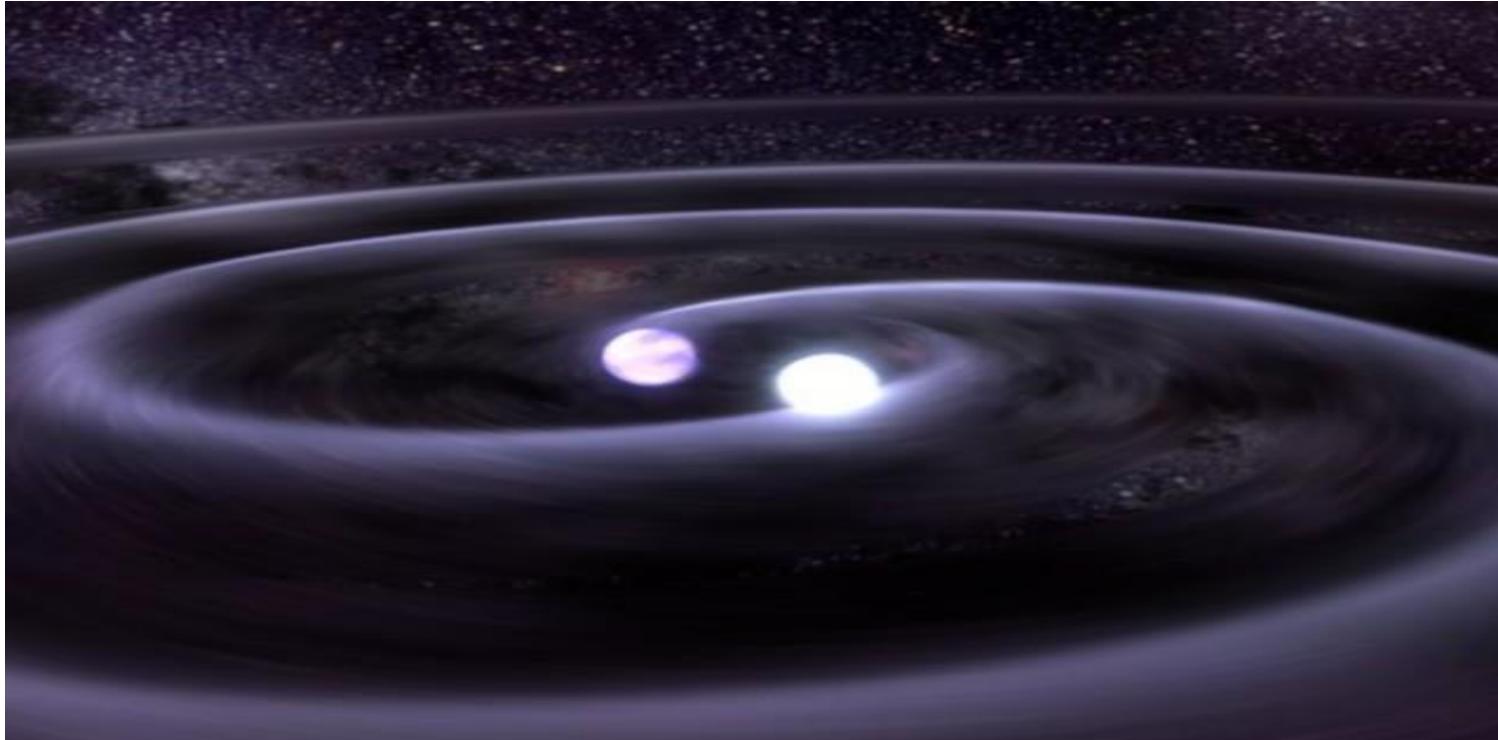


ONDES GRAVITATIONNELLES (GW):



SOURCES, MANIFESTATIONS, DETECTION

Nicolas Douillet (Doctorant-ingénieur ARTEMIS-OCA)



Chronologie

Introduction: GW sources astrophysiques et origines théoriques relativistes

I Propriétés et manifestations des GW

II Principe de détection: les interféromètres terrestres et spatiaux existants ou en projets

III Caractérisation / analyse des données des GW

Conclusion & perspectives

Théorie de la gravitation 1: Isaac Newton



Gravitation universelle (XVII^e)

Le temps est absolu (identique en tout point de l'espace)

La gravitation est une force instantanée qui agit à distance

Très bonne approximation mais incapable d'expliquer certains phénomènes célestes.

-> Incomplète -> relativité d'Einstein

Théorie de la gravitation 2: Albert Einstein

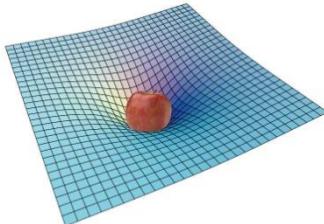
Relativité générale (1916)

Le temps est relatif à la vitesse de l'observateur (et donc au référentiel)

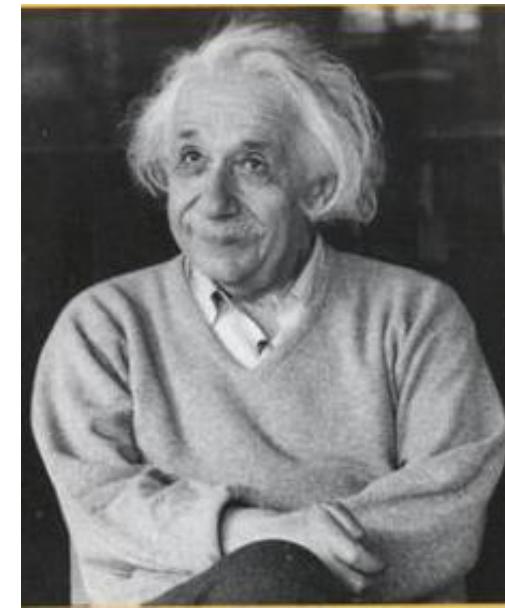
L'espace et le temps sont liés (notion d'espace-temps)

La gravitation est due à la courbure de l'espace-temps

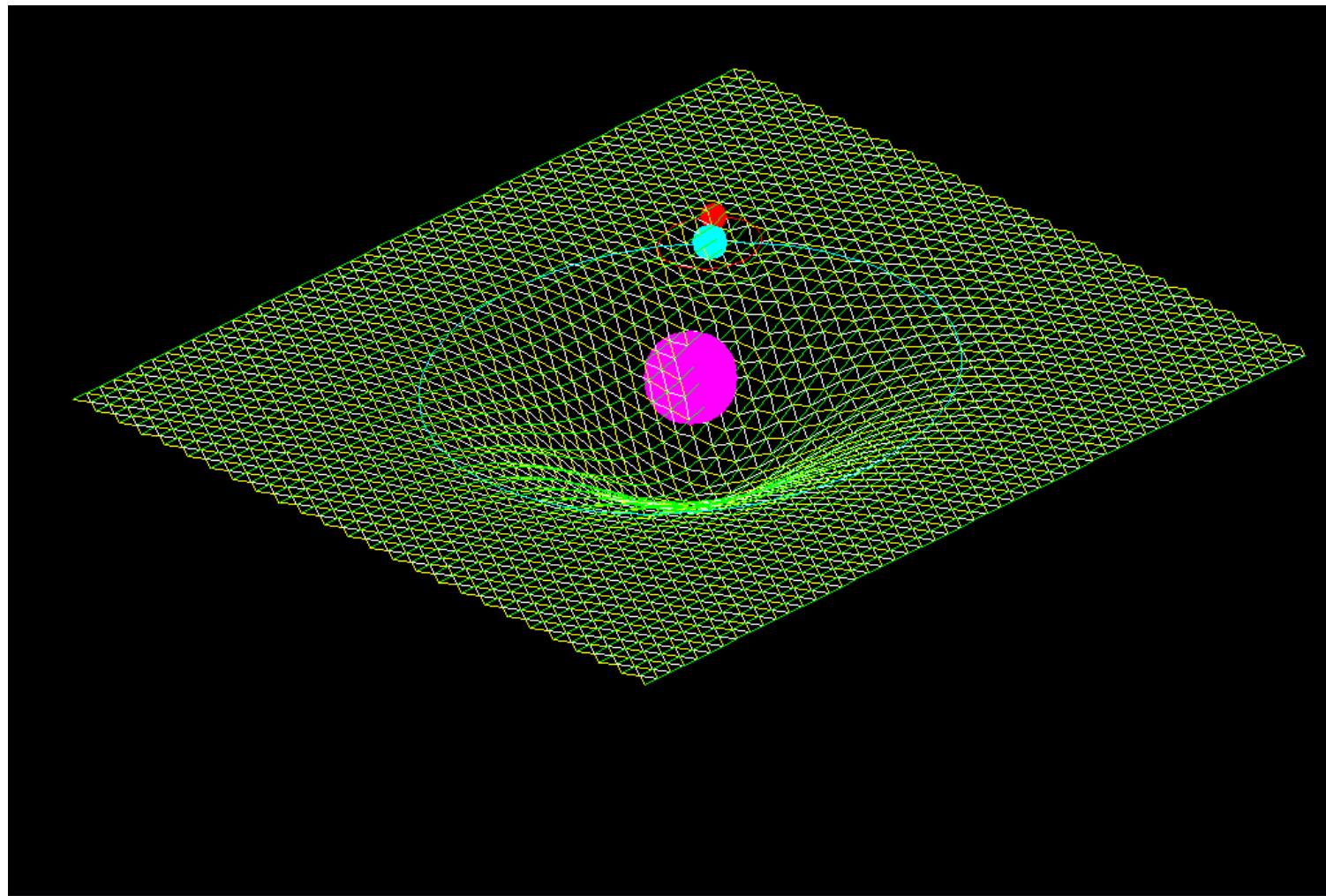
Le champ gravitationnel se propage à la vitesse (finie) c .



Meilleure théorie de la gravitation à ce jour
-> N'a pas été pris en défaut par les observations



Gravitation = courbure de l'espace-temps



Compléments sur la relativité (1)

- (1): Pourquoi parle-t-on d' "espace-temps" ?

Déplacement de l'observateur

$$d\tau = \frac{ds}{c} = dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Vitesse de l'observateur en mouvement

Temps propre (lié à l'observateur en mouvement)

Temps coordonnées (lié au repère d'observation)

-> Aux vitesses relativistes ($v \sim c$), le temps semble se "figer" ($d\tau \rightarrow 0$)
(paradoxe des jumeaux)

Compléments sur la relativité (2)

- (2): La géométrie de l'espace-temps (sa courbure) est liée à son contenu matière/énergie (équations d'Einstein)
-> "matière-espace-temps"
- (3): Le champ de gravitation se propage
-> notion **d'ondes gravitationnelles** (en attente d'être détectées)
- (4): A toute **trajectoire d'espace** correspond sa propre **trajectoire de temps** -> Une horloge, une montre, mesurent aussi une trajectoire d'espace.

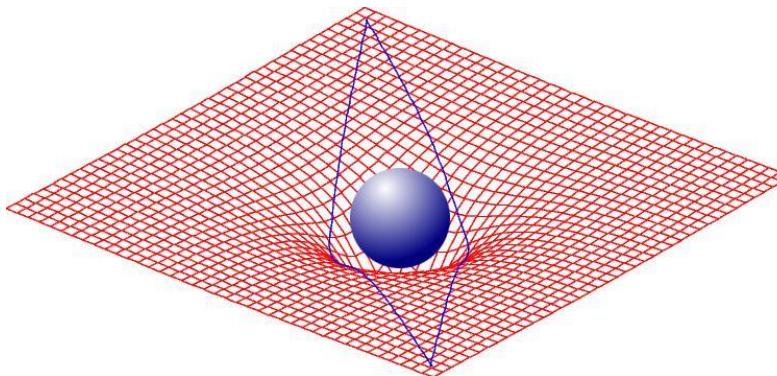
Compléments sur la relativité (3)

- (5): Comment les rayons lumineux peuvent-ils être déviés par la gravité alors que les photons n'ont pas de masse?

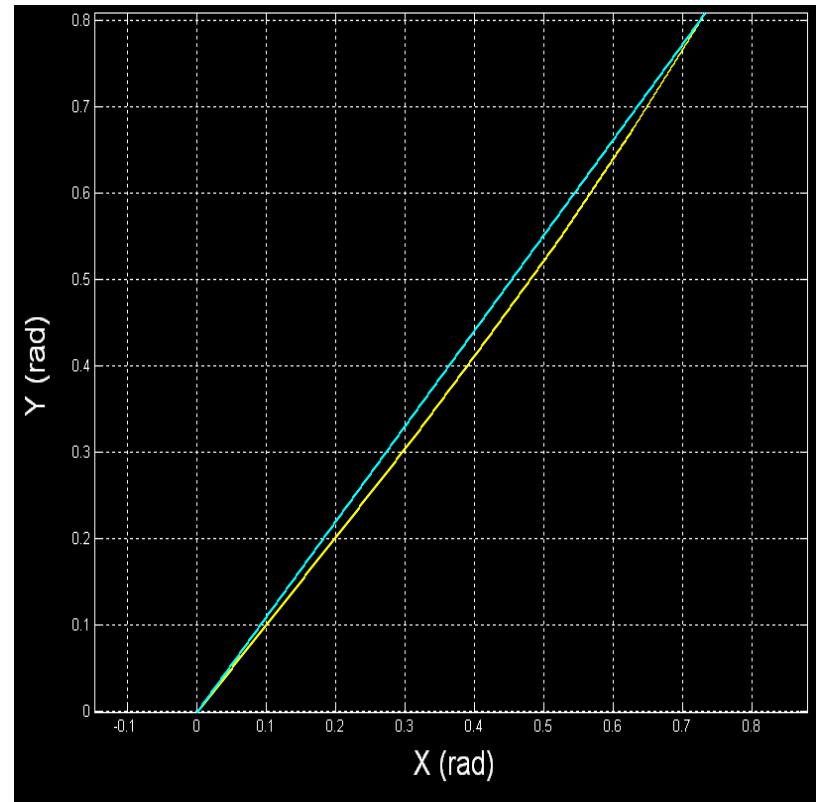
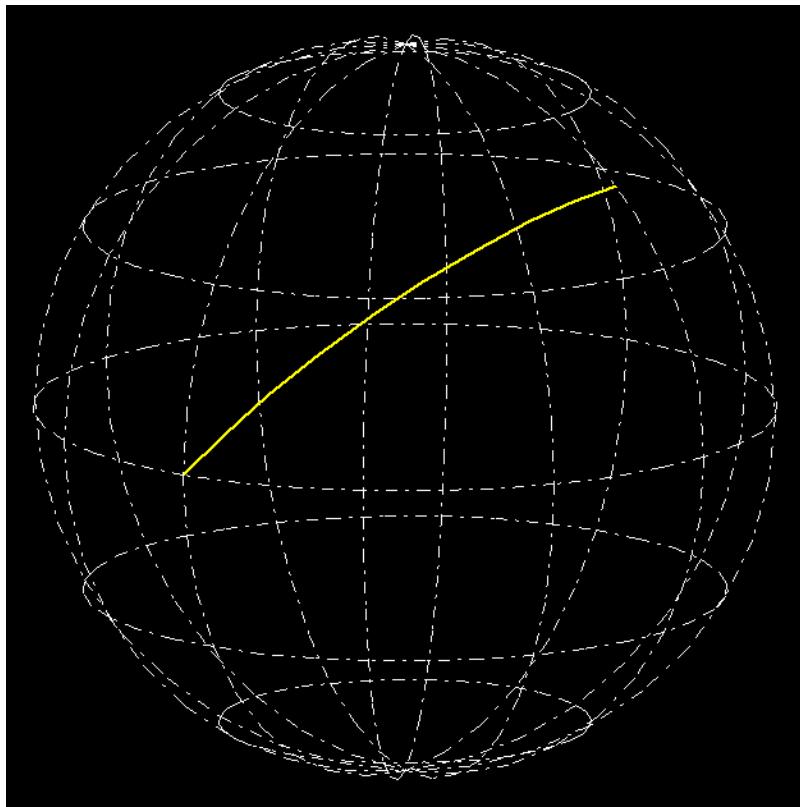
La lumière se propage suivant un principe de moindre espace-temps

-> les rayons lumineux suivent les géodésiques de l'espace-temps

Dans un **espace courbe** (non plan), les **géodésiques ne sont plus des lignes droites**:

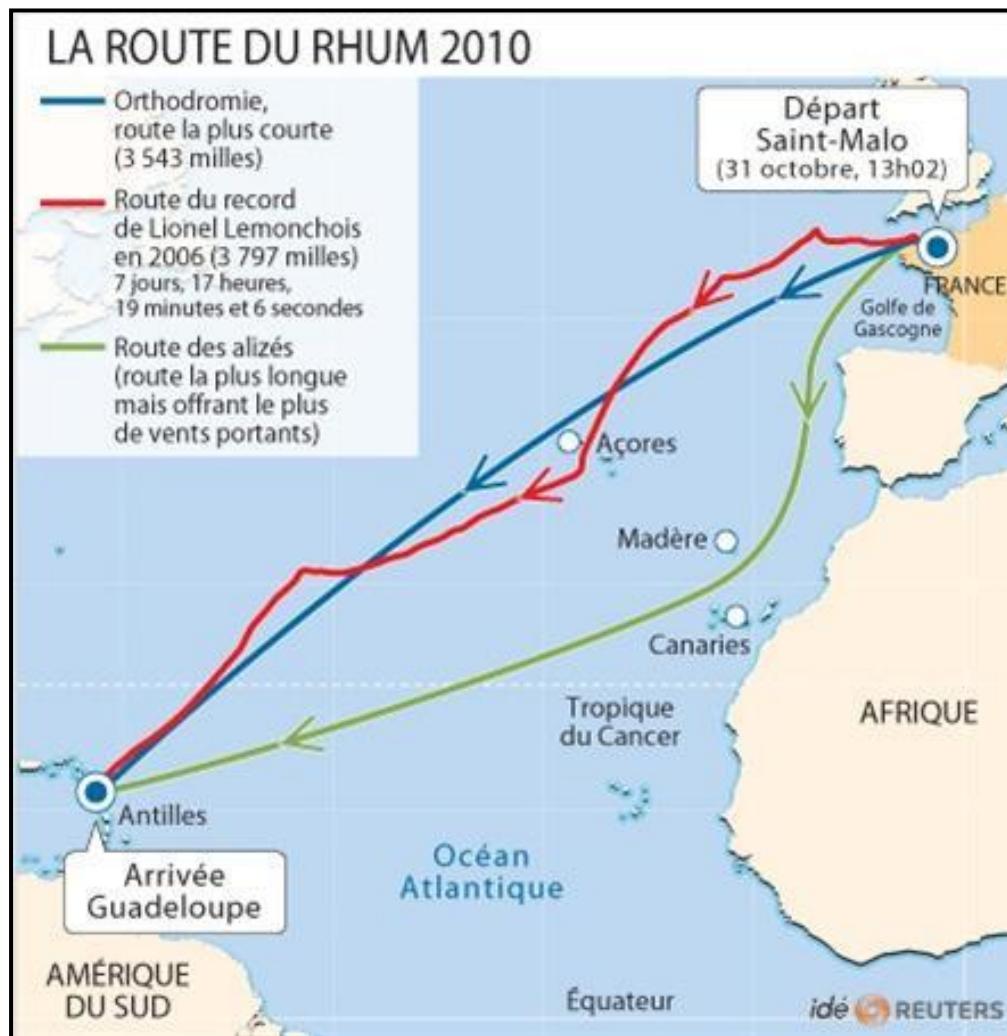


Géodésique d'un espace

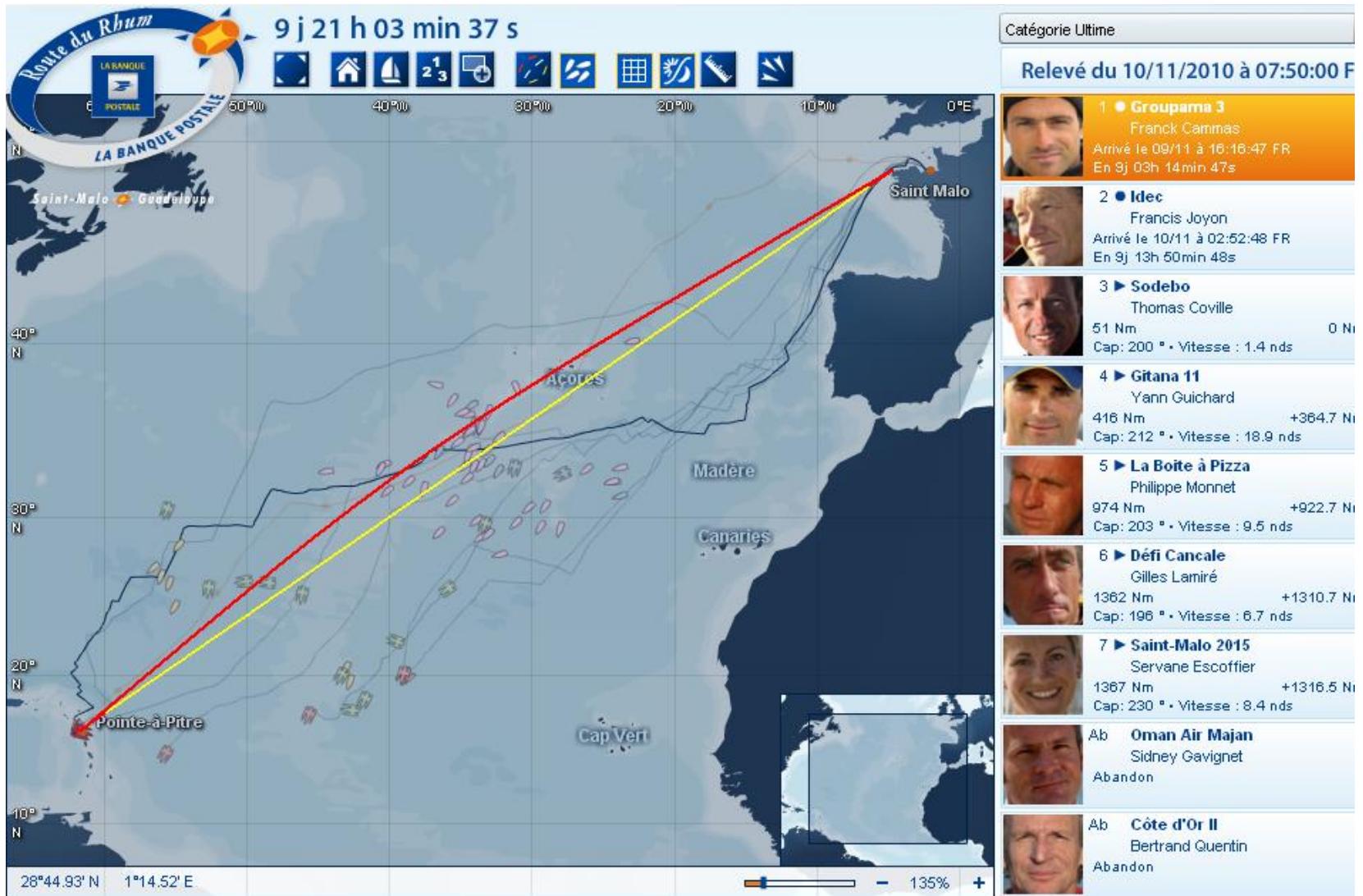


Ramenée en projection sur un plan, la géodésique n'est pas une droite!

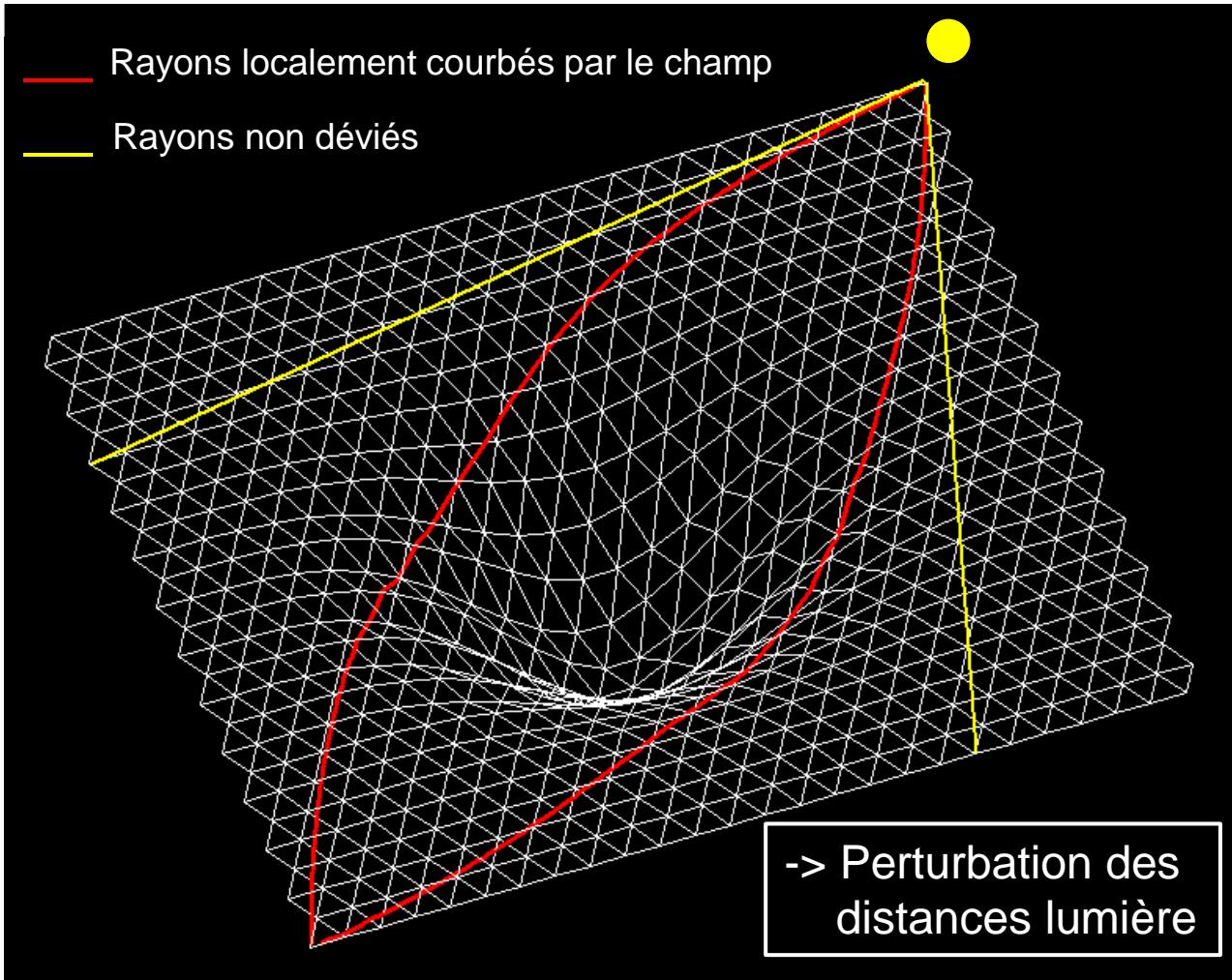
Exemple: la route du Rhum (1)



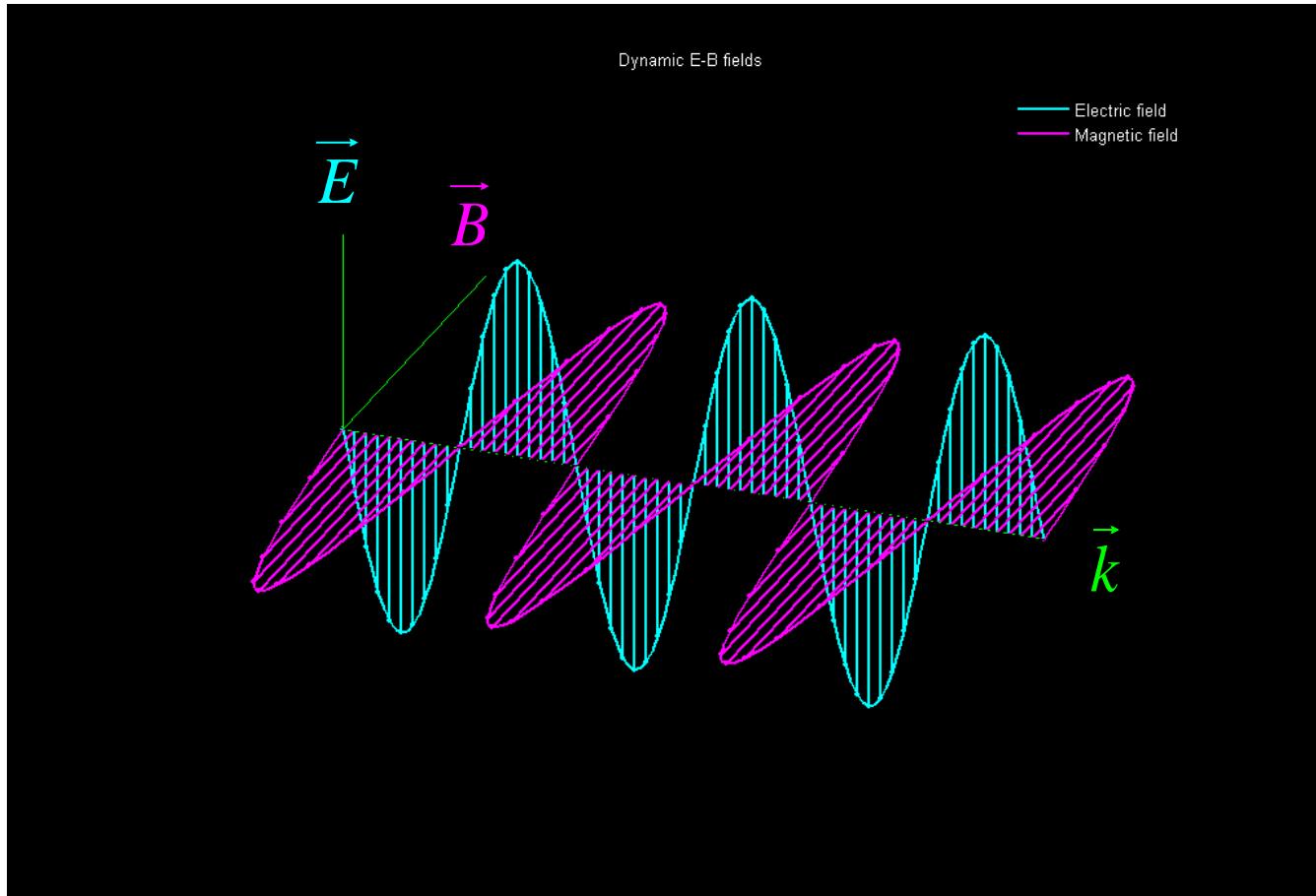
Exemple: la route du Rhum (2)



Courbure gravitationnelle de la géodésique suivie par un rayon

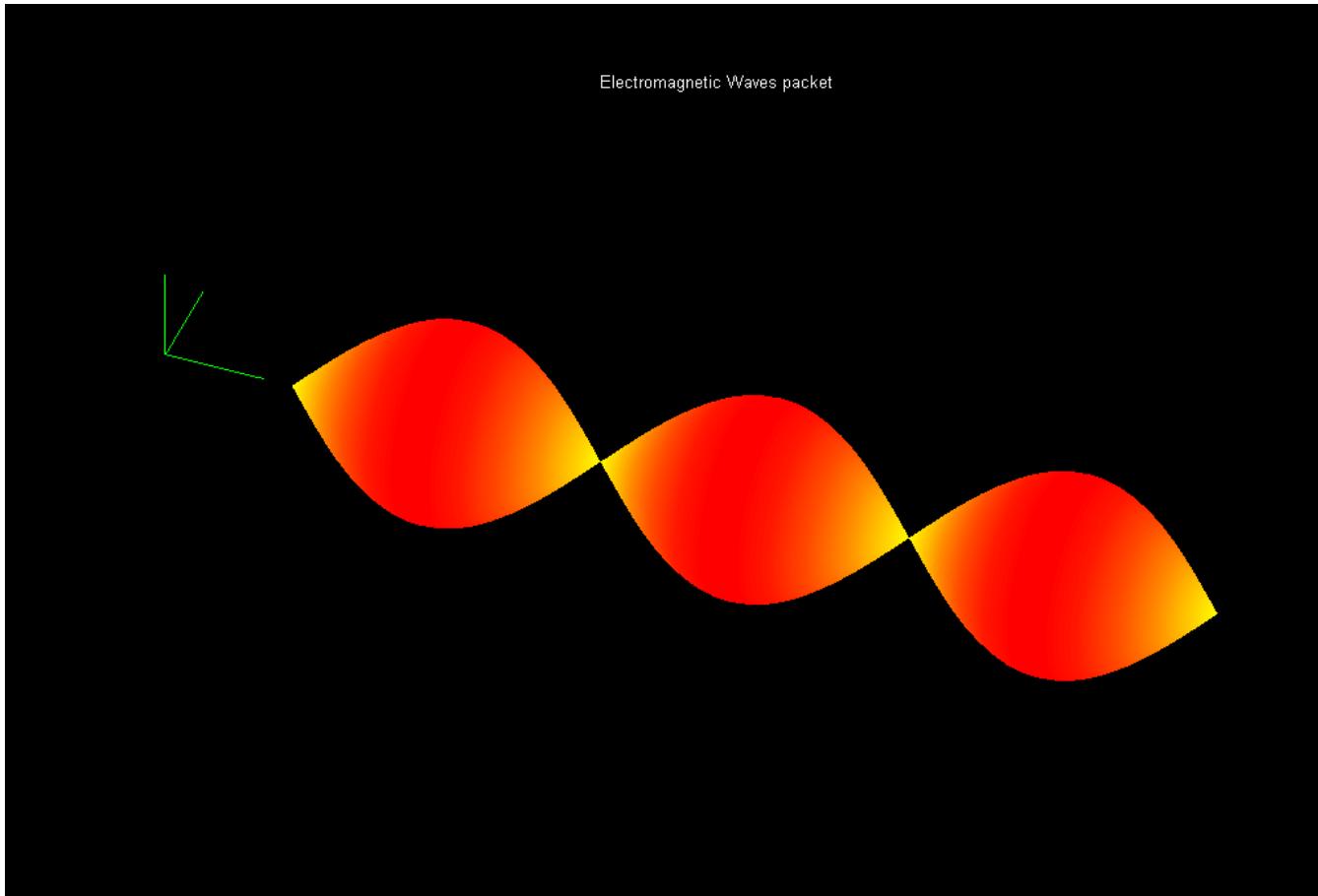


Analogies ondes électromagnétiques / ondes gravitationnelles (1)



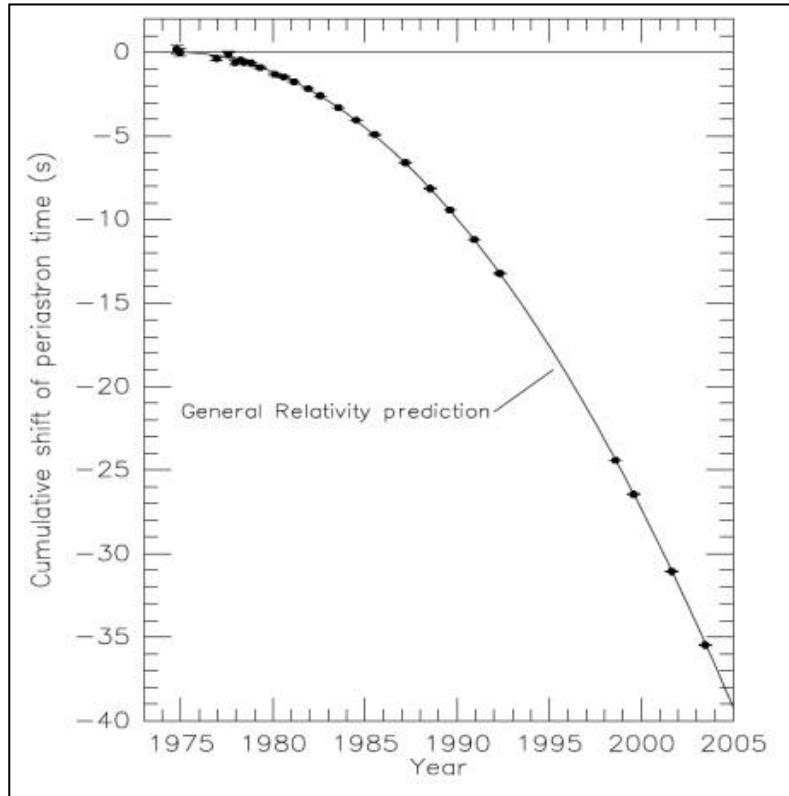
Propagation de la lumière: modèle ondulatoire (électromagnétisme)

Analogies ondes électromagnétiques / ondes gravitationnelles (2)



Propagation de la lumière: modèle corpusculaire (photon) -ou quantique-

Pulsar binaire de Hulse & Taylor (prix Nobel 1993): la preuve indirecte des GW



Observation de la décroissance orbitale du pulsar, liée à une perte d'énergie potentielle par rayonnement gravitationnel.

-> Confirmation des prédictions de la relativité générale

Intérêt de la détection du rayonnement gravitationnel

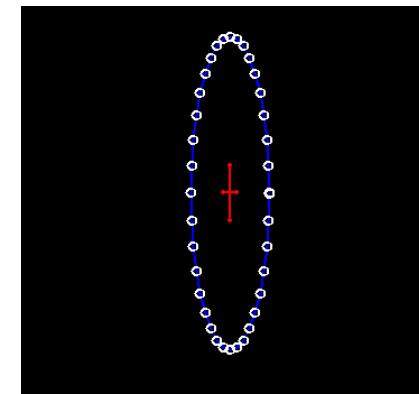
- Preuve directe de la théorie de la relativité générale d'Einstein/ propriétés du rayonnement gravitationnel.
 - Comprendre les processus de formation des galaxies, la géométrie de l'espace-temps et de l'univers dans lequel nous vivons. Conjecturer son évolution
 - Oui, mais pour quoi?
- Savoir que notre espace est courbe est à long terme aussi important que de savoir que notre Terre est ronde!



Effets et caractérisation des GW (1)

Déformation de l'espace-temps -> très faible variation de la métrique ($\delta L < 10\text{pm}$ pour $L \sim 10^9 \text{ m}$).

