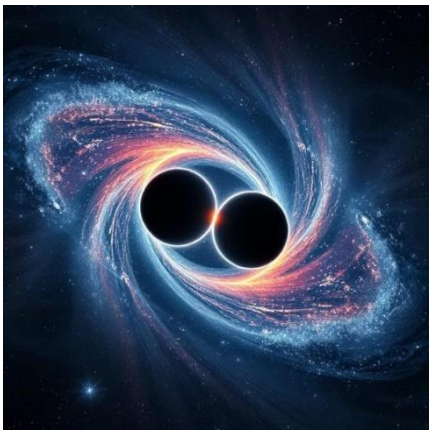
# Newsletter n° 7 du Club Copernic
# Avril 2026

# Les Ondes Gravitationnelles

*De la prédiction d'Einstein à la détection historique*



Visualisation numérique montrant deux trous noirs en orbite spirale, entourés de courbes bleues ondulantes représentant les perturbations de l'espace-temps


**En résumé**

Des perturbations de l'espace-temps lui-même, se propageant à la vitesse de la lumière, générées par les objets les plus violents de l'Univers — et désormais captées par des instruments dédiés.


## 1. Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

### 1.1 L'espace-temps selon Einstein

En 1915, Albert Einstein bouleverse la physique avec la Relativité Générale : la gravitation n'est plus une force mystérieuse agissant à distance, mais la manifestation de la courbure de l'espace-

temps. Un objet massif déforme le tissu de l'espace-temps autour de lui, et les autres objets suivent les chemins les plus « droits » de cet espace courbe.

**Analogie**

Imaginez un drap tendu horizontalement. Une boule lourde posée dessus crée un creux : c'est la courbure. Une bille roulant près du creux suit une trajectoire courbe. Dans la réalité, remplacez le drap par l'espace-temps à 4 dimensions, et la boule par une étoile ou un trou noir.(jp Luminet)

### 1.2 La prédiction de 1916

Dès 1916, Einstein prédit que des masses en accélération non sphérique doivent rayonner des ondes gravitationnelles : des ondulations de l'espace-temps se propageant à la vitesse c. Il doute cependant lui-même qu'elles soient jamais détectables, tant leur effet est infime.

- Nature : perturbation transverse de l'espace-temps (comme une onde lumineuse, mais pour la géométrie elle-même)
- Vitesse de propagation : $c \approx 3 \times 10^8$ m/s — confirmé par GW170817
- Polarisation : 2 modes, appelés h+ (plus) et h× (croix)
- Effet : étirement et compression alternés des distances perpendiculaires à la propagation

### 1.3 L'amplitude h : une déformation infime

L'amplitude d'une onde gravitationnelle est caractérisée par la déformation relative **$h = \Delta L / L$**. Pour GW150914, le premier signal détecté, $h \approx 10^{-21}$. Cela signifie que pour un bras de 4 km, le déplacement mesuré est de :

L =distance initiale entre 2 points

ΔL=variation de cette distance qd l'onde passe

$$\Delta L = 10^{-21} \times 4\,000 \text{ m} = 4 \times 10^{-18} \text{ m}$$

**Pour mettre en contexte**

$4 \times 10^{-18}$ m, c'est environ 4 millièmes de la taille d'un proton. Les interféromètres LIGO/Virgo mesurent ce déplacement en exploitant la cohérence de la lumière laser sur plusieurs kilomètres — un exploit métrologique sans précédent dans l'histoire de la physique.

**La plupart des théories de gravité quantique postulent l'existence d'un quantum correspondant appelé le graviton de façon analogue à l'électrodynamique quantique dans laquelle le vecteur de la force électromagnétique n'est autre que le photon. L'onde gravitationnelle est considérée comme l'onde associée au graviton, et ses caractéristiques donnent alors de précieuses informations sur la particule .**

