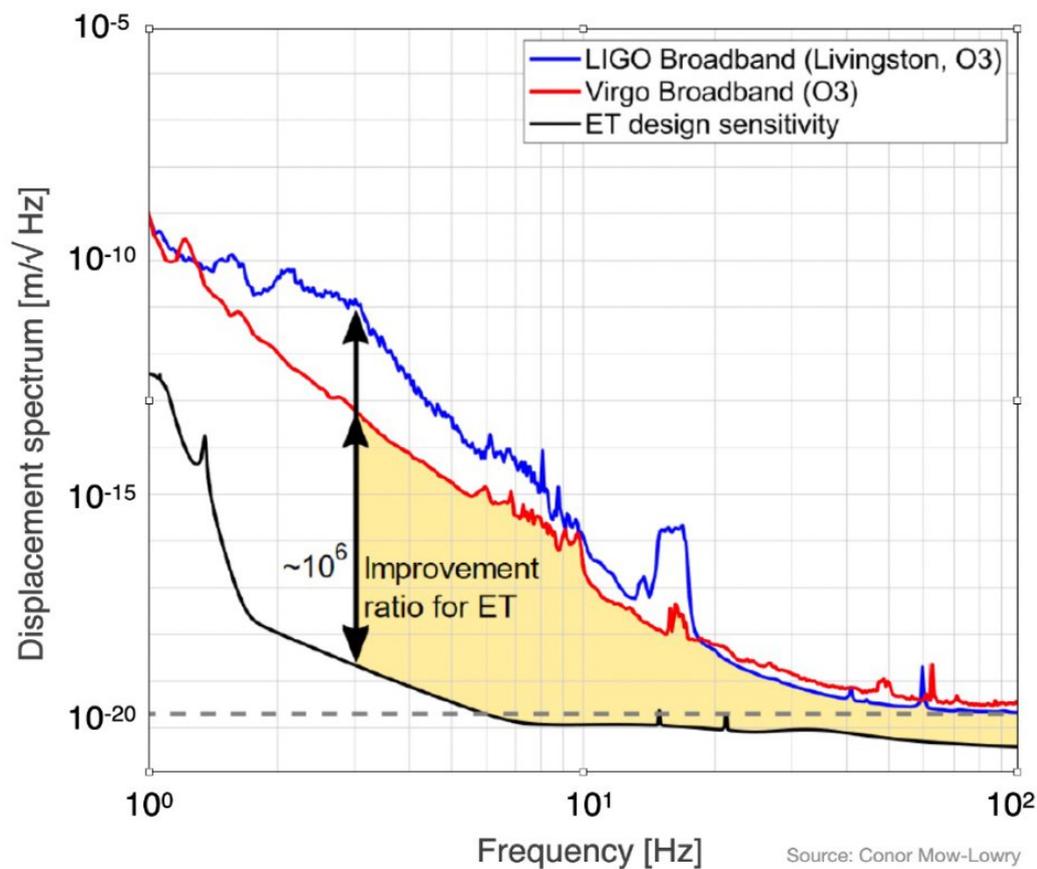
# Le réseau de 2ème génération





# Le détecteur Einstein Telescope (de 3ème génération)

améliorera encore la sensibilité de plus d'un facteur 10

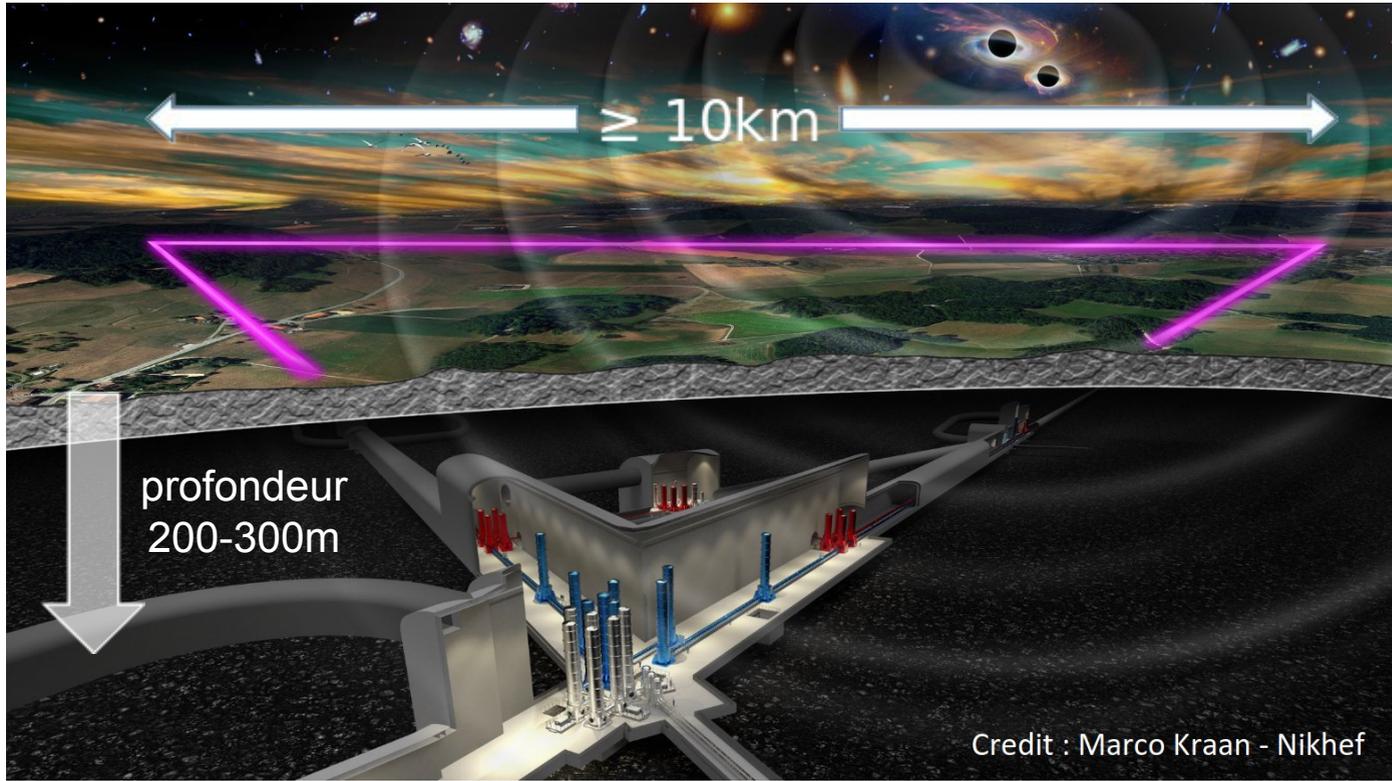


Parameter	ET-HF	ET-LF
Arm length	10 km	10 km
Input power (after IMC)	500 W	3 W
Arm power	3 MW	18 kW
Temperature	290 K	10-20 K
Mirror material	fused silica	silicon
Mirror diameter / thickness	62 cm / 30 cm	45 cm / 57 cm
Mirror masses	200 kg	211 kg
Laser wavelength	1064 nm	1550 nm
SR-phase (rad)	tuned (0.0)	detuned (0.6)
SR transmittance	10 %	20 %
Quantum noise suppression	freq. dep. squeez.	freq. dep. squeez.
Filter cavities	1×300 m	2×1.0 km
Squeezing level	10 dB (effective)	10 dB (effective)
Beam shape	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>00</sub>
Beam radius	12.0 cm	9 cm
Scatter loss per surface	37 ppm	37 ppm
Seismic isolation	SA, 8 m tall	mod SA, 17 m tall
Seismic (for $f > 1$ Hz)	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$
Gravity gradient subtraction	none	factor of a few



# Une nouvelle infrastructure

commençant ses observations vers la fin des années 2030 et capable d'accueillir de futures améliorations pendant plusieurs décennies