Variation relative de distance: $h \sim \delta L/L < 10^{-21} \text{ m}$



Polarisation $h+$

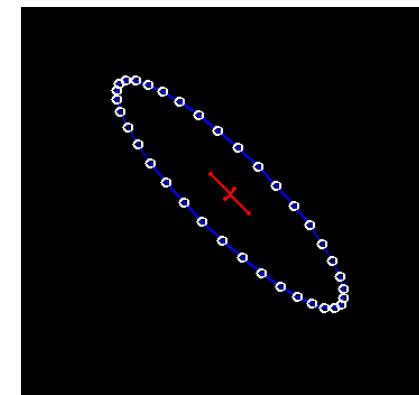
-> Très grande précision de mesure requise.

Onde transverse: contrainte perpendiculaire à la direction de propagation

$h \sim$ (masse et fréquence de rotation)

-> sources de GW = corps célestes très massifs se déplaçant à (relativement) grande vitesse

2 états de polarisation indépendants : $h+$, hx .



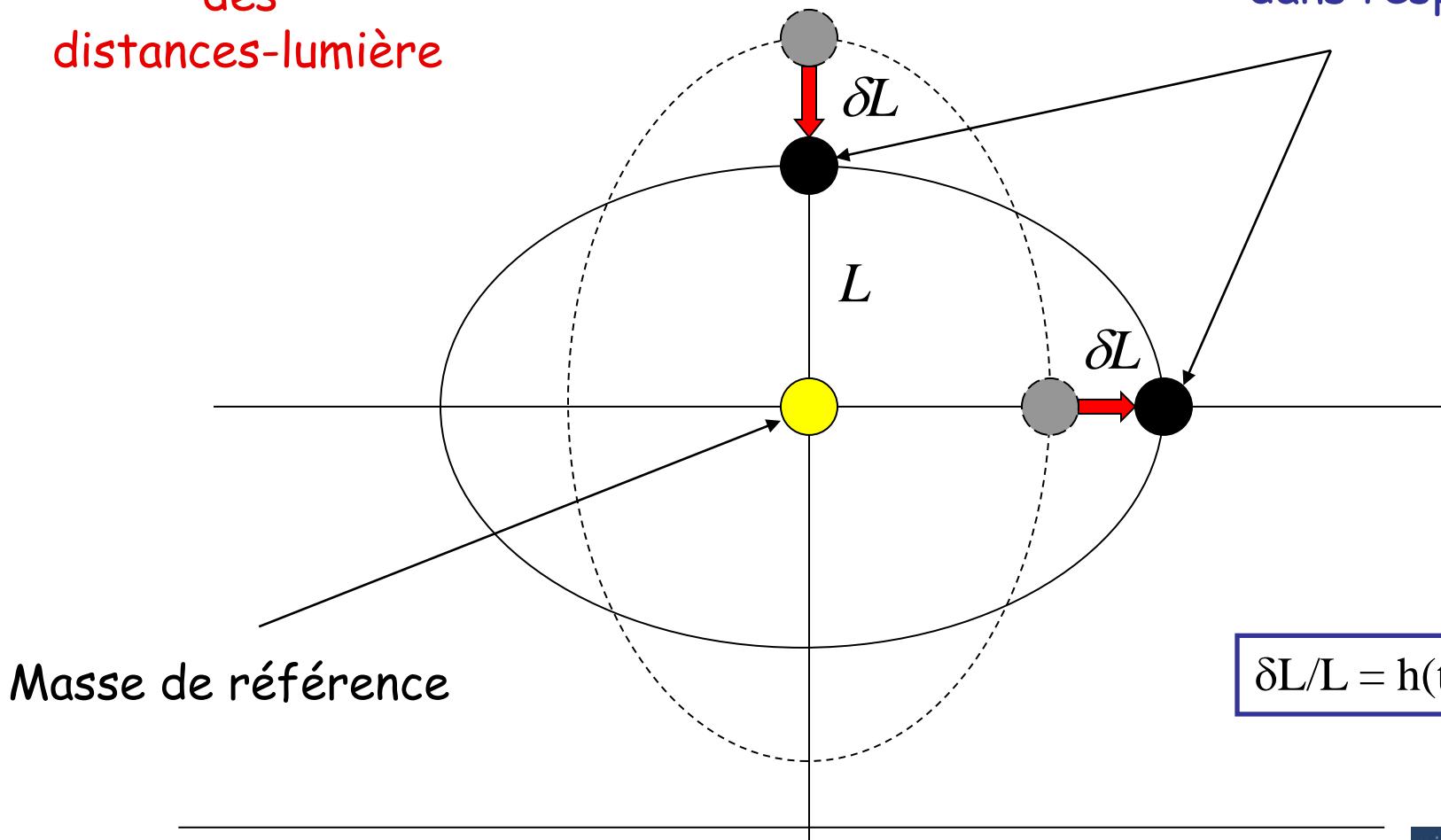
Polarisation hx

Effets et caractérisation des GW (2)

Perturbation
des
distances-lumière

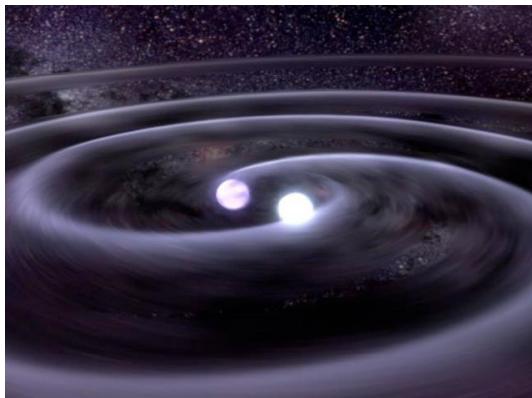
Plan transverse

Masses d'épreuve
en chute libre
dans l'espace

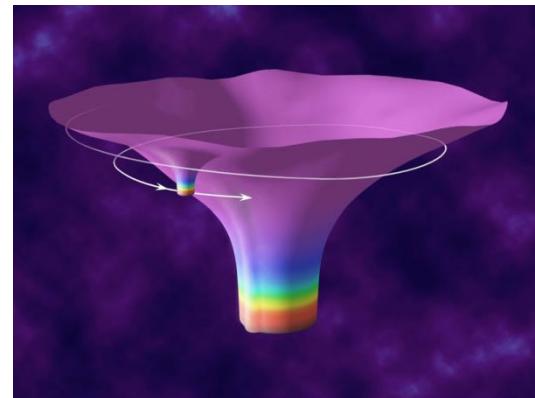


Sources astrophysiques de GW

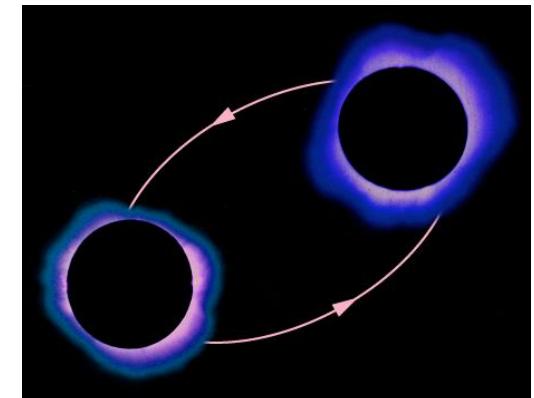
Systèmes binaires:



Etoiles à neutrons
($1 - 1.4 M_{\odot}$)

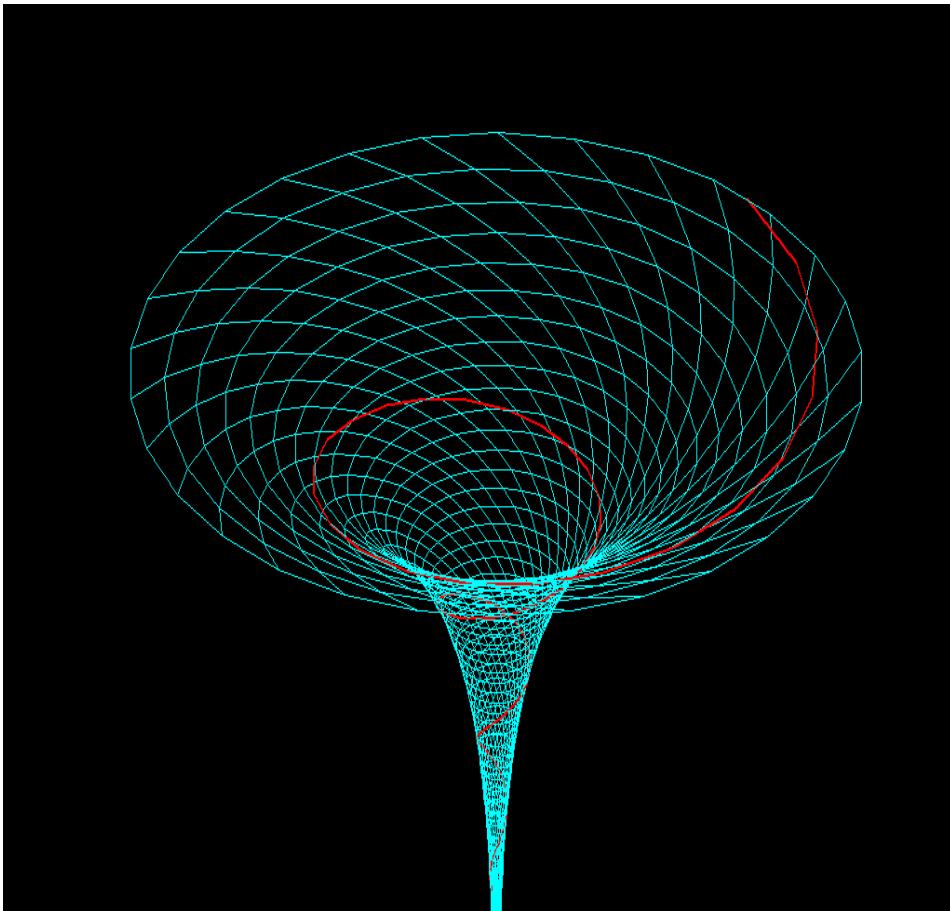


EMRI (Extrem
Mass ratio inspiral)



Trous noirs
supermassifs
($10^6 - 10^9 M_{\odot}$)

Quelques notions sur les trous noirs...

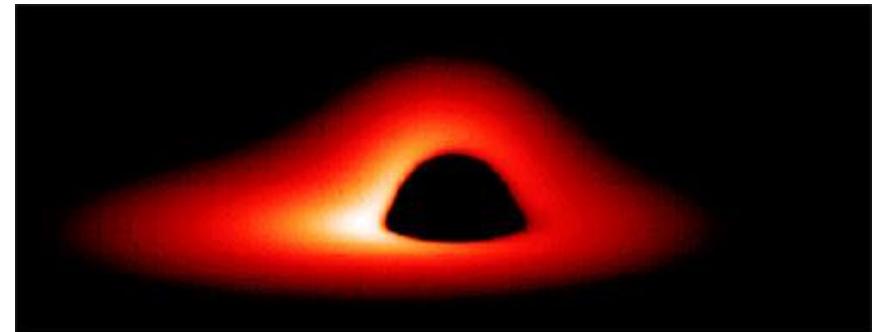
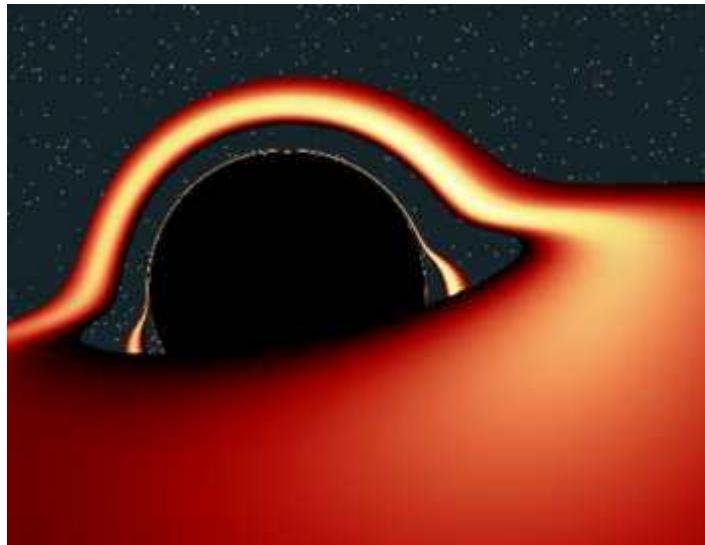


Existence d'un rayon limite (rayon de Schwarzschild) en deçà duquel rien ne peut s'échapper de l'attraction d'un corps céleste (pas même sa propre lumière)

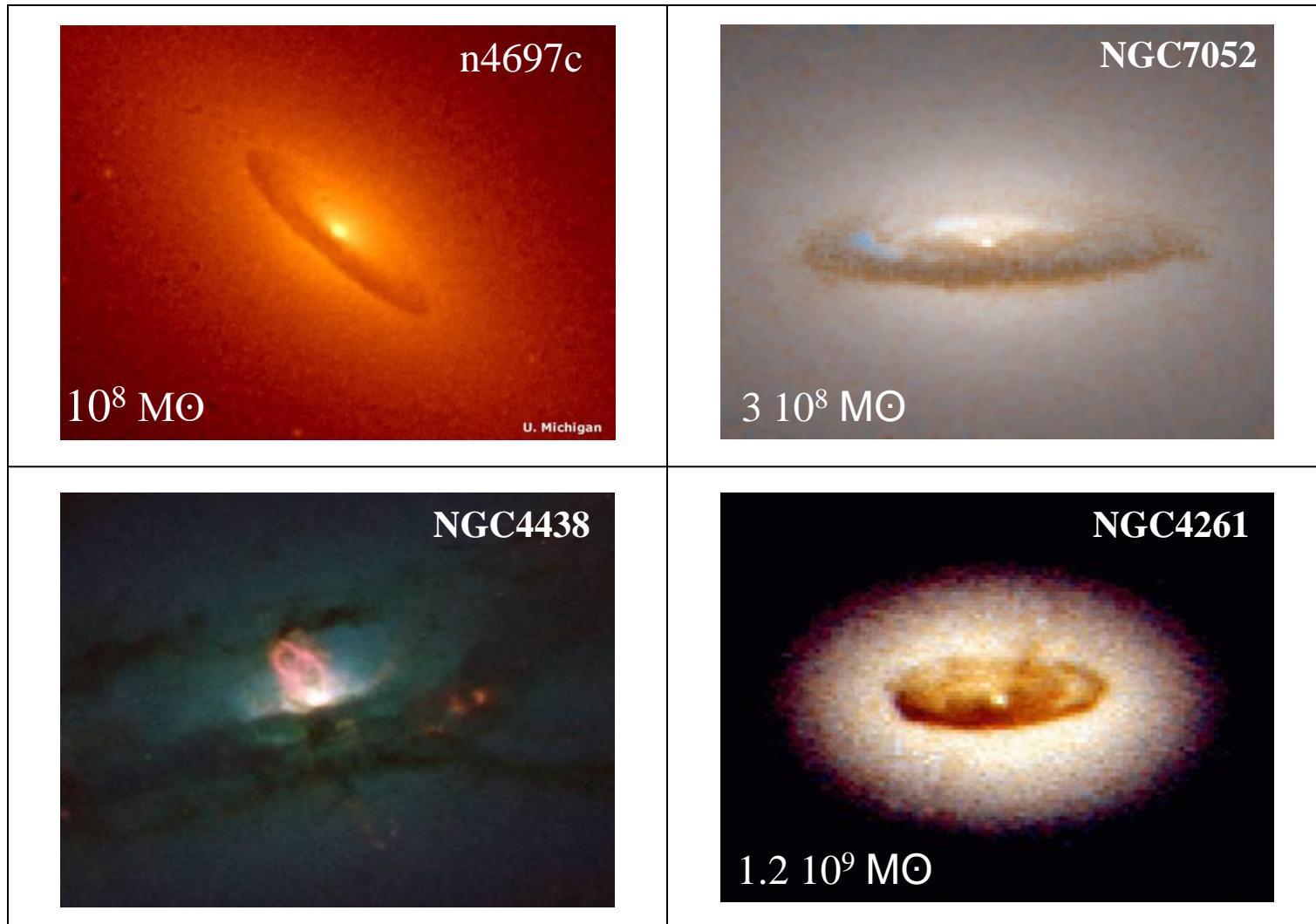
$$R_s = \frac{2MG}{c^2} \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950m$$

- > singularité dans l'espace temps
- > notion de trou noir (Pas d'émission de rayonnement)

Trous noirs: détection grâce aux disques d'accrétion

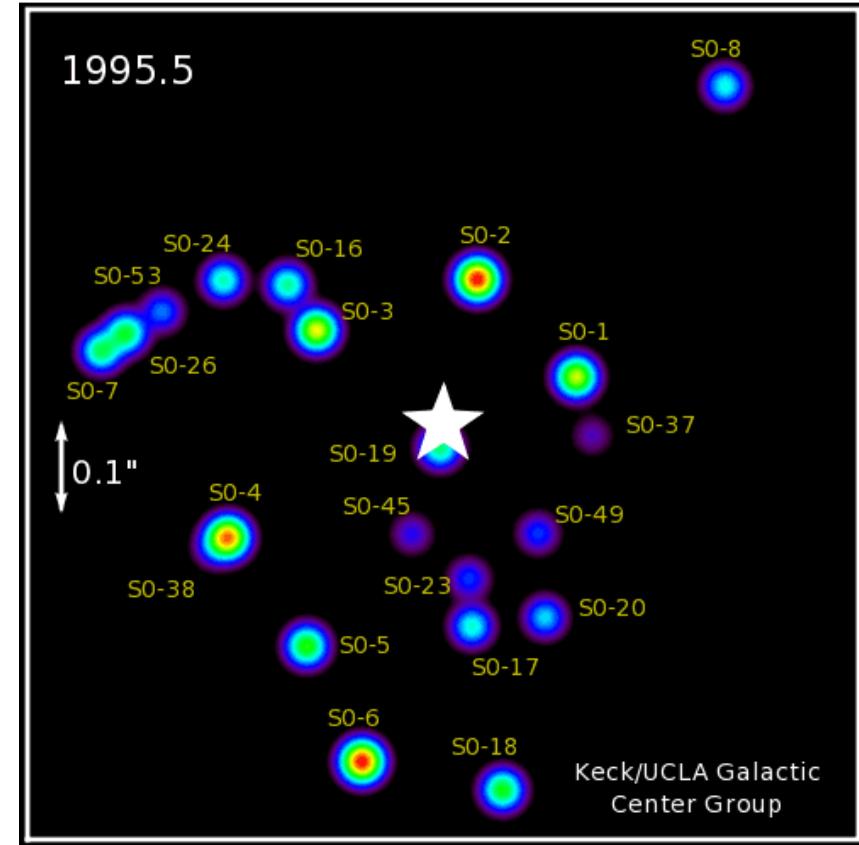
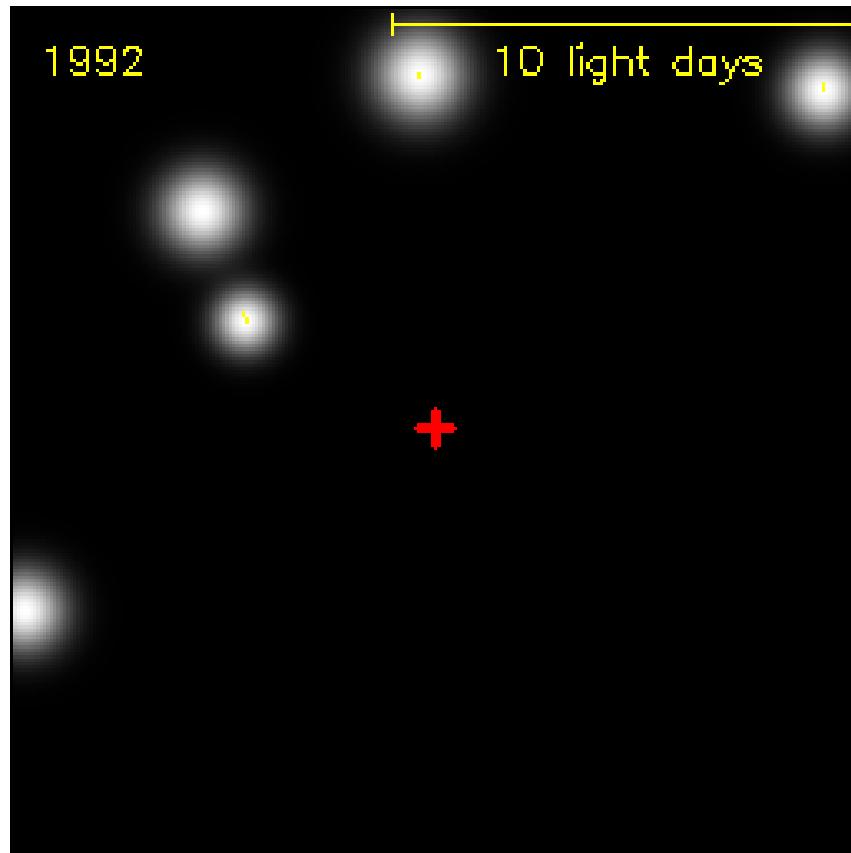


