

## Point sur LISA et LISAPathfinder

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

Une onde gravitationnelle est une onde de courbure de l'espace-temps qui se propage à travers l'Univers.

Dès 1915, Einstein prédisait qu'une concentration de matière courbe les rayons lumineux, ce qui a été confirmé par des observations faites lors de l'éclipse solaire totale de 1919. Puisque les rayons lumineux suivent le plus court chemin entre deux points, cela signifie qu'une concentration de matière courbe l'espace-temps.

Un *déplacement* de cette concentration de matière (par exemple lors d'une explosion), va donc engendrer un déplacement de courbure à travers l'espace-temps, une onde gravitationnelle. Un peu comme une pierre jetée dans une mare tranquille engendre des vagues à la surface de l'eau. La différence est que ces vagues s'amortissent très rapidement, alors que les ondes gravitationnelles parcourent des distances énormes sans amortissement.

Cette propriété est liée au fait que la force gravitationnelle est la plus faible de toutes les forces fondamentales. L'onde gravitationnelle n'interagit que gravitationnellement avec son environnement et perd donc très peu d'énergie. L'information sur la source, qui est encodée dans la phase de l'onde, reste donc quasiment intacte même après un très long voyage. Selon la théorie de la relativité, ces ondes se déplacent à la vitesse de la lumière, et leur amplitude diminue comme l'inverse de la distance à la source.

Le passage d'une onde gravitationnelle se traduit par une variation périodique de distance entre deux objets massifs. Ainsi des masses test disposées en cercle semblent se déformer en ellipse, selon la Figure 1.

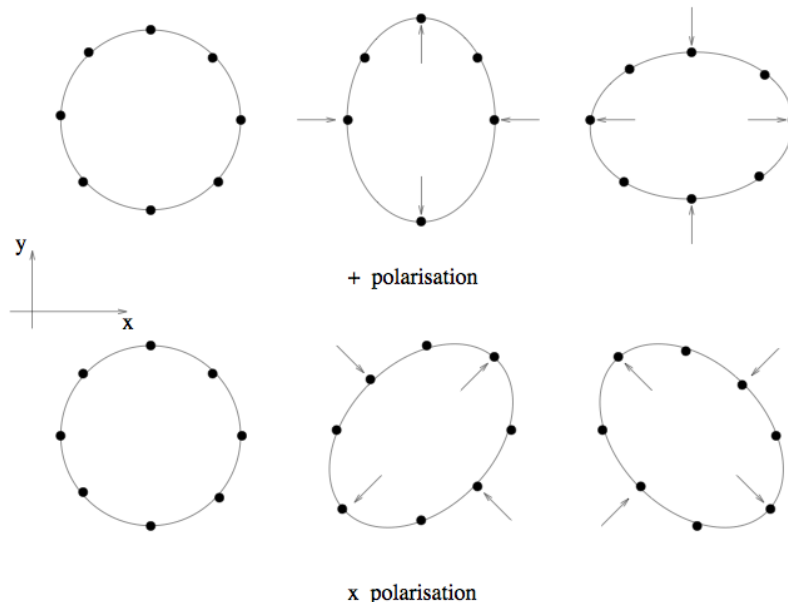


Figure 1 : les deux modes de polarisation des ondes gravitationnelles

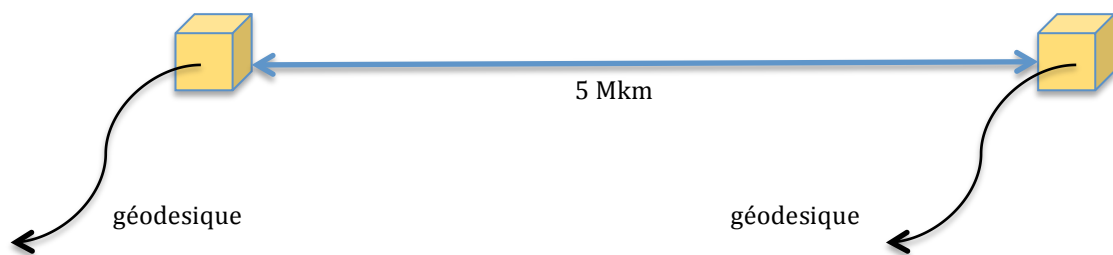
L'amplitude de l'onde est mesurée par la variation relative de distance entre les masses.

Un exemple classique de source est un système binaire de deux astres compacts (par exemple des trous noirs) en rotation. La fréquence de l'onde émise est, à un facteur 2 près, la fréquence de rotation du système. Si  $M$  est la masse totale du

système, et  $R$  la distance entre les astres, les lois de Kepler nous disent que cette fréquence est d'ordre  $(G_N M/R^3)^{1/2}$ . Ceci donne une fréquence de l'ordre de 100 Hz pour un système binaire d'étoiles à neutrons, et de l'ordre de  $10^{-2}$  Hz pour un système binaire de trous noirs supermassifs (un million de masses solaires), comme il en existe au centre des galaxies.

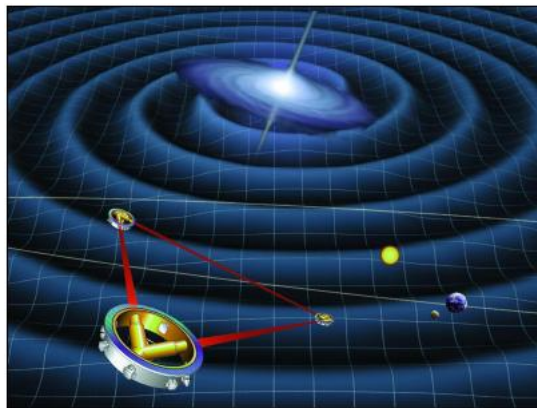
Cette fréquence  $f$  fixe la taille des détecteurs : un détecteur sera efficace s'il est d'une taille de l'ordre de la longueur d'onde ( $c/f$ ). Ceci donne une taille de détecteur de l'ordre de 3000 km pour les binaires d'étoiles à neutrons, et de 30 millions de kilomètres pour les binaires de trous noirs supermassifs. Dans le premier cas, les détecteurs terrestres (de taille 3 à 4 km) atteignent la performance nécessaire grâce au recyclage du faisceau dans une cavité résonnante. Mais, dans le second cas, il faut nécessairement aller dans l'espace.