## De nombreuses activités à IJCLab

impliquant plusieurs groupes et services

Squeezing

Objets compacts

Enceintes à vide

Computing

Qualité de surface  
sous vide cryo

Tests de la  
relativité générale

Cryostat

Développement  
durable

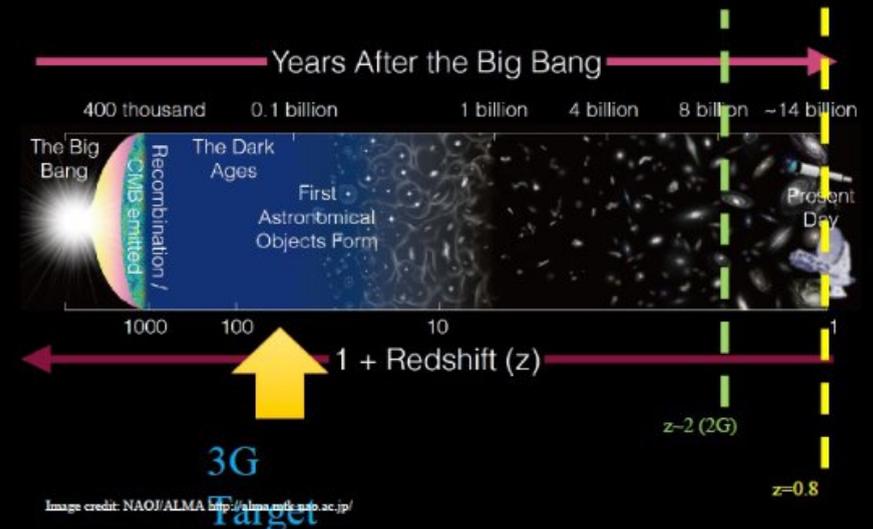
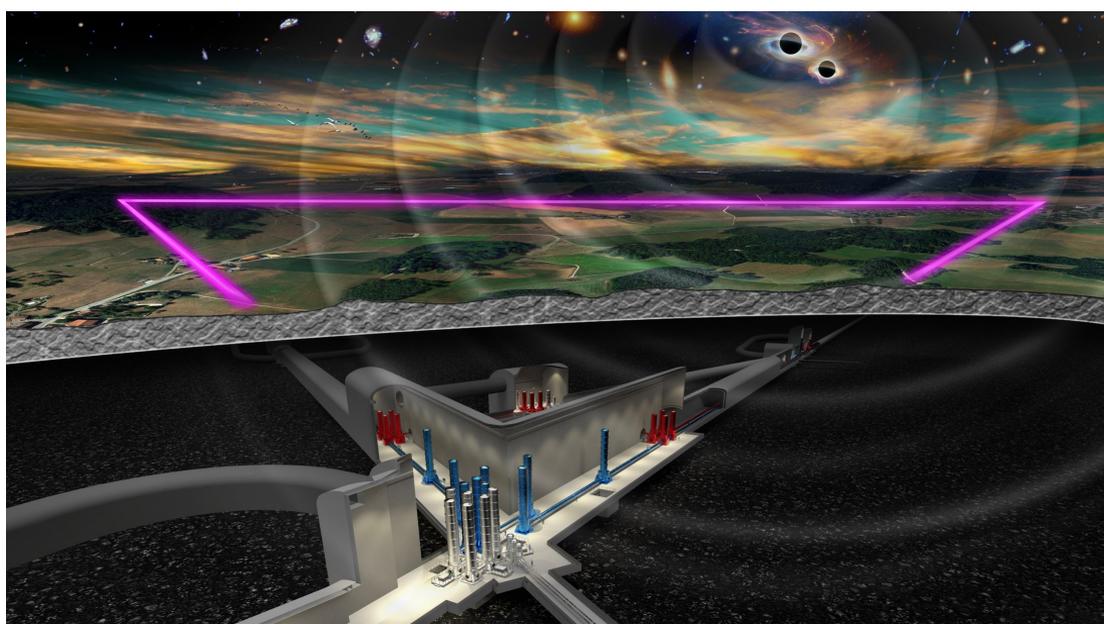
Cryogénie

Étude des  
sursauts gamma



# Conclusion

- Les détecteurs d'ondes gravitationnelles interférométriques au sol sont des outils optiques extrêmement sensibles qui ont permis les premières détections directes d'ondes gravitationnelles
- À chaque amélioration des détecteurs on augmente l'horizon observable
- Les détecteurs actuels sont la 2<sup>ème</sup> génération de détecteurs, de par leur infrastructure, ils sont limités à environ 6 milliards d'années lumière d'horizon
- Les détecteurs de 3<sup>ème</sup> génération auront un horizon leur donnant accès quasiment à toutes les binaires de trous noirs de masses stellaires et d'étoiles à neutrons de l'Univers





**Merci !**