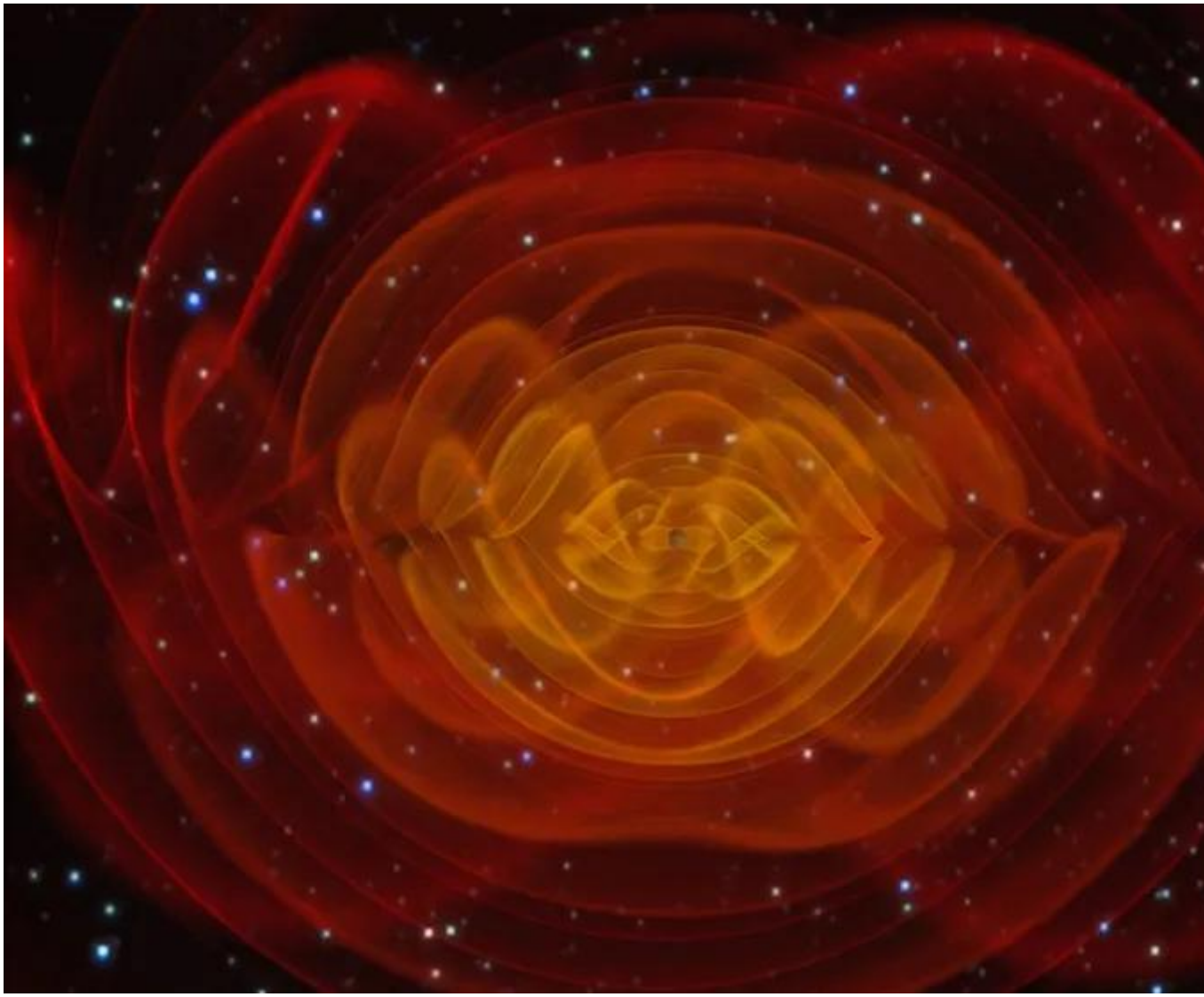
## 2. Les sources d'ondes gravitationnelles

### 2.1 Quels objets génèrent des ondes ?

Pour émettre des ondes gravitationnelles détectables, il faut des mouvements de masses énormes, très rapides, et asymétriques. Les principales sources astrophysiques sont :

### Fusions de trous noirs (BBH — Binary Black Hole)

- Sources les plus fréquemment détectées
- Masses typiques : quelques dizaines de masses solaires (M⊙)
- Fréquences : 10 – 500 Hz pendant la phase de coalescence (chirp)
- Pas d'émission électromagnétique : la détection gravitationnelle est la seule fenêtre



Une simulation par ordinateur montre les ondes gravitationnelles émises par les deux gigantesques trous noirs tourbillonnants l'un autour de l'autre.