### Le concept de la mission LISA



Le but de la mission LISA est de mesurer des variations relatives de distance pour deux masses situées à quelques millions de kilomètres de distance, et suivant des trajectoires gravitationnelles (géodésiques).

Le concept a été identifié dès la fin des années 70 (par Ray Weiss, Pete Bender, James Faller et Ron Drever), et concrétisé dans les années 90 : on utilise, comme au sol, l'interférométrie laser pour mesurer les variations de distance. Une constellation de trois satellites formant un triangle de 5 millions de km, et reliés entre eux par des liens laser, permet d'obtenir plusieurs interféromètres de Michelson à deux bras.

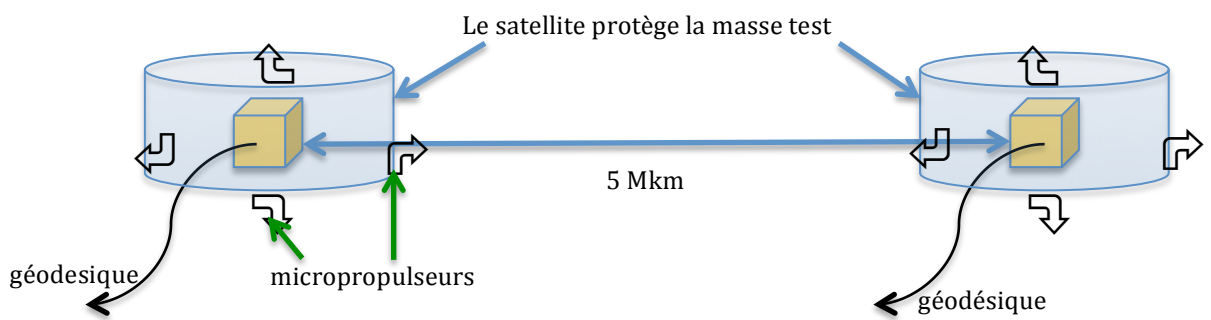


*Figure 2 : la constellation LISA suivant la Terre dans une orbite héliocentrique*

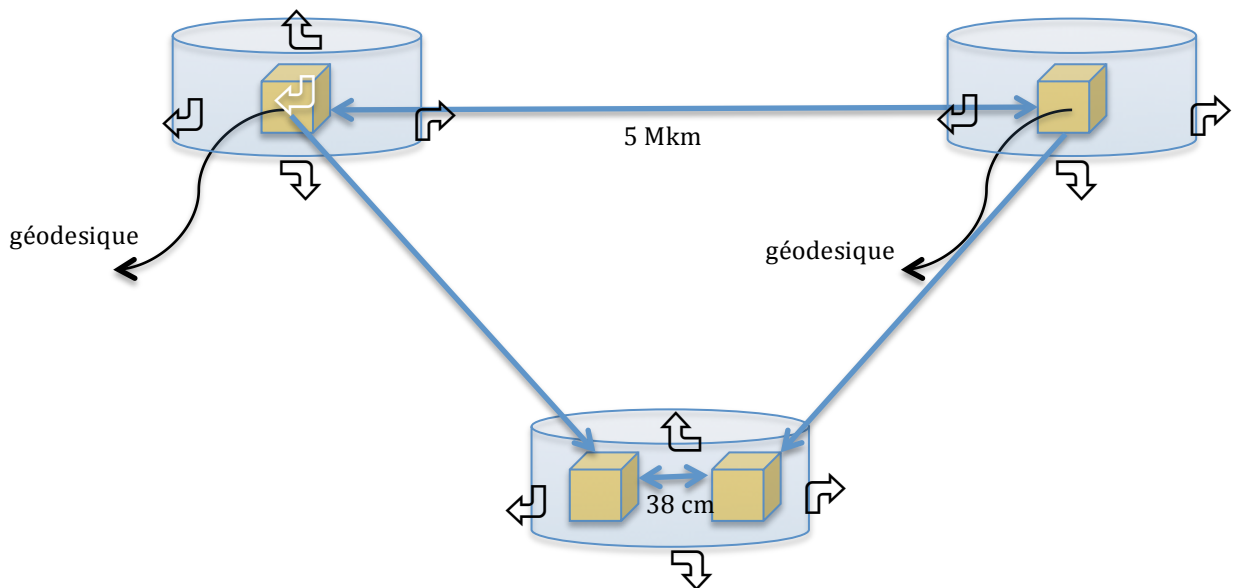
La précision que l'on doit atteindre pour détecter les ondes gravitationnelles recherchées est de l'ordre du picomètre. Ceci semble souvent au néophyte un tour de force impossible à réaliser mais on doit remarquer plusieurs choses :

- On ne mesure des variations relatives de distance que dans une bande de fréquence de  $10^{-4}$  à  $10^{-1}$  Hz, c'est-à-dire pour des temps d'intégration entre 10 s et 10 000 s.
- La précision atteinte est plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle obtenue dans les détecteurs au sol.
- Une source importante de bruit est le bruit laser. Une méthode a été imaginée pour le réduire de plusieurs ordres de grandeurs : combiner avec retard les phases mesurées dans plusieurs satellites. C'est la méthode dite de Time Delay Interferometry (TDI).

