

# Analyse et recommandations de la communauté française des ondes gravitationnelles sur l'Einstein Telescope

Le Conseil Scientifique du GdR Ondes Gravitationnelles<sup>1</sup>

## 1. Introduction

Prévu pour l'horizon 2040, le projet Einstein Telescope<sup>2</sup> (ET) a été labellisé par l'ESFRI<sup>3</sup> en 2021 ce qui a conduit à la mise en place du consortium international ET (1959 membres de 284 laboratoires dans 33 pays) au début d'une phase préparatoire qui s'étale sur 2022-2026. ET sera un détecteur d'ondes gravitationnelles souterrain (quelques centaines de mètres de profondeur) et constitué de deux types d'interféromètres : l'un à température ambiante avec une forte puissance laser optimisé pour les hautes fréquences (basé sur les technologies développées dans LIGO et Virgo), l'autre à température cryogénique optimisé pour les basses fréquences. Ces choix permettent de maximiser la sensibilité à basses fréquences qui est un enjeu pour de nombreuses retombées scientifiques (alertes pour le suivi multi-messager, objets massifs et lointains, forme d'onde de la phase spiralante, etc.), sans pour autant dégrader la sensibilité à hautes fréquences nécessaire pour d'autres résultats (tests de la relativité générale, supernovae, étoiles à neutrons, etc.).

Le GdR « Ondes Gravitationnelles » qui compte 340 membres et rassemble les scientifiques français de ce domaine (ET, Virgo, LISA, PTA, théorie, etc..) s'est réuni le 13 octobre 2025 à Paris pour débattre, à la demande de l'IN2P3, deux questions jugées très importantes pour le futur de la communauté : 1) Quelles sont les synergies et complémentarités entre ET et la communauté française ? 2) Quels sont les enjeux scientifiques et stratégiques du choix de la géométrie (triangle, L) et du site d'ET ? Cette lettre résume les discussions du GdR et souligne les points de convergence de la communauté française.

---

<sup>1</sup> <https://gdrgw.in2p3.fr/>.

<sup>2</sup> <https://einsteintelescope.eu/>.

<sup>3</sup> European Strategy Forum on Research Infrastructures : <https://www.esfri.eu/>.

## 2. Synergies et complémentarités entre ET et la communauté française (PTA, LISA, théorie)

### Synergies avec la théorie

ET s'inscrit dans le même continuum scientifique que les réseaux au sol actuels LIGO, Virgo, KAGRA<sup>4</sup> (qui détectent des ondes gravitationnelles dans les fréquences de  $\sim 10$  à  $\sim 10^4$  Hz), la mission spatiale LISA<sup>5</sup> (de  $\sim 10^{-4}$  à  $\sim 10^{-1}$  Hz), les observations radio du « Pulsar Timing Arrays (PTA)<sup>6</sup> » (de  $\sim 10^{-9}$  à  $\sim 10^{-7}$  Hz) et les futures observations du CMB<sup>7</sup> (autour de  $\sim 10^{-16}$  Hz), ayant pour objectif l'observation de l'Univers avec les ondes gravitationnelles. En particulier, toutes ces observations, sauf celles du CMB, ont un besoin commun de développer des formes d'onde suffisamment précises pour exploiter pleinement les signaux d'ondes gravitationnelles. Les efforts analytiques et numériques nécessaires pour produire des formes d'ondes suffisamment précises pour ET et pour les autres futurs détecteurs sont donc automatiquement mutualisées dans la communauté. Cette expertise théorique, cruciale pour la réussite scientifique d'ET, est particulièrement développée au sein de la communauté française.