### Fusions d'étoiles à neutrons (BNS — Binary Neutron Star)

- Signal gravitationnel + contrepartie lumineuse (kilonova)
- GW170817 (2017) : événement historique — premier signal multi-messager ds NGC4993

**Le 17 aout 2017 les détecteurs ligo et virgo (Italie) ont enregistré un « chirp »(gazouillis) de 100 s : 2 Etoiles à neutrons tournaient l'une autour de l'autre ,en se rapprochant elles émettent des ondes gravitationnelles puis ont fusionné.**

  - Origine des éléments lourds (or, platine, uranium) confirmée : *nucléosynthèse par capture rapide de neutrons (processus r)* **en clair gw170817 a montré d'où vient une partie de l'or de l'univers**

### Étoiles à neutrons isolées (pulsars)

- Si légèrement asymétriques (bosses à la surface), elles émettent en continu
- Signal quasi-monochromatique, très faible — pas encore détecté directement

### Effondrement gravitationnel (supernovæ)

- Si l'effondrement est asymétrique, brève bouffée d'ondes
- Détection envisageable pour une supernova dans notre galaxie

### Fond stochastique primordial

- Ondes reliques de l'inflation cosmique — les plus basses fréquences
- Cible pour LISA et les réseaux de pulsars (PTA — Pulsar Timing Arrays)

C'est un bruit de fond cosmique formé par superposition d'ondes G.

L' univers primordial est Tres chaud , dense , et agité , et ces fluctuations de l'espace temps auraient crée des rides gravitationnelles ds ttes les directions.

## 2.2 Le « chirp » : signature d'une fusion

Lors de la spirale finale (inspiral) de deux objets compacts, la fréquence et l'amplitude de l'onde gravitationnelle augmentent rapidement. Ce signal montant en fréquence et en amplitude, suivi d'une brutale coalescence, est appelé chirp (gazouillis). Sa forme est très bien décrite par la Relativité Générale et permet d'extraire les masses, le spin et la distance de la source.

**Le son des ondes**

En transposant le signal GW150914 dans les fréquences audibles, on obtient un son qui ressemble à un bref « bip » grave remontant. Environ 0,2 secondes pour fusionner deux trous noirs de 36 et 29 M⊙ — et libérer en ondes gravitationnelles l'équivalent de 3 M⊙ convertis en énergie pure.

# 3. Comment les détecter ? Les interféromètres

## 3.1 Principe de l'interféromètre de Michelson

Un laser est divisé en deux faisceaux qui parcourent deux bras perpendiculaires (de plusieurs kilomètres), rebondissent sur des miroirs et se recombinent. En l'absence d'onde gravitationnelle, les deux faisceaux s'annulent parfaitement (interférence destructive). Quand une onde passe, elle allonge l'un des bras et raccourcit l'autre alternativement — brisant l'équilibre et produisant un signal lumineux.

## 3.2 Les astuces techniques

Pour atteindre une sensibilité de $10^{-23}$ $Hz^{-1/2}$, les physiciens ont dû résoudre des défis extraordinaires :

- Cavités Fabry-Pérot : le faisceau fait des centaines d'allers-retours → longueur effective ~1 000 km
- Recycling de puissance : miroir recyclant amplifie la puissance laser à ~750 kW dans les cavités
- Isolation sismique : systèmes de suspension à plusieurs étages, tables optiques flottantes
- Bruit quantique (shot noise) : compensé par l'injection d'états cohérents de lumière comprimée (« squeezed light »)
- Vide poussé : les 8 km de tubes sont sous ultravide ($10^{-9}$ mbar)
- Miroirs ultra-polis : 40 kg de silice de haute pureté, polis à l'atome près