La vraie difficulté réside ailleurs, dans le fait qu'on veut mesurer des variations de distance entre des masses qui ne sont soumises qu'à la force gravitationnelle (c'est-à-dire sont en chute libre). On ne mesure donc pas la distance entre les satellites, mais la distance entre des masses test logées au centre des satellites. Le satellite sert à protéger la masse des perturbations externes : dès qu'il détecte un mouvement relatif par rapport à la masse, il se repositionne grâce à des micro-propulseurs. C'est ce qu'on appelle le mécanisme de compensation de traînée :



C'est pour tester cette technologie clé que l'ESA a décidé de lancer le satellite technologique LISAPathfinder. Dans ce cas, on réduit la longueur d'un bras de LISA à 38 cm (plus question de tester les ondes gravitationnelles) :



On s'assure que l'une des masses est en chute libre, au moins dans les conditions de bruit requises. La mission LISAPathfinder a été conçue pour tester un niveau de bruit 10 fois moins bon que la mission finale. Elle a connu un certain nombre de retards et

de surcoûts (le coût final atteint 400 millions d'euros), mais a été lancée avec succès le 3 décembre 2015 de Kourou.

La Figure 3 donne une idée de la charge utile à l'intérieur du satellite.

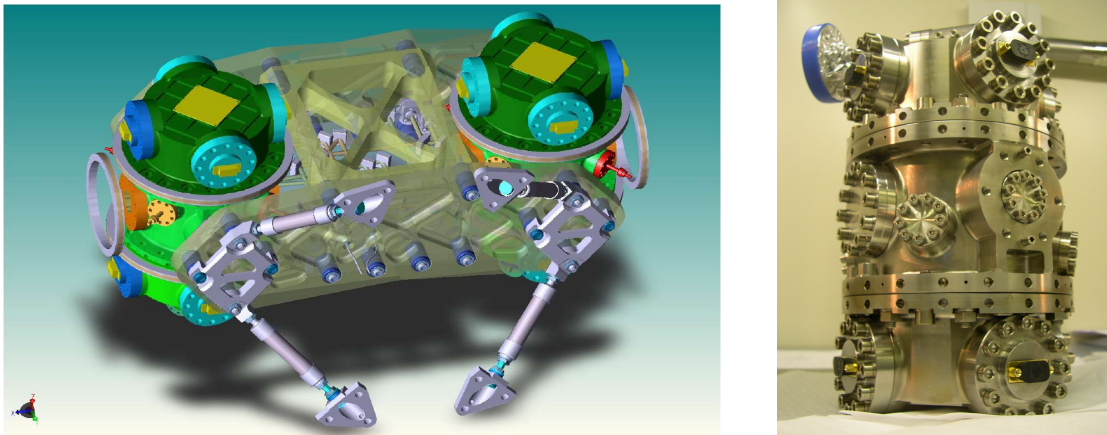


Figure 3 : la charge utile de LISAPathfinder avec les deux masses insérées dans leur cage et l'ensemble du senseur inertiel (Gravitational Reference Sensor, à droite), et entre les deux le banc optique permettant de faire les mesures interférométriques.

Les premiers résultats ont été publiés six mois après le lancement, et ont dépassé toutes les attentes : non seulement l'objectif de LISAPathfinder était atteint, mais aussi l'objectif dix fois meilleur nécessaire pour la mission LISA. A grandes longueurs d'onde, un facteur 10 supplémentaire était encore gagné.

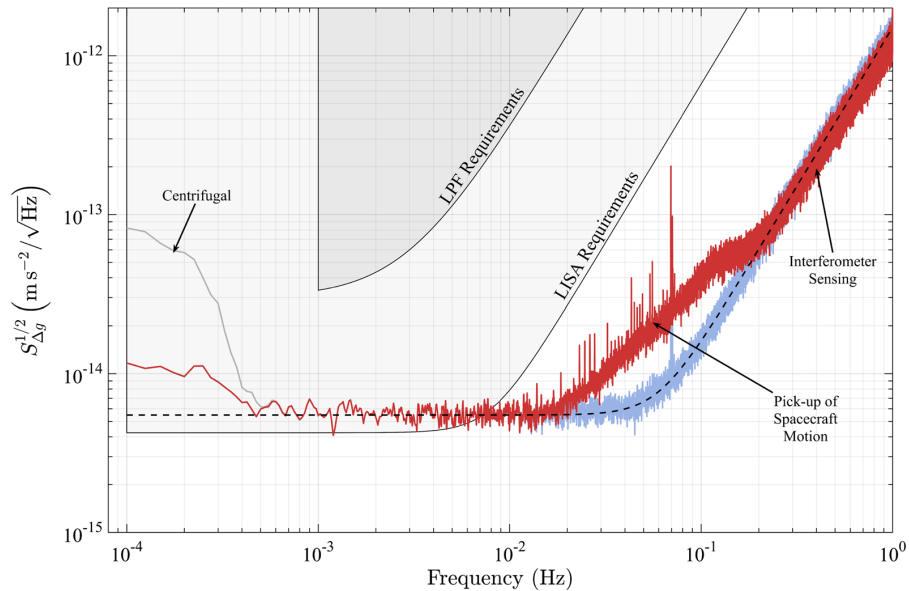


Figure 4 : les premiers résultats de LISAPathfinder, avec la courbe de bruit obtenue, l'objectif de LISAPathfinder (LPF requirements), l'objectif de LISA (LISA requirements).

Ce succès très inhabituel pour une mission spatiale a accéléré tout le calendrier de la mission LISA, comme nous allons le voir.