Trous noirs supermassifs (galactiques) 'suspectés'

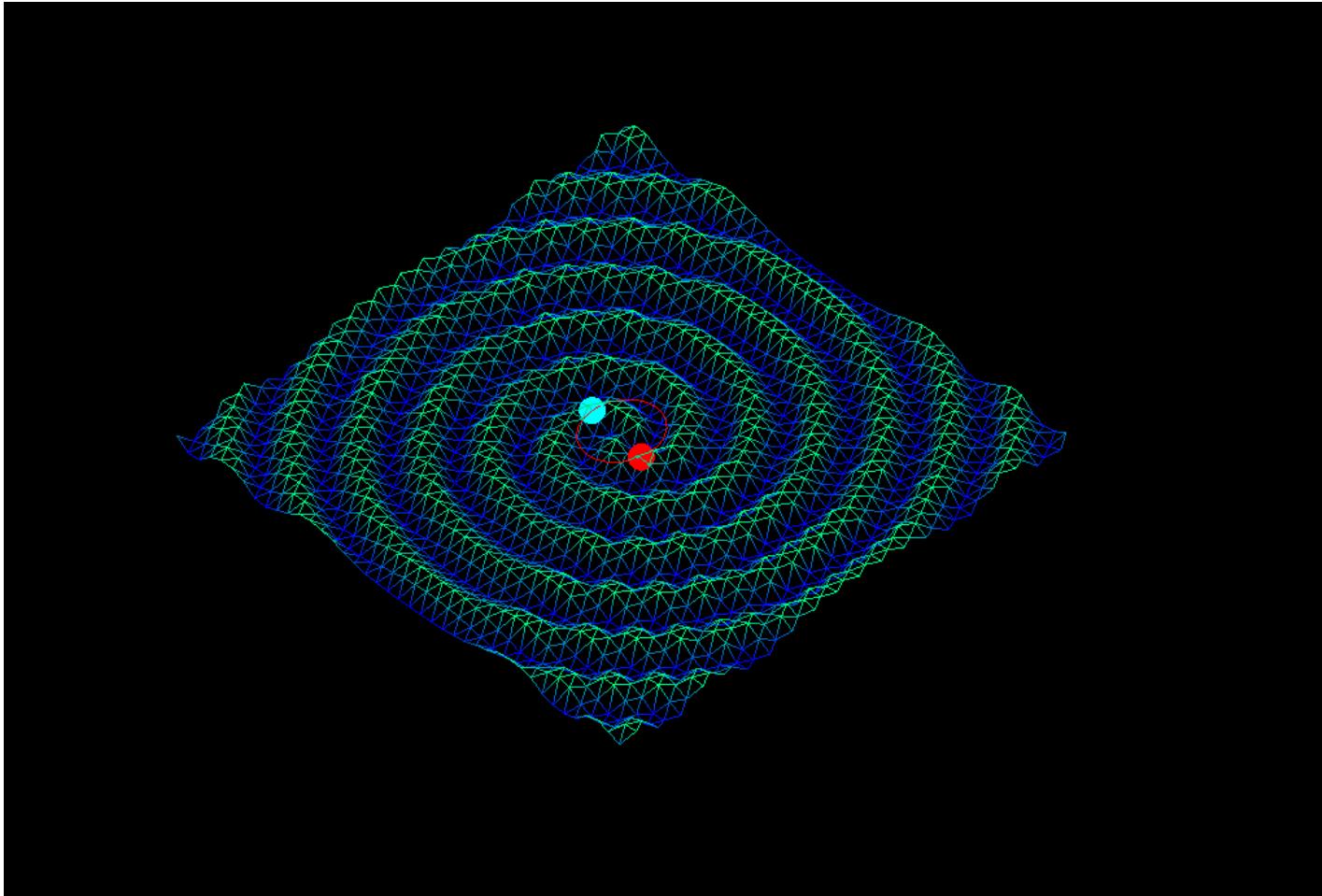


Le trou noir supermassif de notre centre galactique, **Sagittarius A** ($m = 2.7 \cdot 10^6 M_{\odot}$, $d = 8'$ lumière)

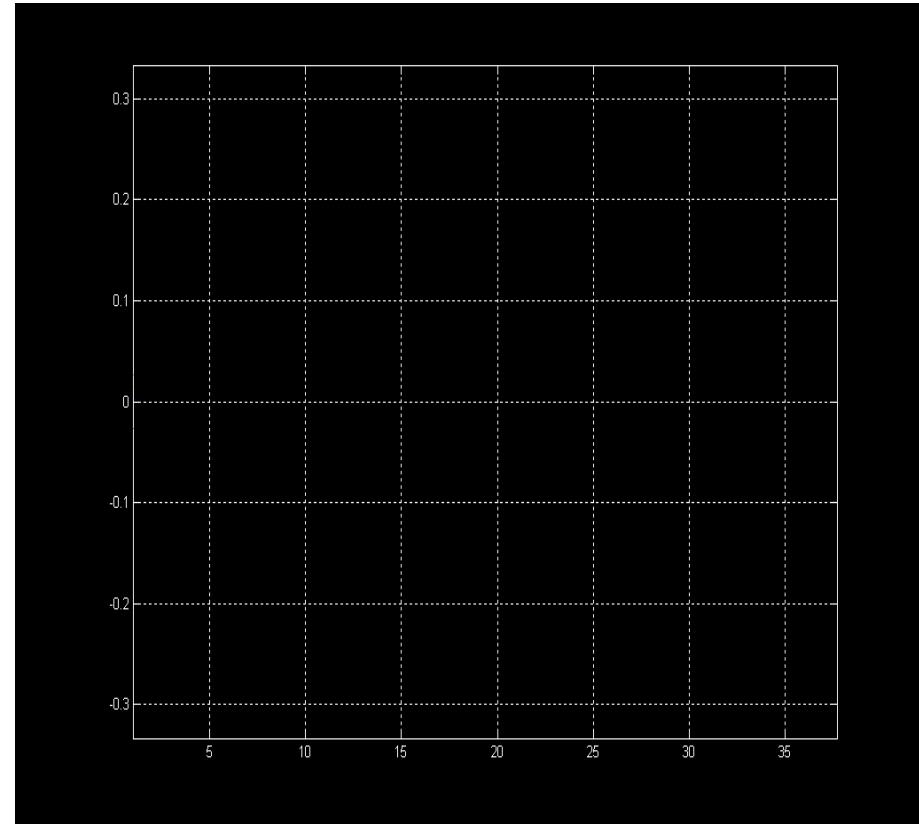
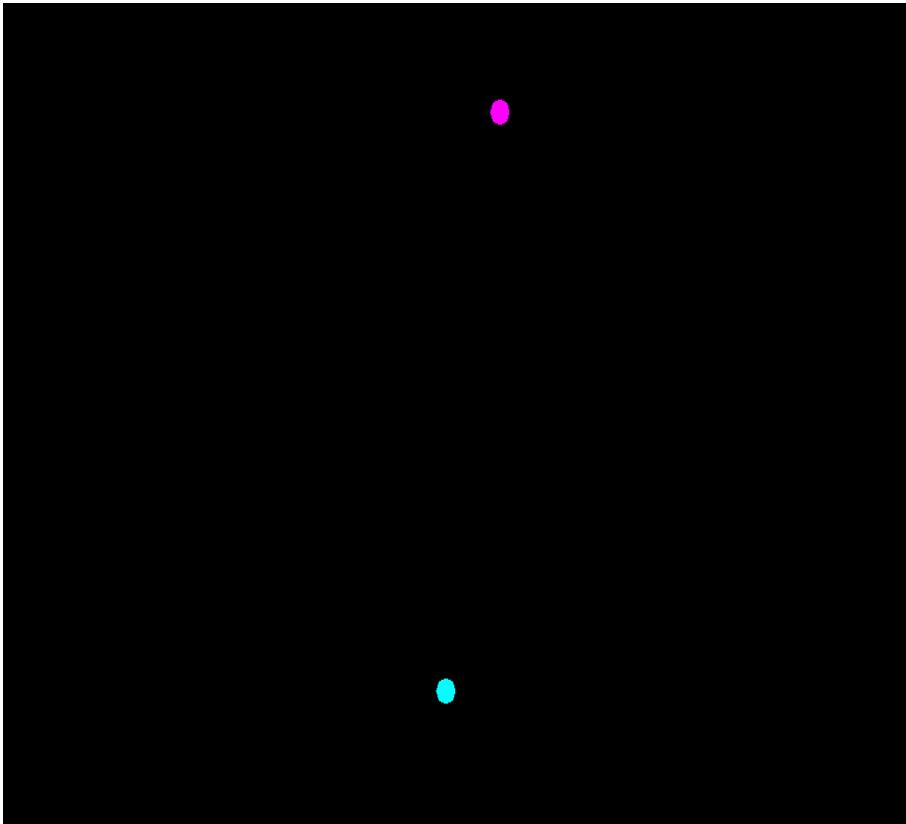
Observations indirectes et déductions:



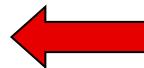
Propagation d'une GW dans le plan d'une binaire



Modélisation de la coalescence d'une binaire avec GW émission



Spirale puis coalescence



Perte d'énergie potentielle par radiation

Simulation numérique d'une coalescence de trous noirs supermassifs [credits NASA]





Simulation numérique de la coalescence d'une binaire de

Trois phases distinctes identifiables:

- **Phase spiralante** (source périodique, fréquence et amplitude quasi constantes)
- **Phase de coalescence** proprement dite (fréquence et amplitude augmentent en fonctions puissance du temps)
- **Phase de relaxation** (extinction du rayonnement gravitationnel)

Comment détecter une GW? Le principe d'interférométrie laser

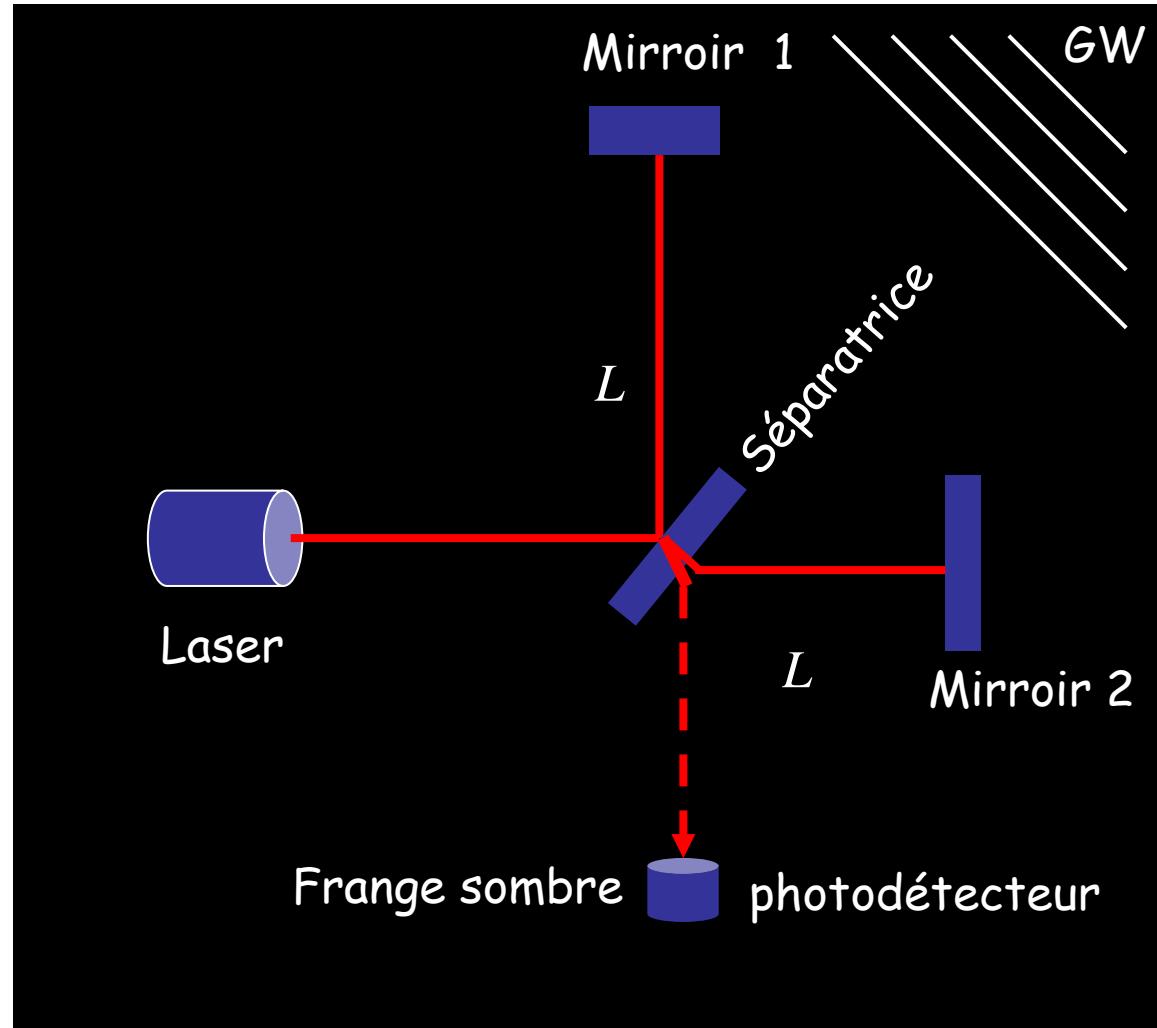
Interféromètre de **Michelson**

Un laser séparé en 2 faisceaux, 1 faisceau par bras. (longueurs identiques)

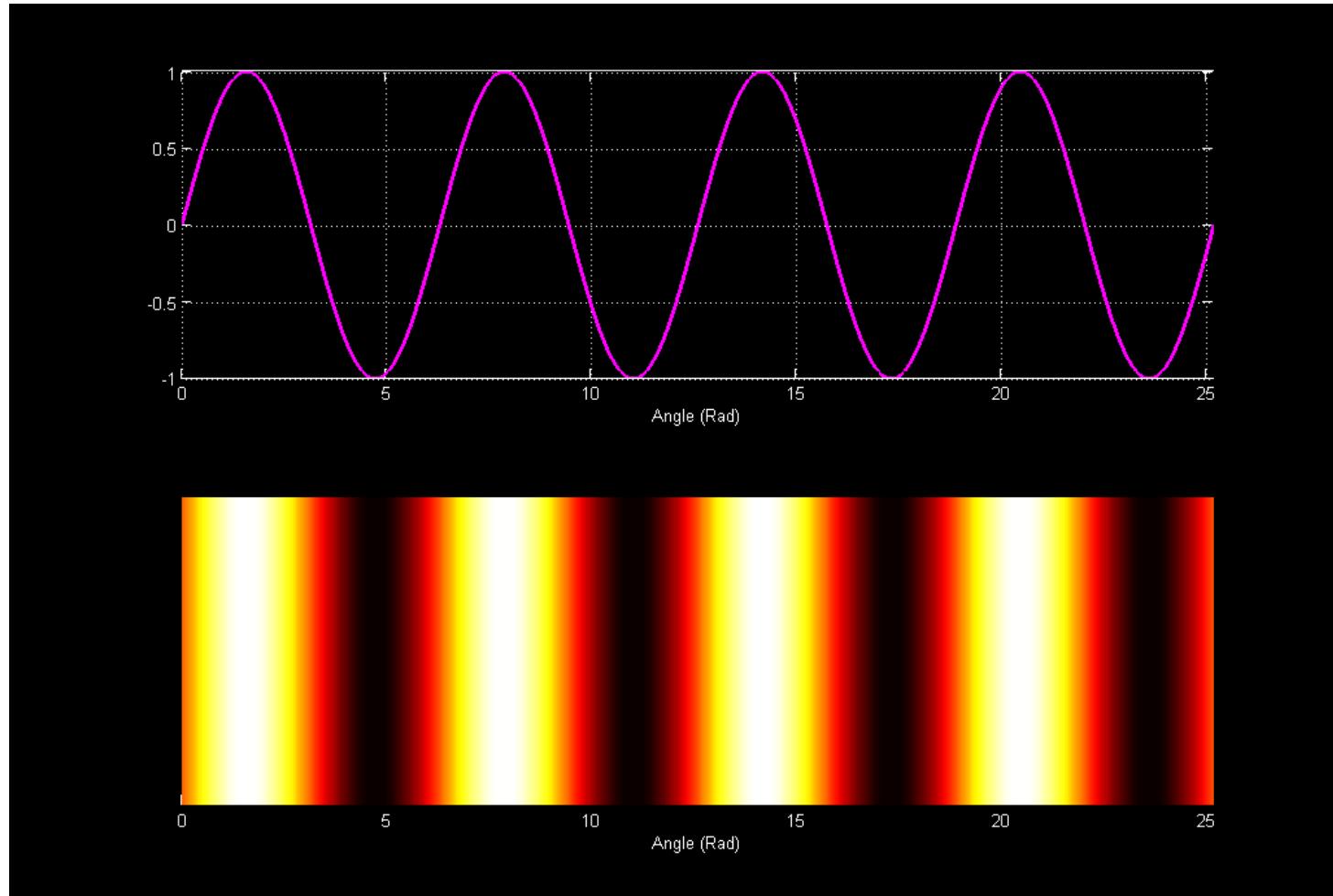
Recombinaison (interférence) des 2 faisceaux laser.