### Synergies avec l'analyse de données

Par ailleurs, l'analyse des données d'ET sera très différente de celle menée aujourd'hui par la collaboration LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) et, à bien des égards, au moins avec la sensibilité prévue dans sa configuration finale, plus proche de ce qui est envisagé pour LISA, avec des signaux longs, un très grand nombre d'événements et des corrélations fortes entre sources et paramètres. Les méthodes numériques et notamment d'analyse de données sont donc forcément interconnectées : les progrès dans une communauté peuvent être facilement réutilisés dans une autre. Il sera également nécessaire de développer des pipelines d'inférence astrophysique et cosmologique capables de traiter des populations de l'ordre du million de sources, ce qui impose des exigences fortes en termes de mise à l'échelle, d'ajustement global et de calcul haute performance. Ces développements méthodologiques seront nécessaires dans chacune des bandes de fréquence (PTA, LISA, ET) considérées séparément. La communauté française, forte de ses engagements au sein de la collaboration LVK, contribue déjà de manière déterminante au développement des méthodes et des infrastructures indispensables aux futurs détecteurs d'ondes gravitationnelles comme en témoigne, par exemple, la responsabilité dans le développement du LISA Distributed Data Processing Centre au CNES.

---

<sup>4</sup> <https://www.ligo.caltech.edu/> ; <https://www.virgo-gw.eu/> ; <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>.

<sup>5</sup> <https://www.lisamission.org/>.

<sup>6</sup> <https://ipta4gw.org/>.

<sup>7</sup> <https://cmb-s4.org/>.

## **Synergies avec les autres domaines observationnels (observations électromagnétiques, autres bandes d'observations d'ondes gravitationnelles, astroparticules)**

ET devra être inséré dans un paysage d'observations multi-bandes et multi-messagers. La coordination avec les observatoires gamma (CTA, HESS, SVOM, THESEUS, COMCUBE), les détecteurs de neutrinos (KM3NeT, DUNE) et les autres suivis électromagnétiques (par exemple LSST, Euclid) dans lesquelles la communauté française a déjà largement investi, sera cruciale pour exploiter pleinement les sources transitoires, en particulier les binaires de systèmes compacts. L'amélioration de la localisation impose la présence d'un réseau : la mise en service de Cosmic Explorer<sup>8</sup> (CE) constituerait un atout majeur. Une coordination efficace entre les communautés impliquées dans ET, CE et les détecteurs de deuxième génération est indispensable pour optimiser l'exploitation scientifique d'un réseau mondial intégrant des détecteurs de troisième génération. La synergie avec les détecteurs d'ondes gravitationnelles opérant dans d'autres bandes de fréquences est particulièrement forte pour l'étude des fonds stochastiques, susceptibles de produire un signal détectable par ET, LISA, les PTA et les expériences du CMB. La complémentarité avec LISA est par ailleurs renforcée par l'existence de sources multibandes, potentiellement observables successivement par LISA puis par ET. Pour ces sources, il est important qu'ET soit opérationnel pendant ou immédiatement (quelques années maximum) après LISA. Enfin, il convient de souligner que certains objectifs scientifiques ne dépendent pas de la mise en place d'un réseau mondial de détecteurs de troisième génération, même s'ils seraient fortement renforcés par l'existence d'un tel réseau. Par exemple, un seul détecteur de troisième génération permettra non seulement la détection et la caractérisation d'éventuels signaux d'ondes gravitationnelles exceptionnels, mais également l'étude des propriétés des populations de trous noirs et d'étoiles à neutrons à haut redshift.

### **Synergies sur le développement technologique**

KAGRA fournit une expérience précieuse pour l'accès aux basses fréquences, la cryogénie et l'implantation souterraine. Les détecteurs haute fréquence de type LIGO/Virgo servent de bancs d'essai pour les technologies nécessaires à ET, qu'il s'agisse des lasers de haute puissance, des sources de squeezing ou des schémas de détection avancés tels que la balanced homodyne detection (BHD). Dans cette perspective, LIGO, Virgo et KAGRA jouent un rôle de R&D pour ET. Il existe enfin une synergie avec CE pour la définition des détecteurs avec des réunions conjointes instrumentales (XGCD meetings) et pour certains aspects d'infrastructure, notamment les tubes à vide également en lien avec le CERN. Une collaboration avec ET visant à partager les compétences relatives à l'étude, au budget et aux modèles et simulations des sources du bruit sera particulièrement importante. La mise en place d'IGWN (International Gravitational Wave Network) à la place de LVK préfigure la réalisation d'une collaboration mondiale pour les détecteurs de troisième génération dans laquelle ces co-développements pourront être formalisés.