## Le statut de la mission LISA dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA

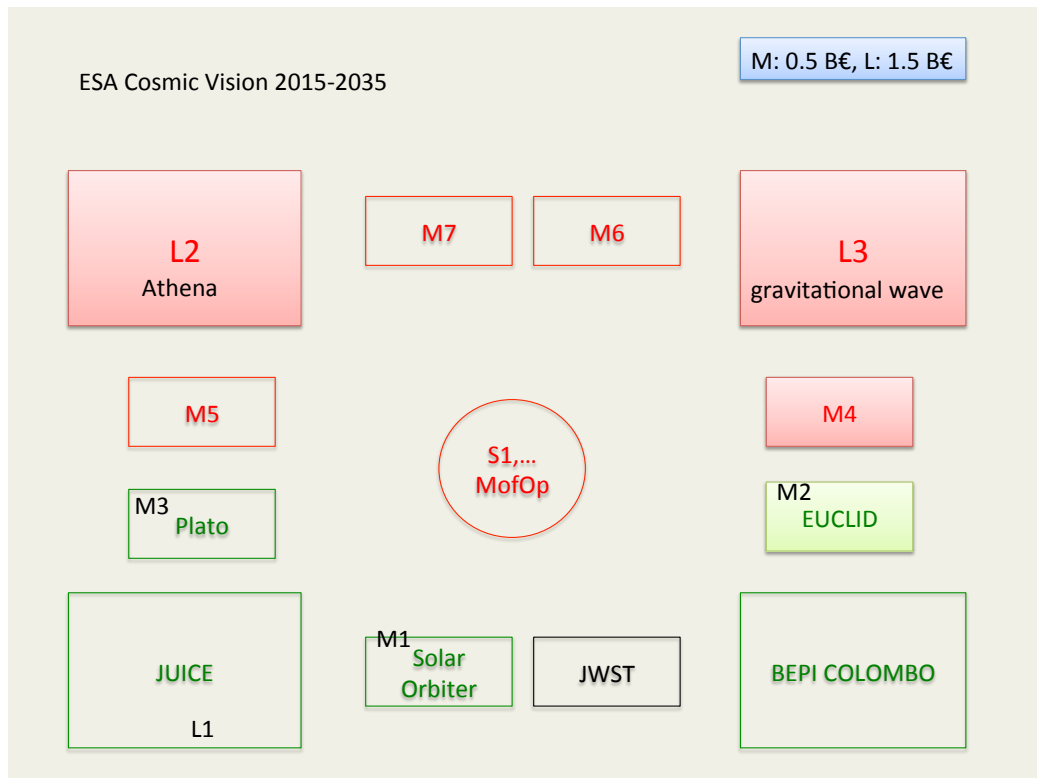


Figure 5 : Le programme Cosmic Vision de l'ESA et ses quatre missions « pierres angulaires »

On ne reprendra pas ici l'histoire du projet depuis les années 1990 (LISA a été classée pendant un temps mission « pierre angulaire » et une étude de phase A industrielle a été menée) mais seulement depuis que le projet a été intégré au programme Cosmic Vision de l'ESA (Figure 5).

Début 2011, devant les incertitudes de financement de la NASA dues au surcout de James Webb Space Telescope, l'ESA décide de ne pas poursuivre le processus de sélection des missions L (« Large » c'est-à-dire avec un coût total de l'ordre de 1,5 milliard d'euros) en partenariat 50/50 avec la NASA mais de demander à chacune des missions en compétition d'envisager son développement dans un contexte purement européen.

La mission NGO (New Gravitational wave Observatory) qui prend la suite de LISA est alors définie par une équipe scientifique réunie par l'ESA, le NGO Science Study Team (P. Binétruy en étant le membre français). Par rapport à LISA, la mission NGO a opté pour une version à 3 satellites mais seulement 2 bras (4 liens laser) et donc un seul interféromètre de Michelson (un satellite « mère » et deux satellites « filles »). Cette simplification permet un lancement moins coûteux (2 Soyuz) et une nouvelle orbite plus proche de la Terre.

Les contraintes de cet appel (850 M€ pour la contribution ESA) conduisent par ailleurs à la définition d'une charge utile fournie par les Etats membres (d'une valeur de 200 M€) et donc de la mise en place d'un consortium, sous leadership allemand. Dans une série de réunions de la communauté dans un premier temps, puis des agences spatiales concernées, la répartition suivante est adoptée pour la fourniture de la charge utile par le consortium des Etats membres (voir Figure 6 ci-dessous) :

- Le senseur inertielle (Italie)
- Le banc optique (Grande Bretagne)
- Le phasemètre (Allemagne et Danemark)
- L'unité de diagnostic (Espagne)
- L'électronique front end (Suisse)

La logique est que chaque pays construise ce qu'il contribue déjà à la mission technologique LISAPathfinder. Ceci assèche la contribution financière de ces pays. **La France qui participe peu techniquement à la mission LISAPathfinder récupère alors deux morceaux de choix, généralement sous la responsabilité du P.I. : le centre de traitement des données et l'Intégration de la charge utile.**

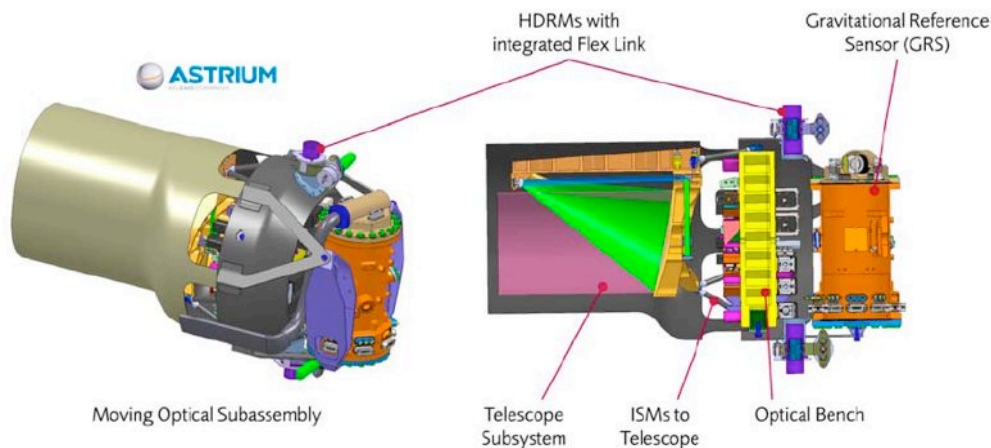


Figure 6 : charge utile de NGO

Plus précisément, la France a la responsabilité de l'intégration du senseur inertielle (GRS) et du banc optique sur une structure commune et des tests de performance de la charge utile avec le phasemètre. Restent à la charge de l'ESA le laser et le télescope.