Modulation (par GW) des chemins optiques :

Interférences lumineuses -> détection.



Interférences lumineuses



Variation de phase -> variation d'intensité lumineuse

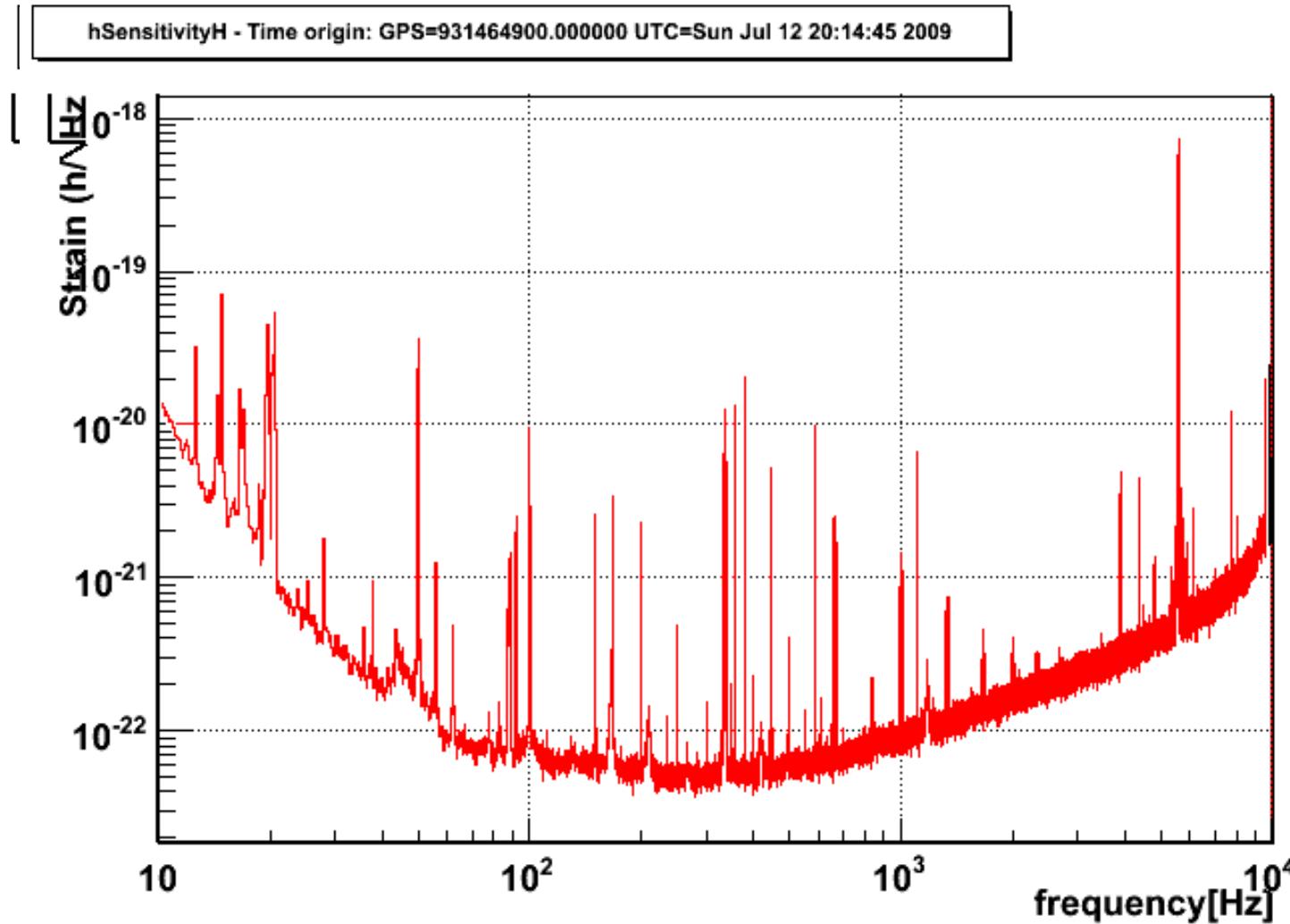
Interféromètres terrestres existants

Détecteurs **au sol**:

- **LIGO** (USA - 3km & 4km)
- **VIRGO** (Italie - 3km)
- **GEO** (Allemagne - 600m)
- **TAMA** (Japon - 300m)



Sensibilité des détecteurs interférométriques terrestres actuels (LIGO, VIRGO)



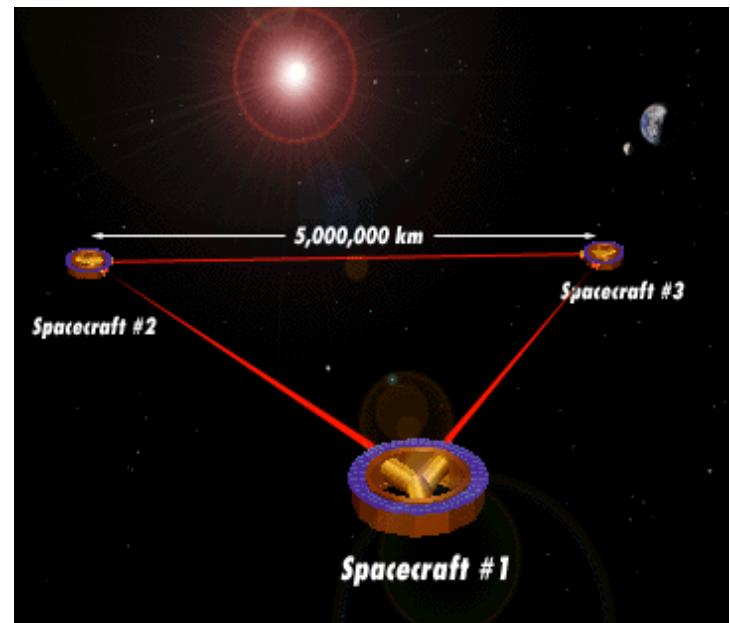
Pourquoi LISA (Laser Interferometer Space Antenna)?

Antennes interférométriques terrestres de type VIRGO ou LIGO sourdes en basse fréquence ($\nu < 10 \text{ Hz}$).

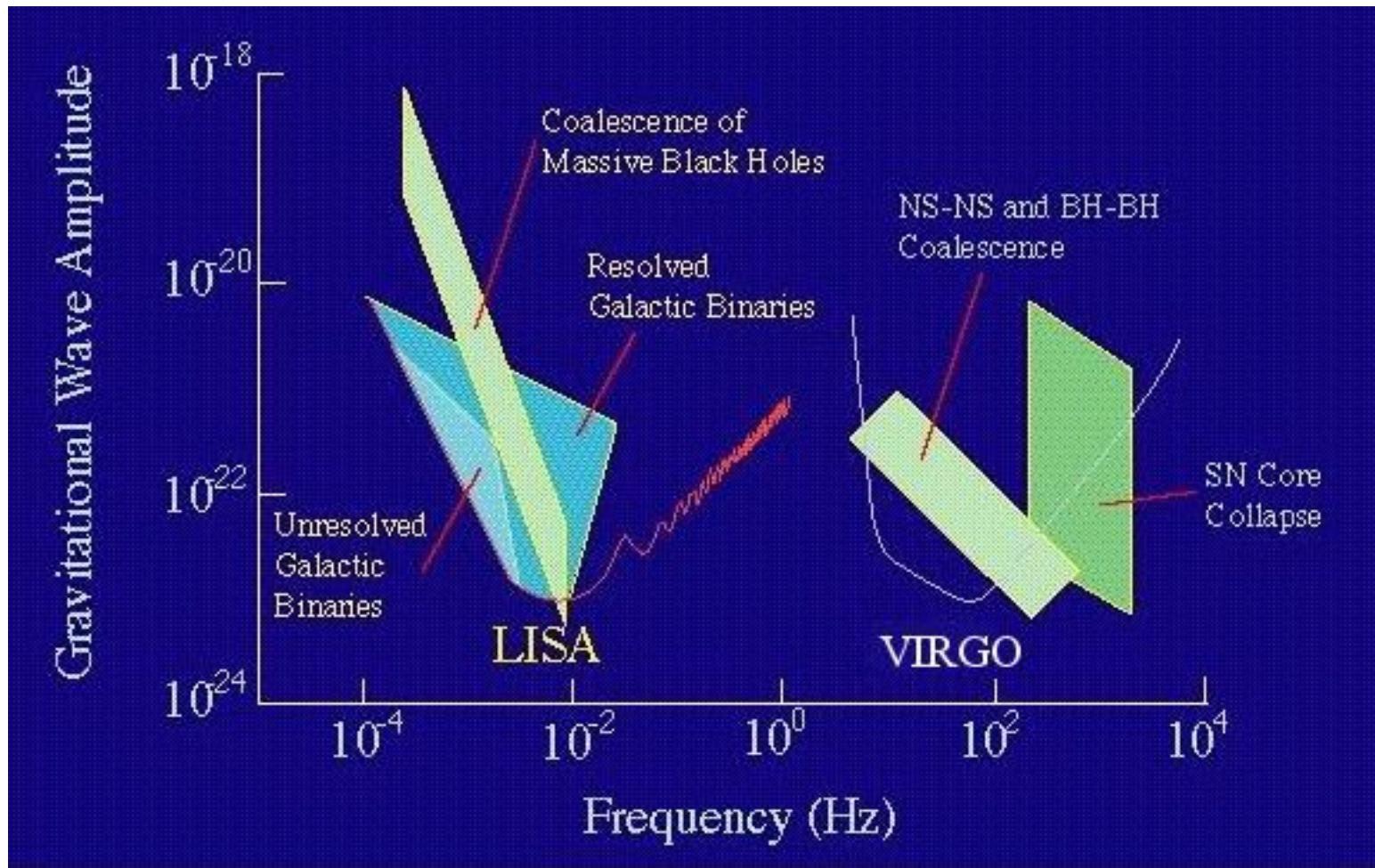
Sensibilité limitée par le «mur sismique» (vibrations BF transmises les gradients de champs newtonien)

-> Idée: une antenne interférométrique spatiale permet de s'affranchir de cette contrainte.

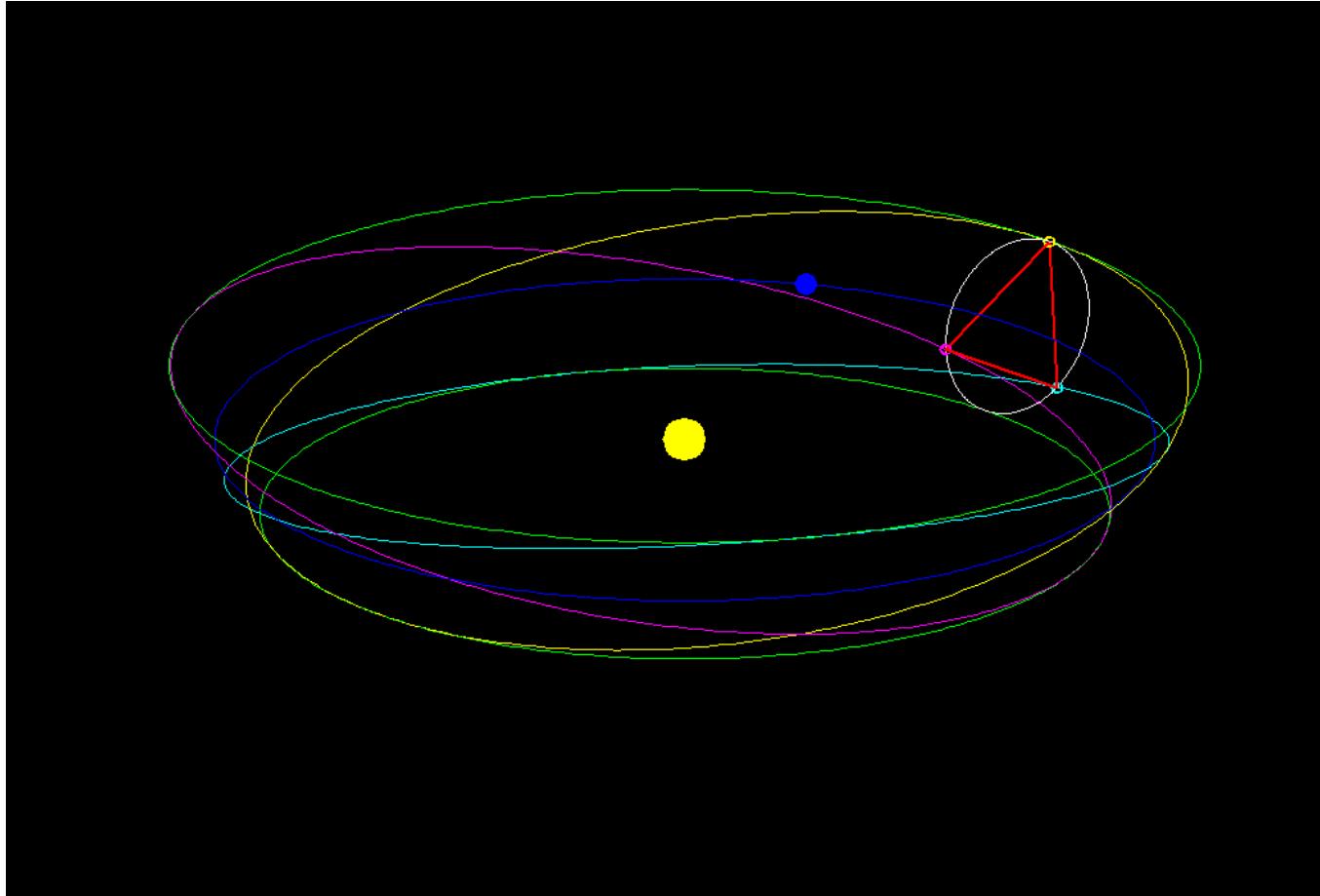
-> Possibilité de détecter des GW à très basses fréquences ($\nu < 1 \text{ Hz}$).



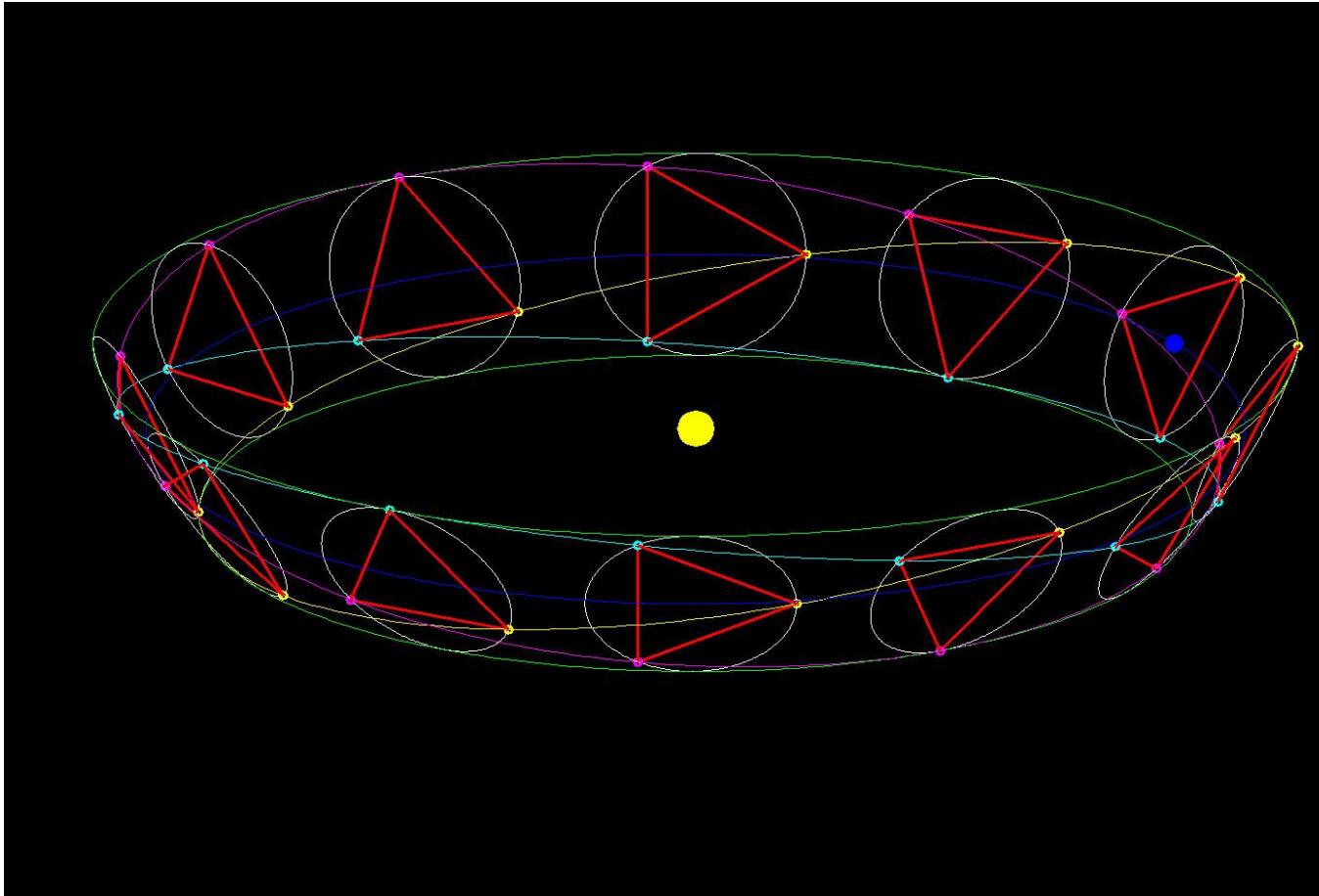
Complémentarité des sensibilités des détecteurs de GW: VIRGO / LISA