---

<sup>8</sup> <https://cosmicexplorer.org/>.

### 3. Enjeux scientifiques et stratégiques du choix de la géométrie (triangle, L) et du site

Le projet Einstein Telescope prévoit deux configurations techniques en compétition : l'une en « triangle » — un réseau souterrain avec trois bras de 10 km formant un triangle équilatéral —, l'autre en « 2L » — c'est-à-dire deux détecteurs souterrains en forme de L avec des bras de 15 km, implantés sur deux sites distincts. Quant à l'emplacement, trois régions européennes sont aujourd'hui candidates : le site de Sos Enattos en Sardaigne (Italie), l'Euregio Meuse-Rhin (région frontalière Belgique-Allemagne-Pays-Bas), et la région de Lusatia en Saxe (Allemagne). Ces trois candidatures font l'objet d'études géophysiques, environnementales et d'infrastructures afin de déterminer l'option optimale, en fonction notamment de la stabilité du sous-sol, de l'impact sur l'environnement et des capacités scientifiques et techniques des régions. Les distances (géodésiques) approximatives entre les trois sites considérés sont les suivantes :

Sites	Distances
Sos Enattos ↔ Euregio Meuse-Rhin	~ 1400 km
Sos Enattos ↔ Lusatia	~ 1500 km
Euregio Meuse-Rhin ↔ Lusatia	~ 600 km

#### Considérations sur la géométrie

Dans cette comparaison entre la configuration 2L et la configuration triangulaire, nous considérons uniquement les aspects scientifiques et techniques<sup>9</sup>, à l'exclusion des éléments liés au budget, aux risques financiers ou à l'impact environnemental des deux options. Ces dimensions devront également être prises en compte avant tout choix final.

La géométrie en triangle présente des atouts spécifiques. Pour le fond stochastique (SGWB) et l'inférence des paramètres en général, elle permet de construire un "null stream" particulièrement utile. Cette configuration présente toutefois un design plus original et plus éloigné des détecteurs actuels, ce qui implique un risque technologique accru ; celui-ci ne serait véritablement atténué que dans le cadre d'un réseau mondial de détecteurs, tandis qu'un triangle isolé resterait, sous cet angle, particulièrement vulnérable. En particulier, certains bruits environnementaux risquent de présenter de fortes corrélations susceptibles d'affecter négativement la sensibilité du triangle<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> A. Abac *et al.* [ET Collaboration], The Science of the Einstein Telescope, (2025) [arXiv:2503.12263]; M. Branchesi *et al.*, Science with the Einstein Telescope: a comparison of different designs, JCAP 07 (2023), 068 [doi:10.1088/1475-7516/2023/07/068] [arXiv:2303.15923].

<sup>10</sup> K. Janssens *et al.*, Correlated 0.01-40 Hz seismic and Newtonian noise and its impact on future gravitational-wave detectors, Phys. Rev. D 109 (2024) no.10, 102002 [doi:10.1103/PhysRevD.109.102002] [arXiv:2402.17320]; K. Janssens *et al.*, Impact of correlated seismic and correlated Newtonian noise on the Einstein Telescope, Phys. Rev. D 106 (2022) no.4, 042008

Cette géométrie entraîne par ailleurs des contraintes d'infrastructure importantes, par exemple : la taille des cryostats qui complique la réalisation des vertex, la gestion de cinq à six tubes à vide par tunnel, ou encore la nécessité de périscopes pouvant atteindre quatre mètres de haut. À l'inverse, la configuration 2L offre la possibilité d'allonger les cavités de filtrage du squeezing à basse fréquence, ce qui relâche certaines contraintes sur les coatings et/ou sur le contrôle.