La sélection de la mission L1 se conclut en mai 2012 par le choix de la mission Juice d'exploration des lunes de Jupiter. La « haute valeur scientifique » de la mission NGO est toutefois « unanimement » reconnue par le SSAC et un nouvel appel à missions L est annoncé par l'ESA dès 2013, avec une continuation des activités technologiques pour préparer cet appel.

L'appel 2013 porte sur les thèmes scientifiques des missions L2 et L3. Un Senior Survey Committee présidé par Catherine Cesarsky identifie :

- Pour L2, le thème « The hot and energetic Universe » (mission X) : appel à mission 2014, adoption 2018, lancement 2028

- Pour L3, le thème « The gravitational Universe » (mission ondes gravitationnelles) : appel à mission 2020, adoption 2024, lancement 2034.

En ce qui concerne la mission L3, dès août 2013, l'ESA forme un Gravitational wave Observatory Advisory Team (GOAT) formé de membres européens et américains (membres français : Pierre Binétruy et Philippe Bouyer) pour conduire des études sur les concepts de mission réalistes et sur les technologies à développer. Très vite, le GOAT conclut que le seul concept réaliste pour un lancement en 2034 est le concept d'interférométrie laser, celui de LISA (même s'il date des années 90). Le rapport final est publié au printemps 2016 : il recommande le retour à une mission à trois bras (six liens laser), et identifie les technologies hors LISAPathfinder à développer. Il identifie aussi un scénario accéléré, qui serait guidé par des considérations purement techniques et non budgétaires : le lancement est alors envisageable en 2029.

L'année 2016 est l'année glorieuse pour les ondes gravitationnelles : annonce de leur découverte en février, premiers résultats spectaculaires de LISAPathfinder en juin (voir ci-dessus). La direction de l'ESA laisse alors entendre qu'elle va accélérer le processus.

En parallèle, Le Mid-Decadal Survey américain, qui passe en revue l'état d'avancement du Decadal Survey 2010-2019, émet de fortes recommandations sur la participation US à la mission. Considérant que les deux obstacles identifiés en 2010 (non découverte des ondes gravitationnelles et LISAPathfinder non encore en vol) étaient levés, le Comité fait de fortes recommandations pour une participation minoritaire (à hauteur de 20%) de la NASA à la mission L3.

Début septembre, lors du LISA Symposium qui se tient à Zurich, le Directeur de la Science à l'ESA annonce qu'il avance de 4 ans l'appel à mission, et qu'il souhaite, si c'est possible, une adoption en 2020. L'appel à mission est publié le 15 octobre, avec retour des réponses au plus tard le 16 janvier.

Avant de voir quelle mission a été proposée par le consortium LISA, passons en revue les différents aspects de la science de LISA.

### **La science de LISA**

La science de LISA couvre de nombreux domaines depuis la gravitation, la physique fondamentale, l'astrophysique des objets compacts, la cosmologie des grandes structures jusqu'à la cosmologie primordiale et même la physique des particules. On peut la présenter selon les sources observées comme nous allons le faire ici, ou selon les questions de physique (voir Table 1 en fin de section).

- **Sources garanties : binaires galactiques compactes**

Un certain nombre de sources sont garanties, c'est-à-dire qu'on sait déjà qu'elles émettent des ondes gravitationnelles. Ce sont des systèmes galactiques binaires d'objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons ou naines blanches). La plus connue de ces sources est le pulsar de Hulse et Taylor dont l'évolution de la période au cours des années a confirmé que le système binaire perdait de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles, ce qui a valu le Prix Nobel à Hulse et Taylor en 1993.

Ces sources, détectables électromagnétiquement et gravitationnellement (avec LISA) sont appelées « binaires de vérification » car elles permettront de vérifier les performances du détecteur en vol.

Au total, on espère par ailleurs identifier et étudier quelques 25000 binaires galactiques, ce qui devrait permettre de faire un grand pas dans la typologie et la compréhension de la physique de ces sources.

- **Binaires de trous noirs astrophysiques**

Les trous noirs supermassifs au centre des galaxies forment la source « en or » de la mission LISA. Ils émettent des ondes gravitationnelles lorsqu'ils forment des systèmes binaires. C'est pourquoi l'on s'intéresse particulièrement aux collisions/fusions de galaxies : lors de la collision, les trous noirs centraux s'attrapent gravitationnellement et forment un système binaire qui va évoluer vers une fusion : le trou noir résultant sera le trou noir central de la nouvelle galaxie. Le signal (Figure 7) est très similaire au signal observé dans LIGO (ou Virgo) de fusion de deux trous noirs stellaires.

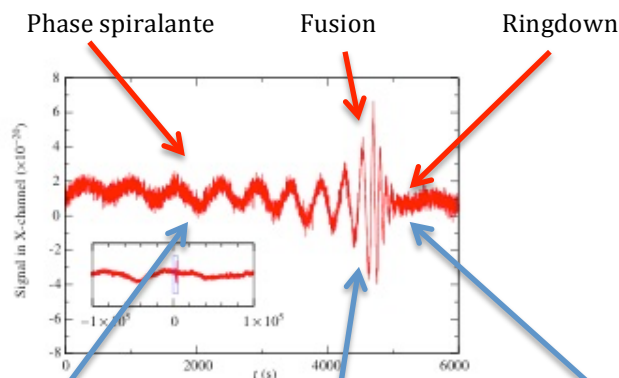


Figure 2.23: Gravitational wave signal for the final few orbits, plunge, merger and ringdown of a coalescing binary. The total mass of system  $M(z=5) = 2 \times 10^6 M_{\odot}$ , mass ratio  $m_1/m_2 = 2$ , spin magnitudes  $a_1 = 0.6$   $a_2 = 0.55$ , misalignment between spins and orbital angular momentum few degrees, the distance to the source  $z = 5$ . The inset shows the signal on a larger data span.