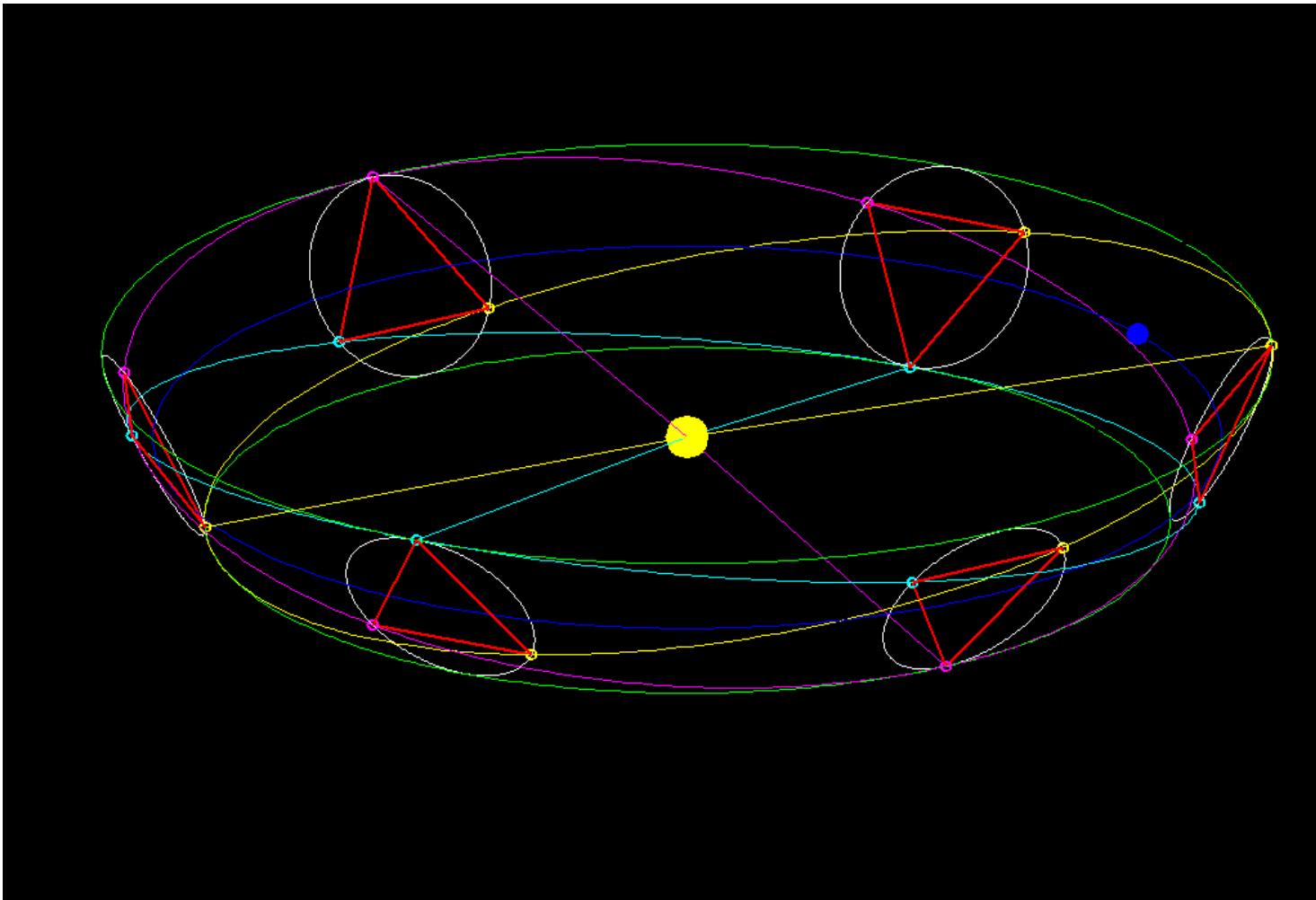
Mouvement orbitale de LISA



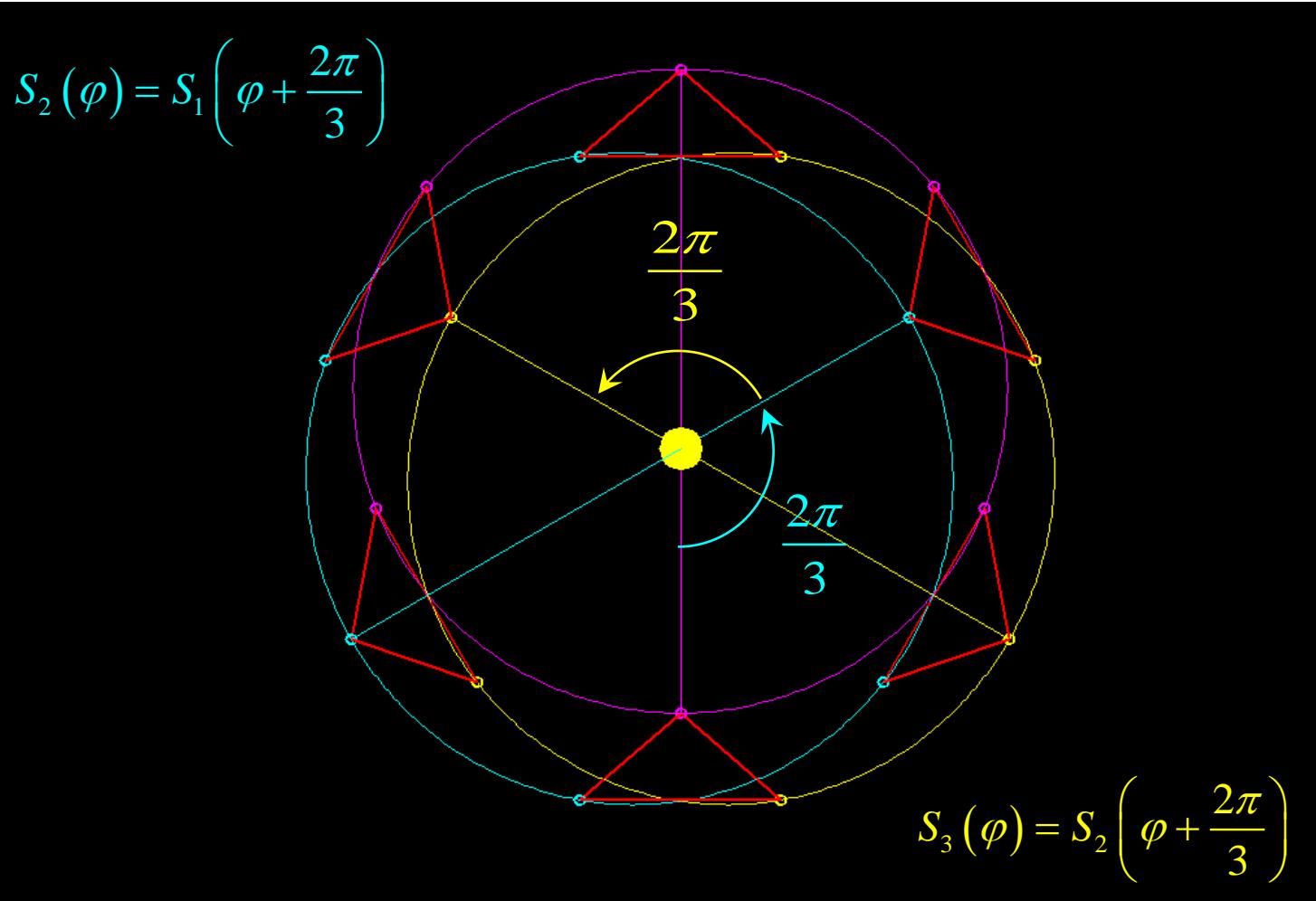
Mouvement de la constellation LISA sur une période (une année terrestre)



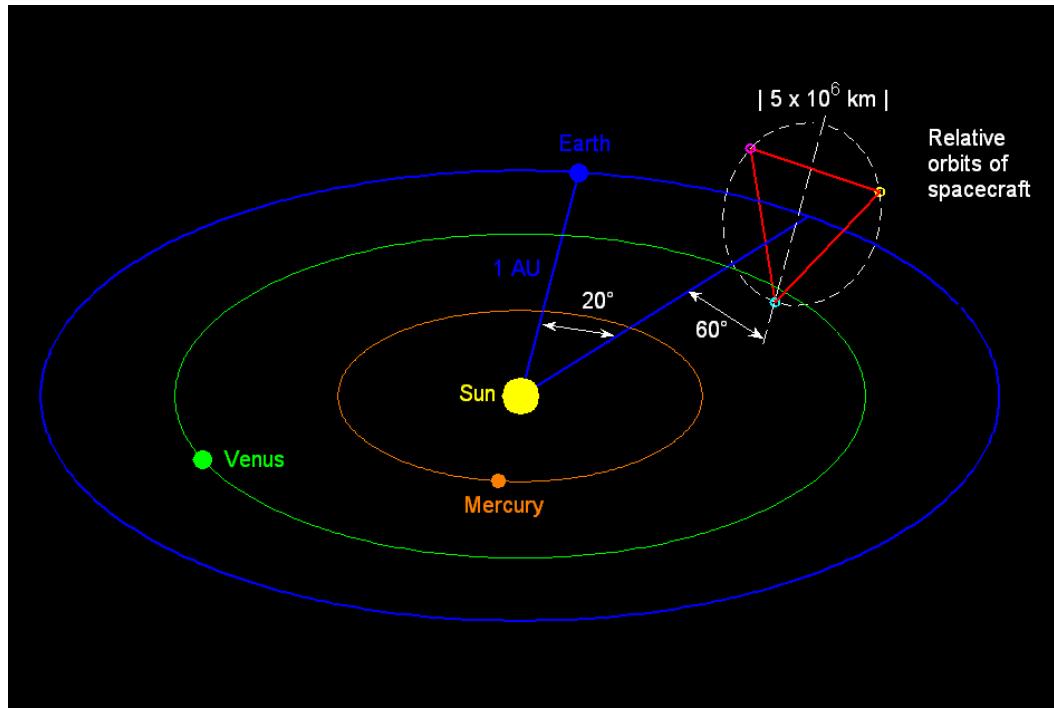
Symétries de LISA (1)



Symétries de LISA (2)



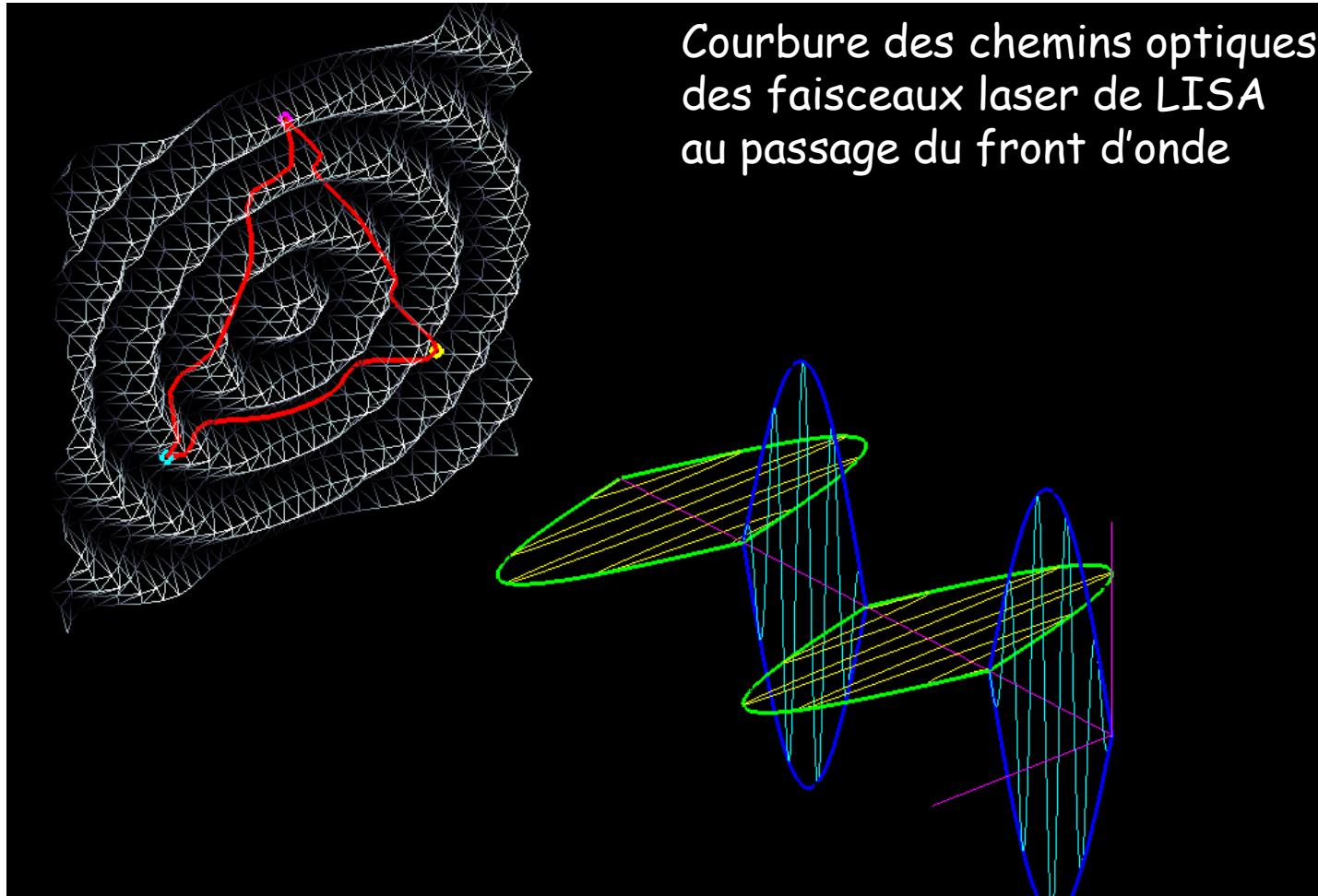
Configuration orbitale de LISA



- Orbites héliocentriques: satellites en chute libre.
- Centre de LISA suit la Terre, retardé de 20° .
- Angle de 60° entre le plan de LISA et le plan de l'écliptique.

- Longueur des bras de LISA: $5 \cdot 10^9 \text{ m}$ pour détecter des GW de fréquence $10^{-4} \leq \nu \leq 10^{-1} \text{ Hz}$
- Mouvement périodique de LISA -> information sur la direction des GW.

Modélisation amplifiée des effets d'une GW polarisée '+' sur LISA

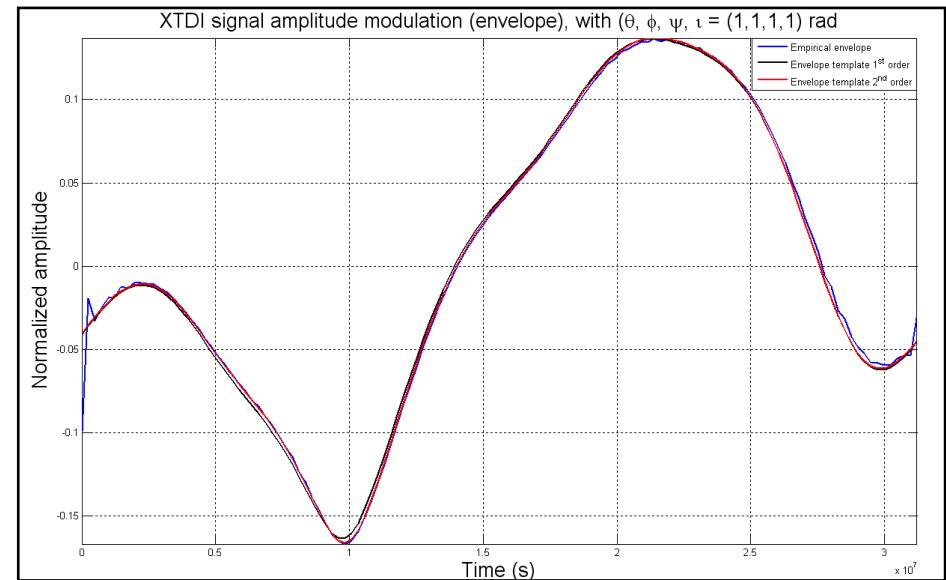


L'analyse des données de LISA

$s = s(t, \nu, \theta, \phi, \psi, \iota, h, \alpha)$: signal analytique théorique

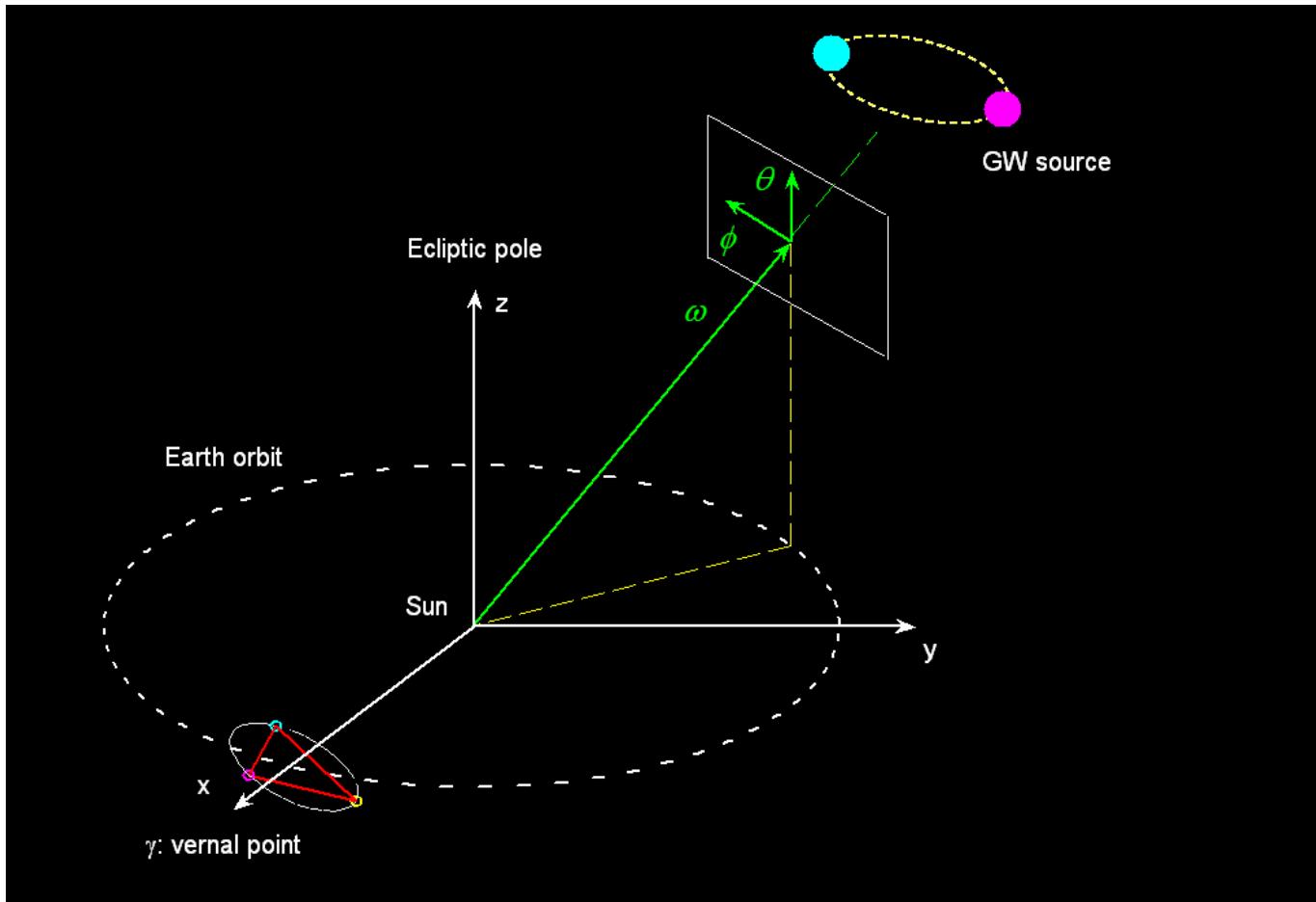
Paramètres inconnus:

- {
 - ν (Hz): fréquence de la source
 - θ (rad): latitude sur l'écliptique
 - ϕ (rad): longitude sur l'écliptique
 - ψ (rad): Angle de polarisation
 - ι (rad): angle d'inclinaison orbitale
 - h (-): amplitude de l'onde
 - α (rad): phase initiale