La configuration 2L n'est toutefois pas exempte de difficultés. Elle présente des risques accrus à basse fréquence liés à la taille des miroirs : plus les bras sont longs, plus les miroirs doivent être grands, et l'on ne sait pas aujourd'hui si des miroirs suffisamment grands pourront être construits pour des bras de 15 km, alors que pour des bras de 10 km cela paraît réalisable. Une option intermédiaire pourrait consister à envisager des bras de 10 km pour le détecteur basse fréquence et de 15 km pour le détecteur haute fréquence. La dimension des miroirs constitue un sujet de recherche et développement au même titre que les gains supérieurs d'un facteur dix attendus sur la puissance des lasers, le squeezing, et d'autres améliorations clés. L'extension du LMA (Laboratoire des Matériaux Avancés à Lyon) ainsi que la nouvelle machine de dépôt de couches minces, dont la construction vient de débuter, ont précisément pour objectif d'y répondre, tant pour CE que pour ET.

Les études soulignent par ailleurs que, indépendamment du choix précis de géométrie, la présence d'un instrument basse fréquence performant est déterminante pour de nombreux cas scientifiques majeurs (en particulier le suivi multi-messager des binaires d'étoiles à neutrons, les binaires de trous noirs à masses intermédiaires, certains signaux de longue durée et des composantes du fond stochastique), de sorte que le maintien de cette capacité basse fréquence est un point structurant du design. Par conséquent, il sera essentiel de maintenir une attention particulière sur le développement des technologies nécessaires pour atteindre la sensibilité visée à basses fréquences au cours des prochaines années.

La communauté française souligne néanmoins l'idée que les bras doivent être aussi longs que possible, qu'une géométrie 2L est plus favorable à la science multi-messager grâce à une meilleure localisation, et qu'une telle configuration est mieux adaptée pour gérer les risques technologiques.

### **Considérations sur le site**

Le choix du site doit tenir compte à la fois des contraintes géométriques et des objectifs scientifiques. Si un site permet la réalisation d'un interféromètre en L de 20 km, il serait naturel de le privilégier. En configuration 2L, il est souhaitable de maximiser la distance entre les deux sites afin d'optimiser la localisation sur le ciel, les études de réseaux montrant que les performances en localisation angulaire sont dominées par la longueur des bases entre détecteurs. En configuration triangle, la priorité est de choisir un site présentant le moins de bruit sismique possible, car un environnement sismiquement calme permet d'abaisser la fréquence de l'instrument et conditionne directement l'accès à plusieurs objectifs scientifiques majeurs.

---

[doi:10.1103/PhysRevD.106.042008] [arXiv:2206.06809].

## 4. Conclusions

En conclusion, la communauté française souhaite insister sur le fait qu'ET soit opérationnel durant, ou immédiatement après, LISA et en coordination avec CE afin de maximiser le retour scientifique du détecteur. De plus, la géométrie en L nous paraît la moins risquée d'un point de vue technologique et opérationnel tout en permettant un retour scientifique optimal grâce à ses bras plus longs. La présence d'un instrument à basses fréquences est déterminante et ne doit pas être négligée. Il est important dans cette géométrie 2L de maximiser la distance entre les deux sites afin d'optimiser la localisation des sources dans le ciel. Enfin, un site permettant la réalisation d'un interféromètre en L de 20 km serait à privilégier.

De manière générale, dans la tradition de coopération internationale qui structure depuis de nombreuses années la communauté des détecteurs d'ondes gravitationnelles au sol (LVK et bientôt IGWN), il nous semble crucial que toute décision irréversible concernant le site ou la géométrie d'ET soit prise en accord avec le projet CE et la NSF (National Science Foundation), afin d'examiner de manière coordonnée les options permettant d'optimiser à la fois les coûts, la complémentarité scientifique et l'impact environnemental global du futur réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles de troisième génération.