RG : approximation post-Newtonienne

Théorie de perturbation des TN

RG : relativité numérique

Figure 7 : les différentes phases de la fusion de deux trous noirs supermassifs.

Il y a toutefois deux différences majeures :

- Le système binaire apparaît dans la bande de fréquence de LISA quelques mois avant la fusion (au lieu de quelques secondes dans le cas des détecteurs terrestres), ce qui permet d'être en mesure de bien étudier la source (position dans le ciel, etc.) et de déclencher des alertes pour les télescopes.
- Les rapports signal/bruit peuvent être extrêmement importants, jusqu'à plusieurs milliers (voir Figure 8) ce qui permet d'accéder à des informations beaucoup plus précises que du sol. On compte en particulier pouvoir accéder à des informations très précises lors de la phase de « ringdown » où le trou noir final retombe dans son état fondamental en émettant des ondes gravitationnelles, appelées modes quasi-normaux. Leur connaissance détaillée devrait soit confirmer très finement la relativité générale, soit identifier des violations.



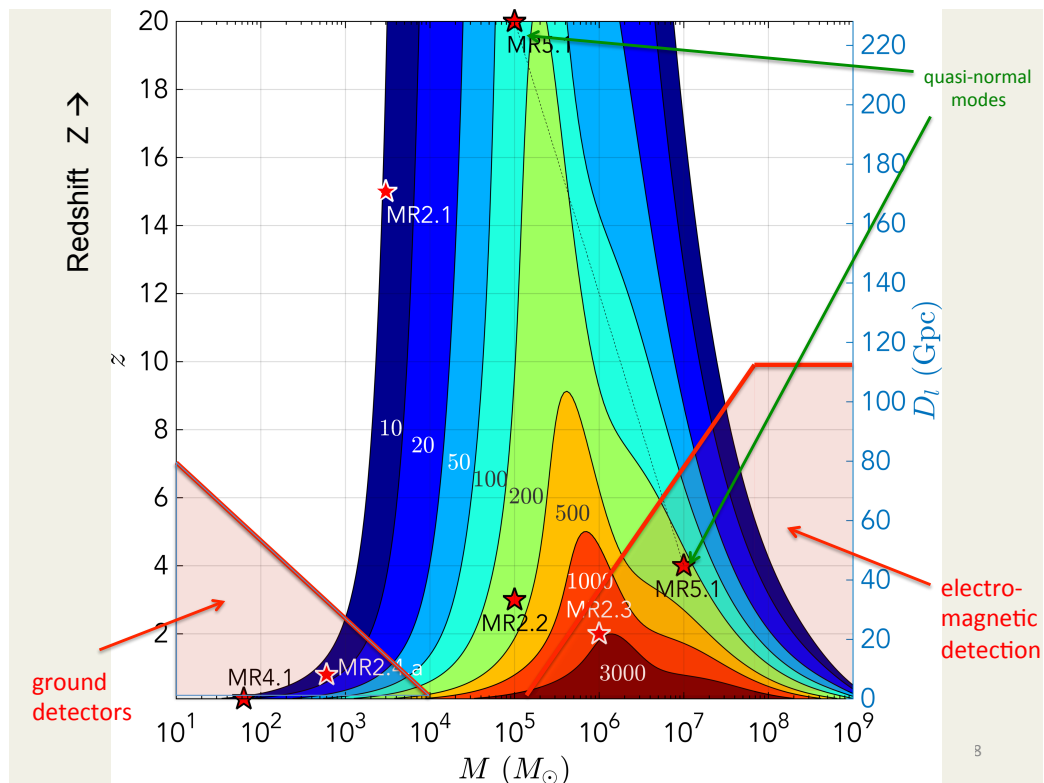


Figure 8 : le rapport signal/bruit obtenu pour une fusion de deux trous noirs illustré dans un plan (masse des trous noirs (en unité de masse solaire)/décalage spectral). Les zones où ces sources pourraient être observées par les détecteurs utilisant le rayonnement électromagnétique, ou par les détecteurs gravitationnels au sol, sont indiquées.

Ces fusions de trous noirs supermassifs ont aussi un énorme intérêt cosmologique, du point de vue de la formation des grandes structures (galaxies). Il existe en effet une corrélation étroite entre les propriétés de ces trous noirs supermassifs et celles de leur galaxie-hôte. Le rôle que joue le trou noir est pour l'instant mal compris. L'origine de ces trous noirs aussi. On imagine que les premières galaxies, petites et irrégulières, avaient déjà un trou noir central, de masse quelques milliers de masses solaires. Puis au fur et à mesure des collisions et fusions de galaxies, les galaxies sont devenues de plus en plus grandes et régulières, et leurs trous noirs ont aussi augmenté de masse. Jusqu'à des galaxies spirales comme la nôtre, avec son trou noir central de quelques millions de masses solaires. La Figure 8 montre que LISA pourra retracer cette histoire jusqu'à ses débuts grâce à l'observation des fusions de trous noirs centraux. Une contribution majeure à la formation des grandes structures.

- **Sources garanties : trous noirs stellaires massifs**

La découverte des ondes gravitationnelles dans le détecteur LIGO s'est accompagnée d'une demi-surprise : la masse des trous noirs stellaires en jeu, qui atteint la soixantaine de masses solaires (on s'attendait que les trous noirs d'origine stellaire aient des masses inférieures à la dizaine de masses solaires). Un rapide coup d'œil à la Figure 8 (point noté MR4.1 en bas à gauche) montre que ces sources sont détectables par la mission LISA. Effectivement, si LISA avait été dans le ciel depuis longtemps, il aurait détecté la source GW150914 depuis une dizaine d'années (Figure 9): les deux trous noirs sont alors plus éloignés, ils tournent moins vite, la fréquence des ondes gravitationnelles est donc plus faible et est dans la fenêtre de LISA. Ensuite, comme le système perd de l'énergie sous

forme d'ondes gravitationnelles, les deux trous noirs se rapprochent, tournent plus vite et parcourent donc la fenêtre de fréquence de LISA, jusqu'à en sortir quelques semaines avant le plongeon final observé par LIGO. On peut ainsi observer ces sources pendant plusieurs années, identifier précisément leur position dans le ciel, et le moment précis où elles seront observables dans les détecteurs terrestres et fusionneront. Ceci permet à nouveau de donner des alertes précises.