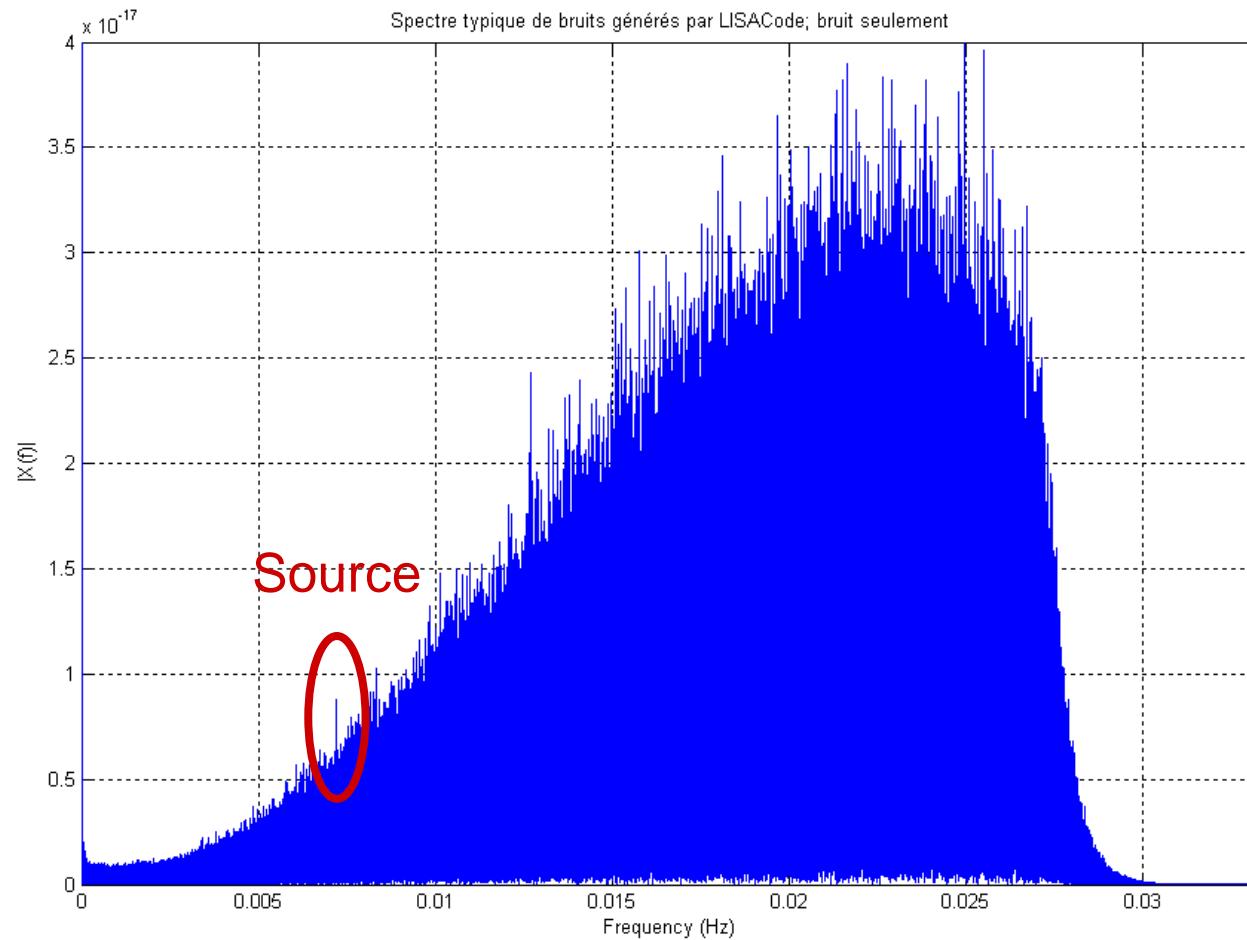


A partir des données (perturbées par le bruit), on cherche le jeu de paramètres de l'expression du signal analytique qui correspond le mieux.

Exemples de paramètres d'ondes



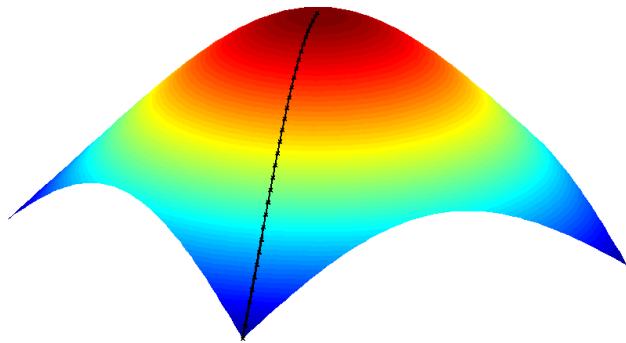
Spectre des signaux de LISA



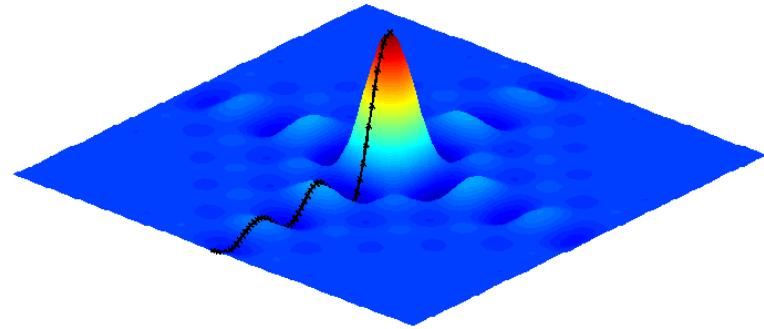
Le problème inverse de l'analyse des données de LISA:

Recherche d'un maximum de corrélation (ou du minimum de la fonction des moindres carrés) dans un espace de dimension n , entre une forme d'onde supposée et une observable (données)

Problème de topologie et de convexité de l'espace de recherche:

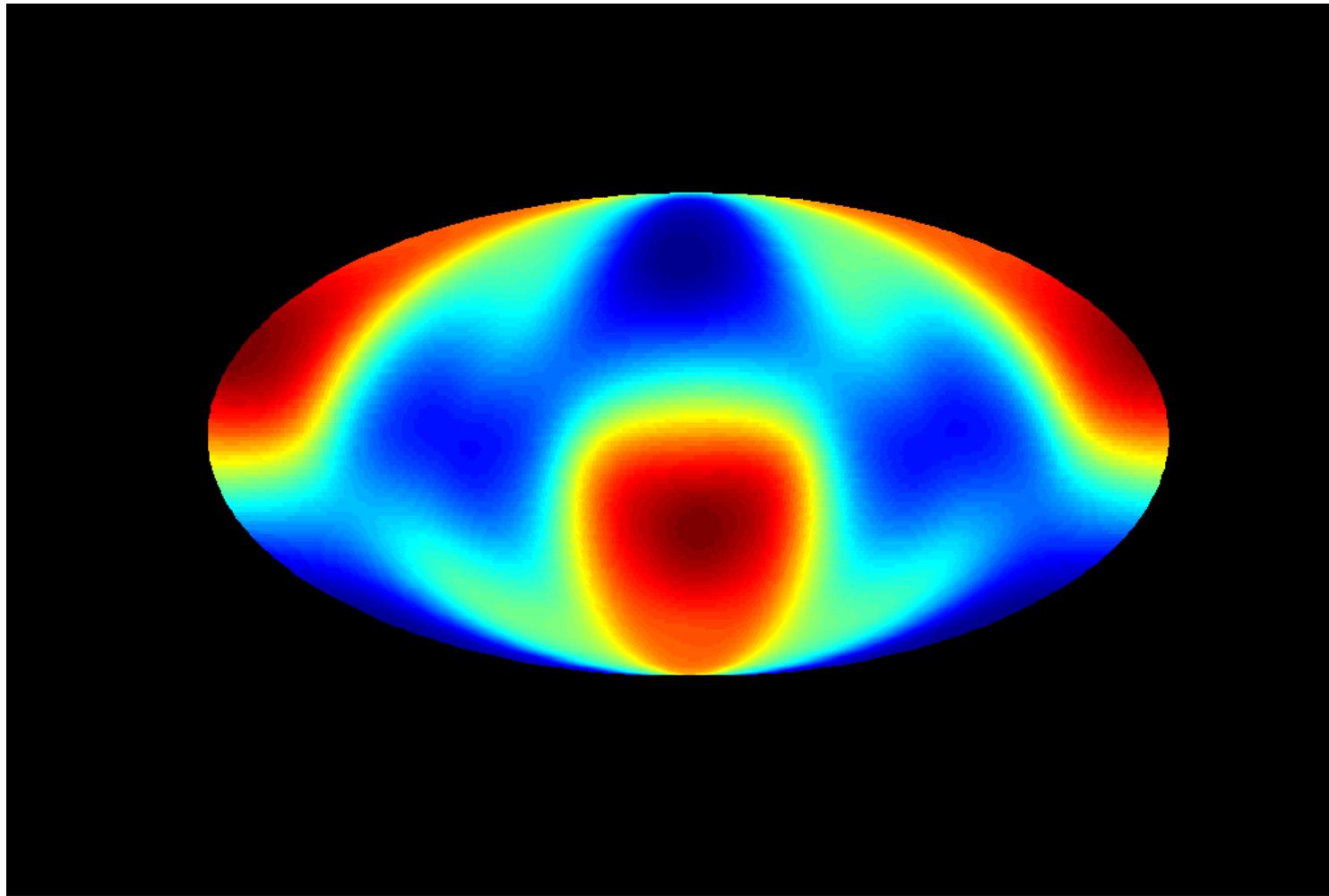


Fonction convexe

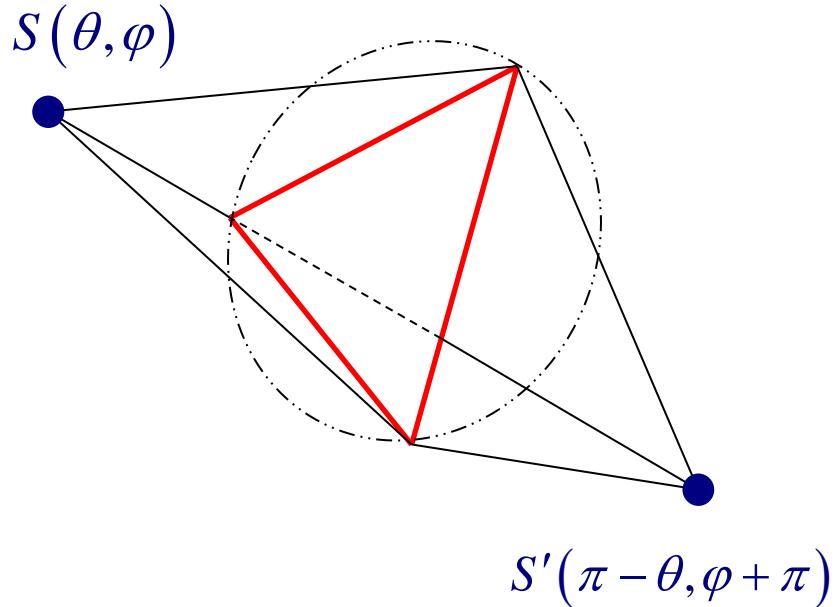


Fonction non convexe

Réponse en modulation d'amplitude de LISA au passage d'une GW, sur 1 an



Ambigüité/symétrie fondamentale



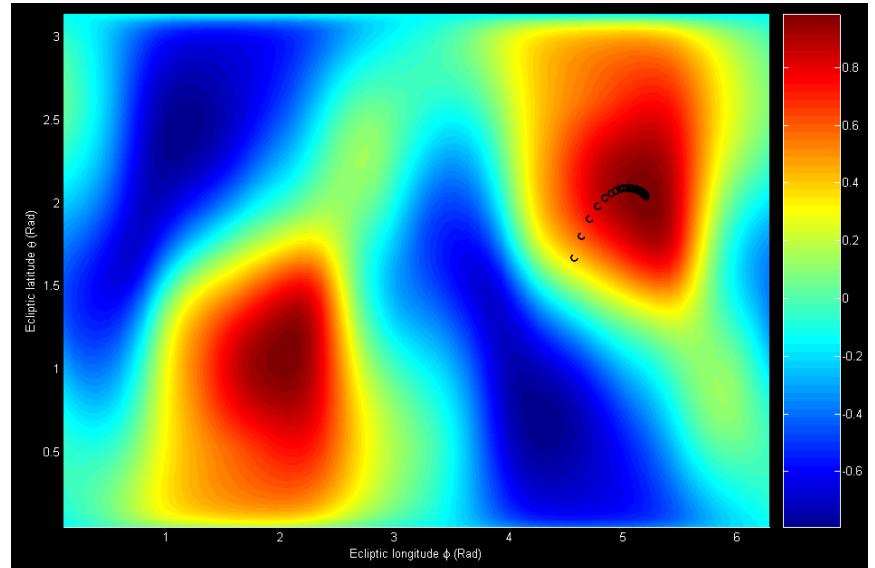
Symétrie principale de LISA

$$E(\pi - \theta, \varphi + \pi) = E(\theta, \varphi)$$

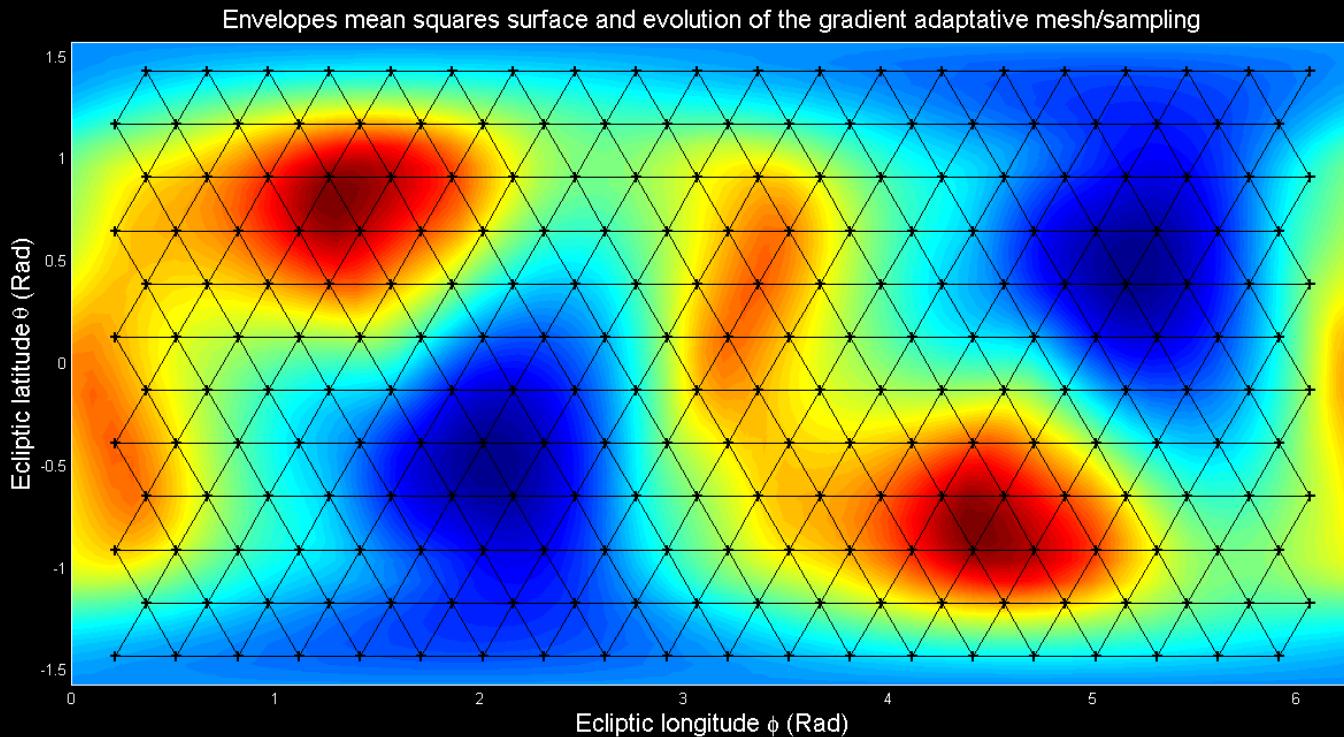


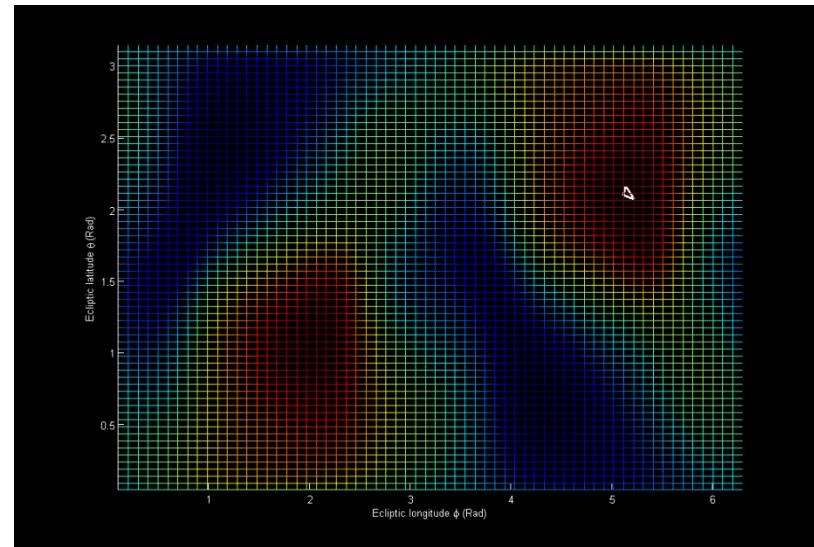
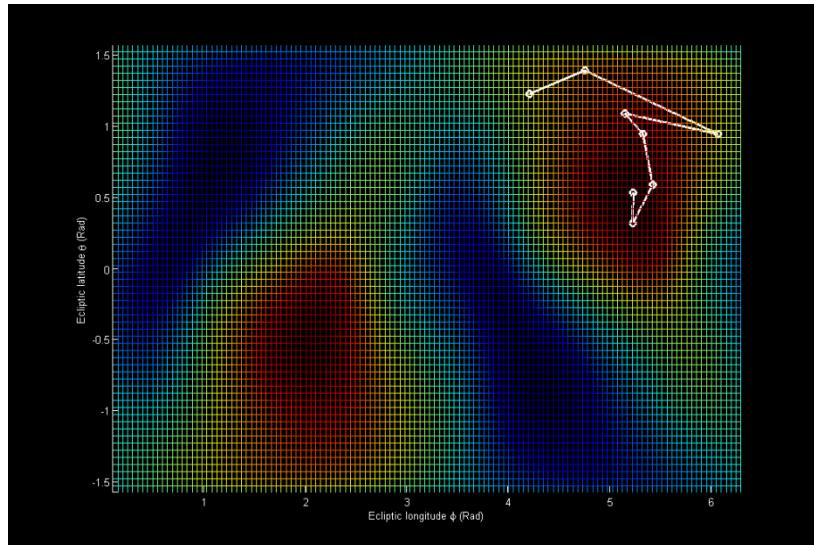
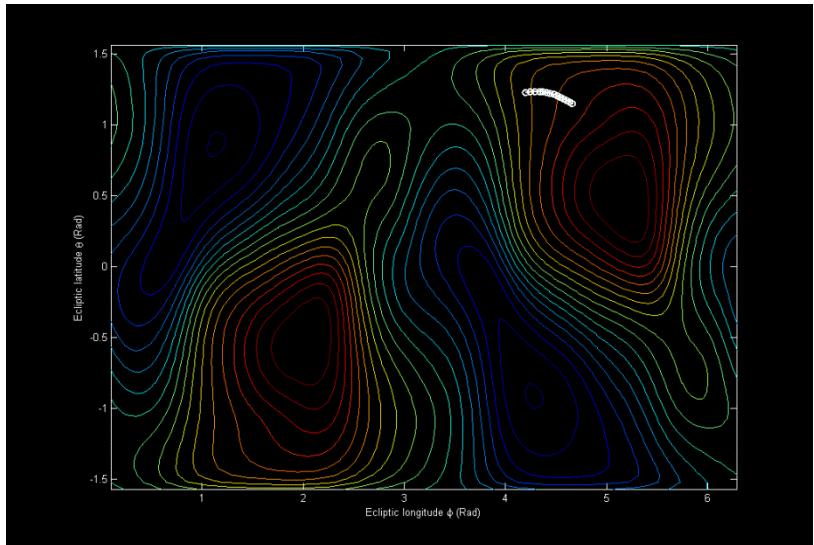
Symétrie de l'espace de corrélation