### 3.3 Le réseau mondial de détecteurs

| Détecteur | Lieu | Bras (km) | Statut | Bande (Hz) |
|---|---|---|---|---|
| LIGO Hanford | Washington, USA | 4 | En service | 10 – 5 000 |
| LIGO Livingston | Louisiane, USA | 4 | En service | 10 – 5 000 |
| Virgo | Cascina, Italie | 3 | En service | 10 – 6 000 |
| KAGRA | Kamioka, Japon | 3 | En service | 10 – 5 000 |
| Einstein Telescope | Sardaigne/Meuse-Rhine | 10 | Prévu ~2035 | 2 – 10 000 |
| LISA | Espace (orbite solaire) | 2 500 000 | Prévu ~2035 | 0,0001 – 1 |

### 3.4 Pourquoi plusieurs détecteurs ?

- Validation : un signal doit apparaître dans plusieurs détecteurs (< 10 ms d'écart)
- Localisation : la triangulation par temps d'arrivée permet de pointer dans le ciel

## 4. Les grandes détections

### 4.1 Chronologie des événements marquants

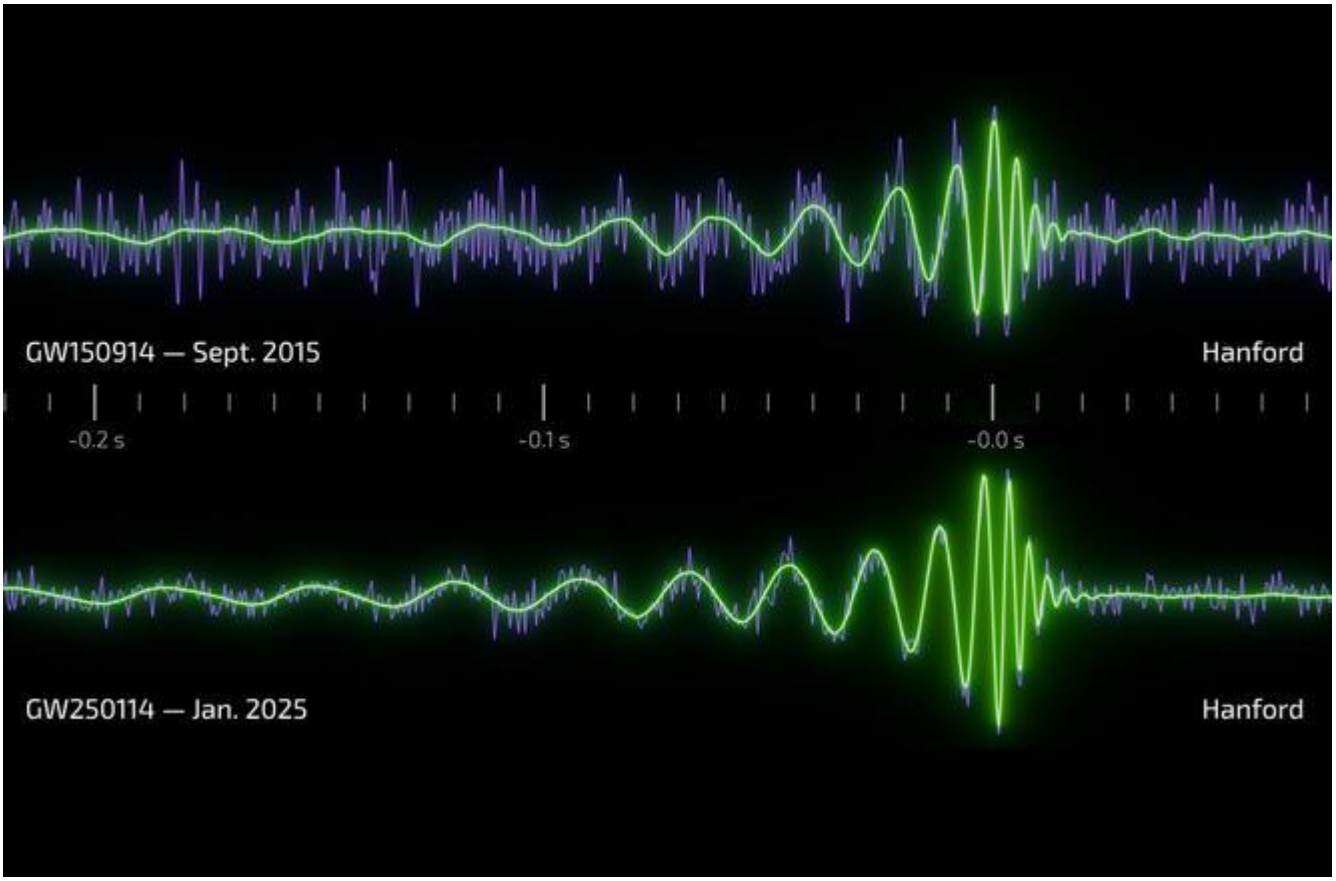
| Événement | Date | Source | Masse (M⊙) |
|---|---|---|---|
| GW150914 | 14 sept. 2015 | Fusion de 2 trous noirs | ~62 |
| GW151226 | 26 déc. 2015 | Fusion de 2 trous noirs | ~21 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| GW170817 | 17 août 2017 | Fusion de 2 étoiles à neutrons | ~2,7 |
| GW190521 | 21 mai 2019 | Fusion de 2 trous noirs | ~150 |
| GW200105 | 5 janv. 2020 | Trou noir + étoile à neutrons | ~8,9 |