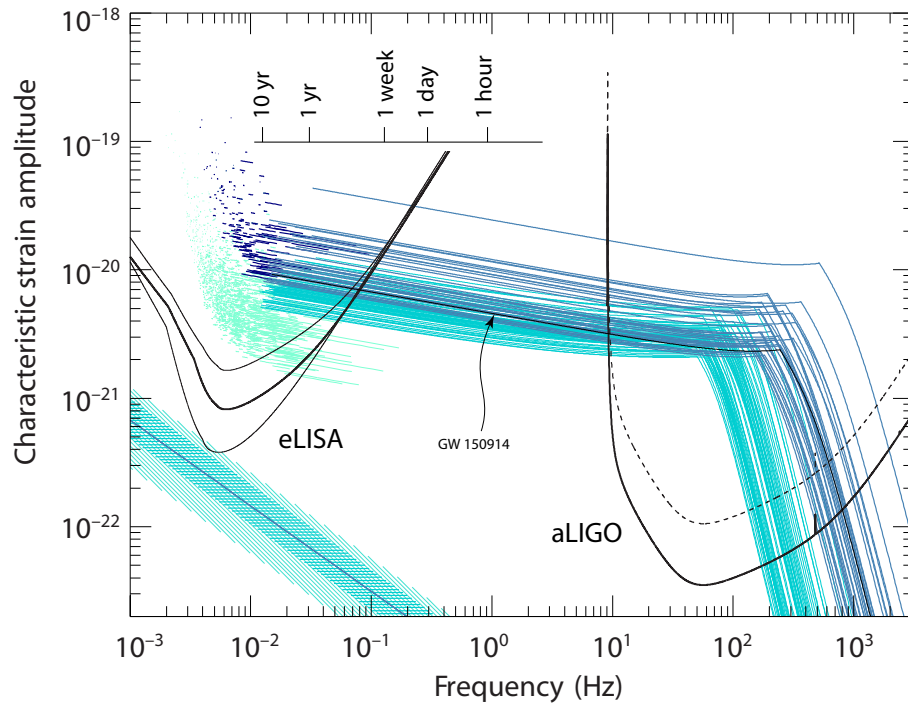


Figure 9 : évolution au cours du temps des sources binaires de trous noirs stellaires massifs (en particulier GW150914) dans la fenêtre de LISA puis dans celle de LIGO-Virgo.

- **Extreme Mass Ratio Inspiral (EMRI)**

Une source binaire spécifique à LISA est celle constituée d'un petit trou noir stellaire attrapé dans le champ gravitationnel d'un trou noir galactique. Parce que le petit trou noir est très compact, il n'est pas déchiqueté par les forces de marée et va orbiter pendant plusieurs mois très près de l'horizon du trou noir galactique jusqu'à finalement tomber à l'intérieur. On compte qu'il peut faire de l'ordre de 100 000 cycles autour (Figure 10). Ce mouvement de rotation induit des ondes gravitationnelles (ce qui fait que le petit trou noir se rapproche inexorablement de l'horizon, parce qu'il perd de l'énergie) dans lesquelles sont encodées des informations très précises sur la géométrie de l'espace-temps. C'est donc un moyen extrêmement puissant pour arpenter la géométrie de l'espace-temps très près de l'horizon, et vérifier si les prédictions de la relativité générale y sont confirmées, ou pas. On attend plusieurs événements par an de ce type.

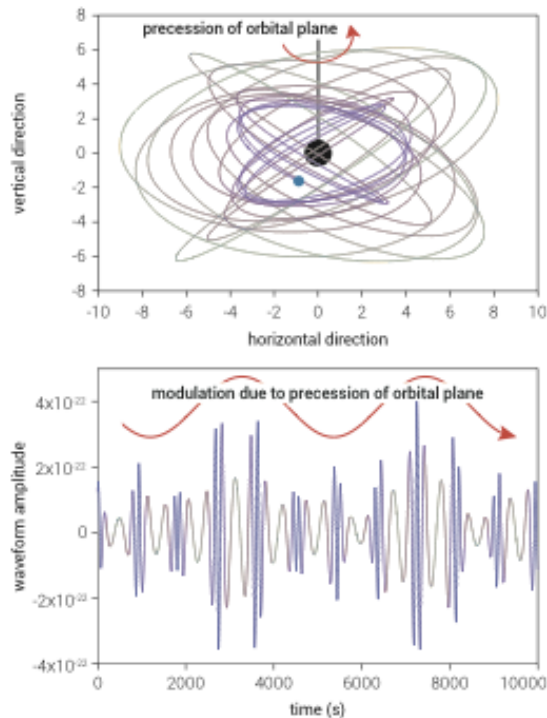


Figure 10 : Événement de type EMRI : en haut, trajectoire du trous noir stellaire autour de l'horizon du trou noir galactique ; en bas, forme de l'onde gravitationnelle.

- **Fonds cosmologiques**

La recherche de fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles est un autre aspect de la physique de LISA qui, de façon peut-être inattendue, a des retombées importantes en physique des particules.

On peut voir un fond d'ondes gravitationnelles comme un ensemble de gravitons. Or on montre facilement qu'à cause de l'expansion de l'Univers, un graviton produit après l'ère de Planck n'est jamais en équilibre thermique avec l'Univers. Ceci veut dire que tout fond d'ondes gravitationnelles produit après l'ère de Planck est une radiation fossile qui découple de l'évolution thermique de l'Univers : le seul effet notable sera le décalage spectral de la fréquence dû à l'expansion de l'Univers.