$$C(\theta, \varphi) = C(\pi - \theta, \varphi + \pi)$$



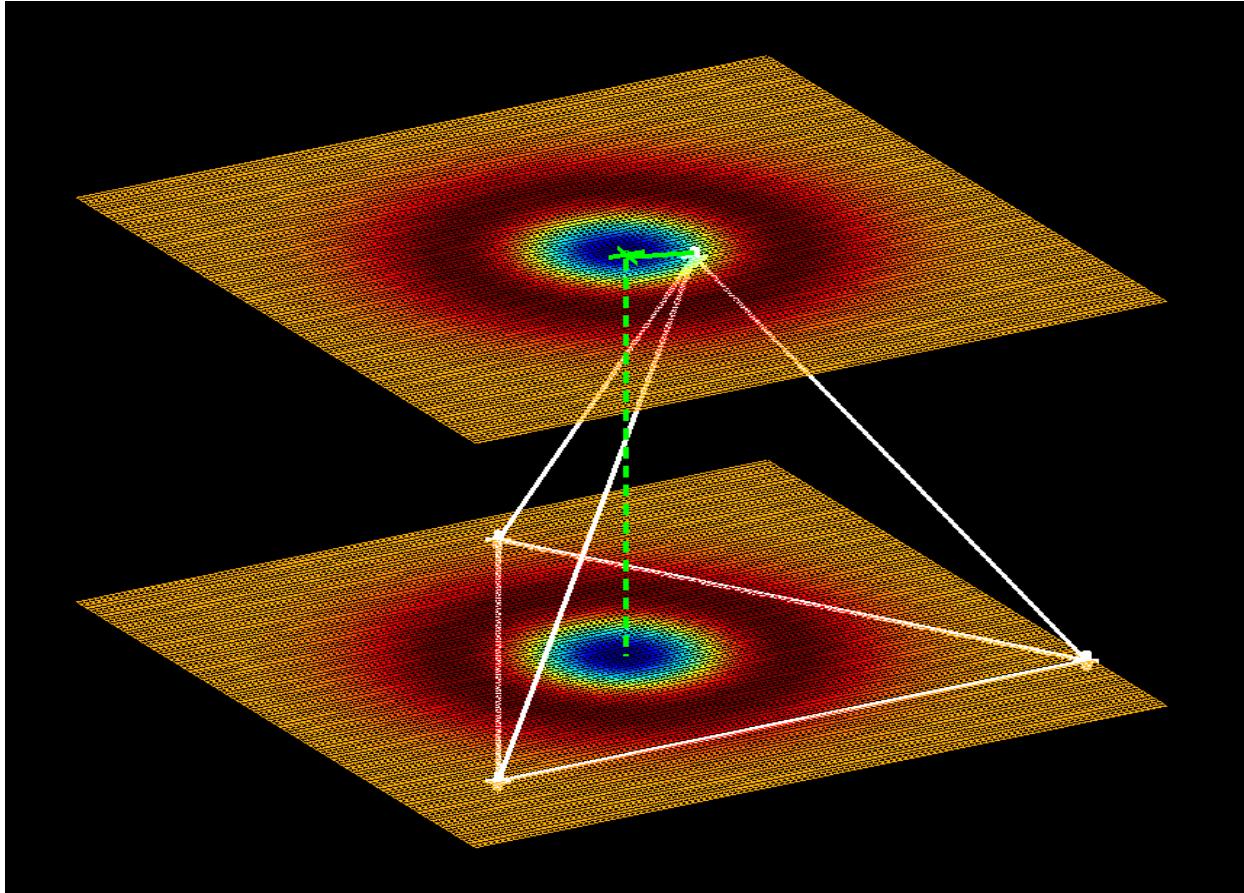
Problème inverse, étape 1: échantillonnage de l'espace des paramètres



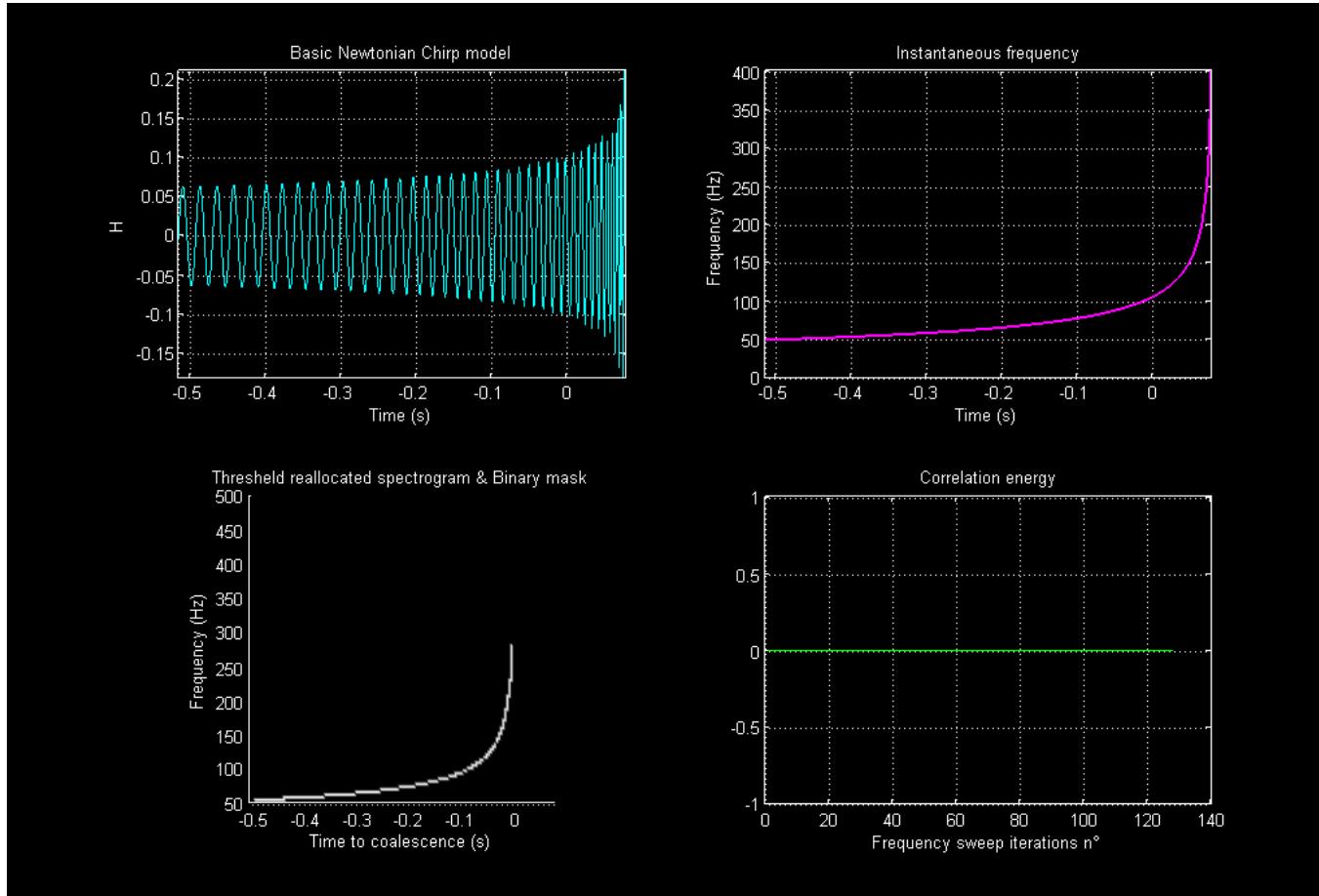


Optimisation de la recherche d'un maximum de corrélation dans le plan des coordonnées (latitude, longitude)

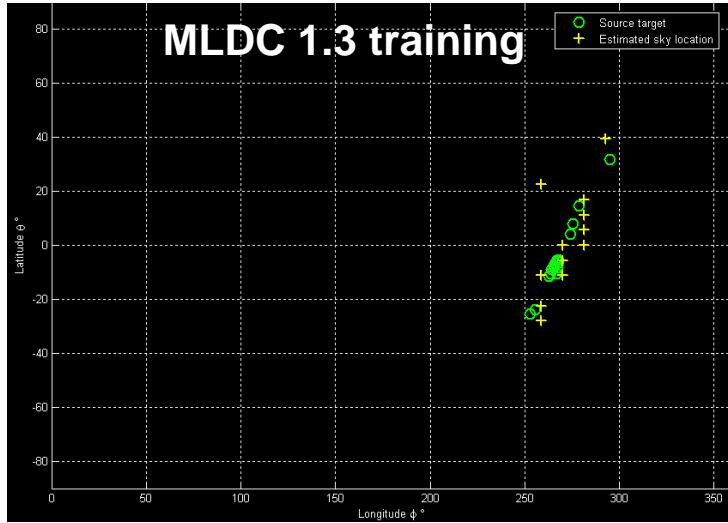
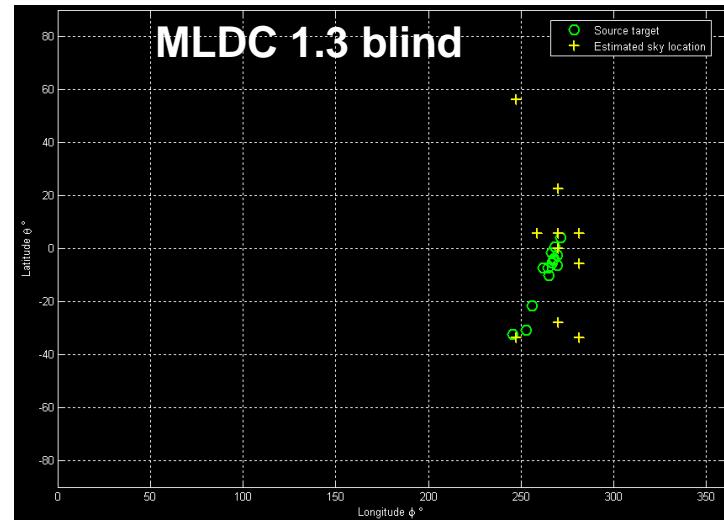
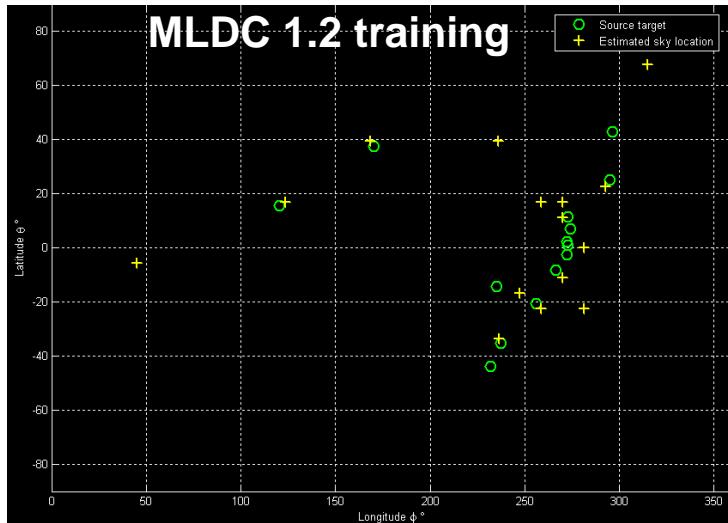
Une astuce de convergence... un « tunnel inter-dimensionnel



Analyse dans le plan temps-fréquence d'un signal gravitationnel de type chirp: modulé en amplitude et en fréquence



Localisations de sources: (latitude; longitude)

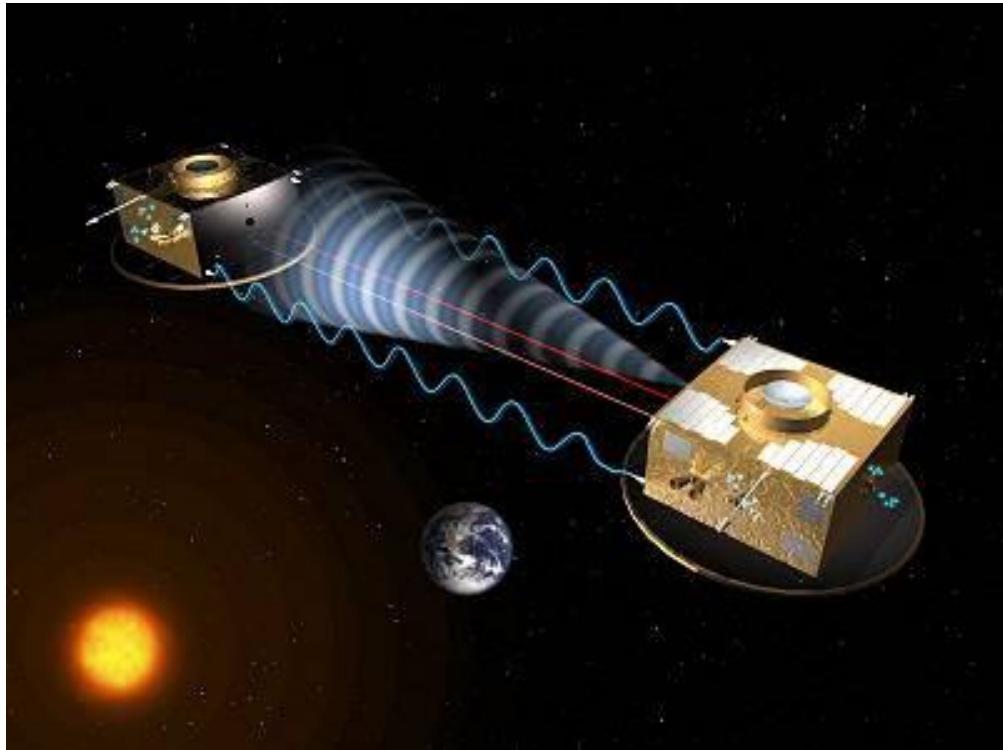


Précision angulaire moyenne

$$\mu(\Delta\theta) \sim 7.3^\circ$$

$$\mu(\Delta\phi) \sim 5.8^\circ$$

LISA pathfinder: le démonstrateur technologique



Tests de fonctionnement:

- Compensation de traînée
 - Accéléromètres capacitifs
 - Microtuyères
- Banc optique

Kourou 2013
Lanceur VEGA

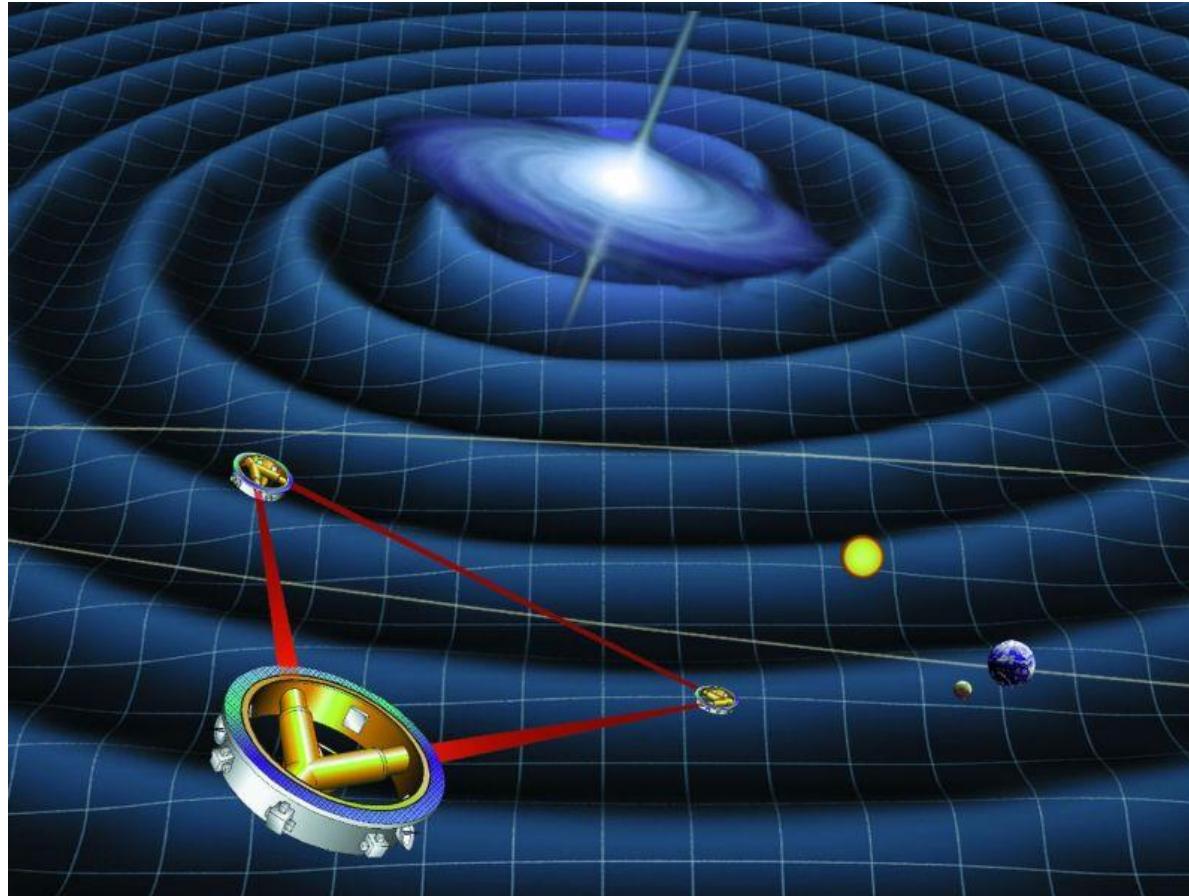


Point de Lagrange L1
(1.5 Mkm)

Résumé & conclusion

- LISA = interféromètre géant dans l'espace pour la détection des ondes gravitationnelles basses fréquences.
- Projet astrophysique majeur et à fort potentiel.
-> nouveau moyen d'observation astrophysique de notre univers.
LISA fait partie des 3 projets majeurs « Cosmic Vision » de l'ESA, avec la détection de matière noire et d'énergie noire.
- Proche lancement de LISA pathfinder pour tests de fonctionnement.
- Intersection/interactions de plusieurs domaines: astrophysique, industrie spatiale, optique (lasers), électronique, traitement de signal, analyse de données [...]

That's all folks!



Merci de votre attention !