## 4.2 GW150914 — Le 14 septembre 2015

**La détection historique**

À 09h50 UTC, les deux détecteurs LIGO enregistrent simultanément un signal de 0,2 secondes. Fusion de deux trous noirs de ~36 et ~29 M⊙ à ~1,3 milliard d'années-lumière. Énergie rayonnée : ~3 M⊙ en ondes gravitationnelles. Prix Nobel de physique 2017 : Rainer Weiss, Kip Thorne, Barry Barish.




signaux d’ondes gravitationnelles enregistrés par le détecteur Ligo à près de 10 années d’intervalle. En haut, l’événement GW150914 (la toute première détection d’ondes gravitationnelles), capté le 14 septembre 2015 à 9 h 50 min 45 s. En bas, GW250114, le 14 janvier 2025. Des améliorations apportées à Ligo ont permis de réduire considérablement le « bruit » parasite.

## 4.3 GW170817 — L'astronomie multi-messager

Le 17 août 2017 marque un tournant. La fusion de deux étoiles à neutrons est détectée en ondes gravitationnelles par LIGO et Virgo. Exactement 1,7 secondes plus tard, le satellite Fermi détecte

un sursaut gamma court. Dans les heures et jours suivants, des dizaines d'observatoires pointent la même galaxie NGC 4993 et observent une kilonova — la forge cosmique des métaux lourds.

### 4.4 GW190521 — Un trou noir "intermédiaire"

La fusion de deux trous noirs de ~85 et ~66 M⊙ produit un résidu de ~150 M⊙ — dans la gamme des trous noirs de masse intermédiaire (IMBH), longtemps supposée mais difficile à confirmer. C'est aussi la première détection dans la « masse interdite » de la paire d'instabilité des supernovæ.

## 5. Ce que nous apprenons

### 5.1 observer des objets invisibles

- Trous noirs en collision
- Fusion d'étoiles à neutrons
- supernovae

### 5.2 mesurer les masses et la dynamique

- Distribution des masses des trous noirs stellaires : inattendue, avec des masses > 40 M⊙
- Taux de fusion dans l'Univers : contraintes observationnelles directes
- Spins des trous noirs : informations sur leur histoire de formation
- Propriétés de la matière nucléaire ultra-dense dans les étoiles à neutrons

### 5.3 comprendre la matière extrême

- Structure interne des étoiles à neutrons
- L'origine des éléments lourds comme l'or.

### 5.4 Tester les lois de la physique

- La relativité générale dans des champs gravitationnels extrêmes
- Remonter peut-être à la naissance de l'univers
- Les ondes gravitationnelles permettent de sonder la relativité générale dans des conditions extrêmes — champs intenses, vitesses relativistes — inaccessibles aux expériences terrestres et aux observations classiques :
- Confirmation que les ondes se propagent à c
- Test de la forme du signal de 2 objets massif (inspiral (spirala approche)→ merge (fusion)→ ringdown(decroissance progressive) conforme aux prédictions.

L'analyse de ce signal permet de déduire :

✓ Masse des objets

| |
|---|
| ✓ Leur distance |
| ✓ Leur spin(vitesse de rotation) |
| ✓ La masse du trou noir final |

- Contraintes sur les déviations possibles à la RG (gravité massive, dimensions supplémentaires…)

# 6. Le futur de l'astronomie gravitationnelle

## 6.1 Les O4/O5 et l'amélioration de LIGO/Virgo

- O4 (2023–2025) : ~200 événements attendus, avec lumière comprimée généralisée
- O5 (vers 2027) : sensibilité encore améliorée, réseau LIGO + Virgo + KAGRA
- Objectif : détecter des fusions d'étoiles à neutrons jusqu'à ~300 Mpc (megaparsecs)
  1 Mpc=3.26 millions d'AL



Illustration du détecteur d'ondes gravitationnelles souterrain Kagra, au Japon, avec les deux bras de l'interféromètre.

## 6.2 Einstein Telescope & Cosmic Explorer

- Einstein Telescope (ET) : détecteur souterrain triangulaire de 10 km en Europ (Sardaigne, région Meuse-Rhine)
- Sensibilité ~10× supérieure à LIGO actuel
- Permettra de suivre les binaires depuis des mois avant la fusion
- Cosmic Explorer (USA) : bras de 40 km — exploration de l'Univers jusqu'au redshift z ~ 100

### 6.3 LISA — L'espace comme interféromètre

LISA (Laser Interferometer Space Antenna), projet ESA prévu vers 2035, consistera en trois satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de km de côté, en orbite autour du Soleil. La bande de fréquences visée (0,1 mHz – 1 Hz) ouvre la fenêtre sur des sources inaccessibles au sol :

- Fusions de trous noirs supermassifs (millions à milliards de M⊙)
- Binaires ultra-compactes galactiques (dont des milliers connues d'avance !)
- Signal cosmologique primordial éventuel
- Trous noirs de masse intermédiaire

### 6.4 Pulsar Timing Arrays (PTA)

Les réseaux mondiaux de chronométrage de pulsars (NANOGrav, EPTA, PPTA…) ont annoncé en 2023 des premières preuves d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles à très basses fréquences (nano-Hz). La nature exacte de ce fond — fusions de trous noirs supermassifs, inflation cosmique ou autre — est encore débattue.

## 7. Conclusion

En un siècle, les ondes gravitationnelles sont passées d'une conséquence théorique de la relativité générale, que son propre auteur croyait indétectable, à un outil d'observation à part entière. En quelques années de fonctionnement, LIGO et Virgo ont ouvert une fenêtre entièrement nouvelle sur l'Univers : muette pour nos yeux et nos radiotélescopes, lumineuse pour nos interféromètres.

Nous sommes au tout début de l'astronomie gravitationnelle. Les prochaines décennies verront des réseaux de détecteurs de troisième génération et une flotte spatiale cartographier l'Univers en ondes gravitationnelles — révélant peut-être des phénomènes encore entièrement inconnus.

**À retenir**

Les ondes gravitationnelles ne sont pas simplement un nouveau « type de lumière ». Elles traversent sans être atténuées la matière opaque, elles portent des informations sur les régions les plus sombres et les plus denses de l'Univers, et elles nous parviennent des événements les plus énergétiques depuis le Big Bang. Nous lisons désormais l'Univers !.

### Pour aller plus loin

- Site officiel LIGO Scientific Collaboration : ligo.org

- Site Virgo : virgo-gw.eu
- Catalogue des événements : gw-openscience.org
- Livre : « Ripples in Spacetime » — Govert Schilling (2017)
- Vidéo : PBS Space Time, Kurzgesagt —
- Logiciel de simulation : GWOSC (données ouvertes) + tutoriels Python/GWpy
-

  https://lejournal.cnrs.fr/dossiers/lere-des-ondes-gravitationnelles

  https://www.nationalgeographic.fr/espace/quest-ce-quune-onde-gravitationnelle

  https://astronoo.com/fr/articles/onde-gravitationnelle.html

  https://www.youtube.com/watch?v=x_Akn8fUBeQ

**à regarder sur ARTE  replay : ondes gravitationnelles le signal de l'origine**