Il se trouve que le domaine de fréquence de LISA correspond à des fonds d'ondes gravitationnelles produites quand l'énergie thermique dans l'Univers était comprise entre 100 GeV et 10000 TeV. Une région d'un grand intérêt en physique des particules !

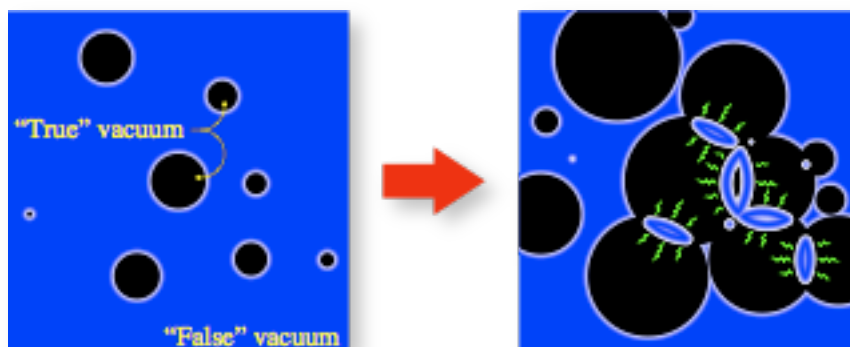


Figure 11 : déroulement d'une transition de phase du premier ordre (cf. transition eau-vapeur)

Ainsi, si une transition de phase assez violente (c'est-à-dire du premier ordre, Figure 11) se produit dans cette plage d'énergie, LISA devrait détecter un fond correspondant. Dans le cadre du Modèle Standard, la transition de phase électrofaible est douce (du second ordre), mais elle est souvent du premier ordre dans le cadre d'extensions du Modèle Standard (supersymétrie, dimensions supplémentaires, etc.). Par ailleurs, la fenêtre de LISA permet d'explorer d'autres transitions de phase liées à d'autres symétries brisées jusqu'à des énergies de plusieurs milliers de TeV. Il est donc envisageable que les premiers signaux de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard viennent de l'analyse des fonds stochastiques par LISA. Tout au moins, des informations précieuses complémentaires des collisionneurs à haute énergie devraient être recueillies.

Pour finir cette section, voici une figure qui résume les principales sources dans la configuration identifiée dans la réponse à l'appel à mission (voir section suivante):

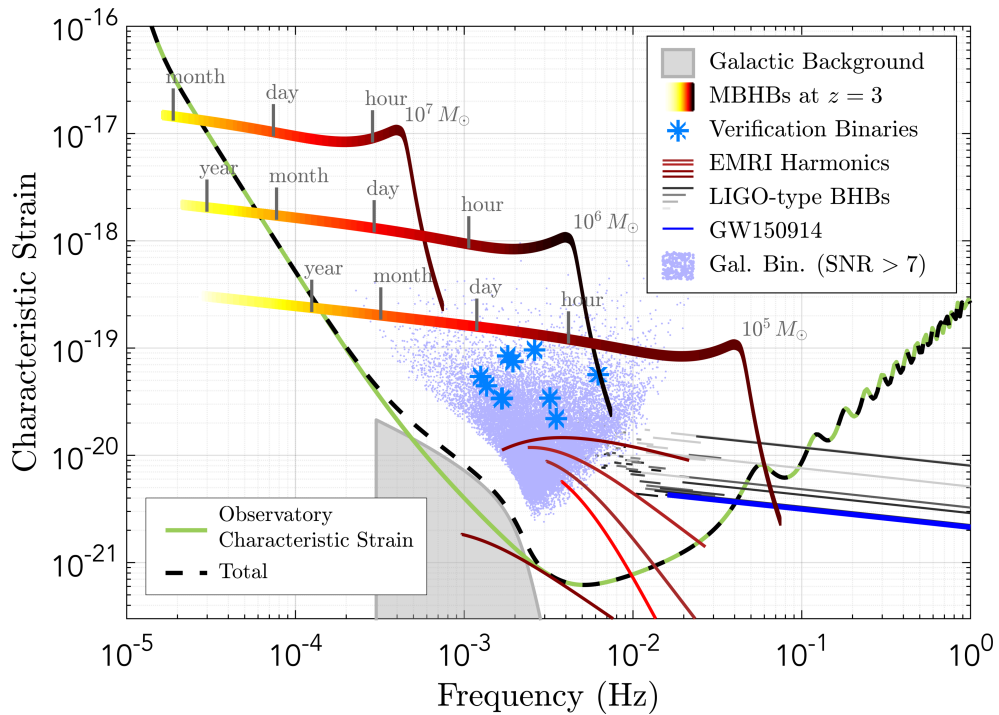


Figure 12 : illustration des différentes sources attendues pour la mission LISA et de la façon dont elles parcourent au cours du temps la région de détectabilité (en fréquence).

et un tableau issu du même document résumant les objectifs scientifiques identifiés pour la mission :

#### Science objectives identified for the mission

- SO1: Study the formation and evolution of compact binary stars in the Milky Way Galaxy
- SO2: Trace the origin, growth and merger history of massive black holes across cosmic age
- SO3: Study the structure and dynamics of dense stellar systems around galactic nuclei
- SO4: Understand the formation of stellar mass black holes and characterise the mass properties
- SO5: Explore the potential Intermediate Mass Black Hole Binaries to illuminate the dynamical formation pathways in dense star clusters
- SO6: Explore the nature of gravity and the fundamental nature of astrophysical black holes
- SO7: Probe the rate of expansion of the universe
- SO8: Understand the stochastic gravitational wave background of cosmological origin to possibly unveil the early universe and discover new physics
- SO9: Search for gravitational wave bursts and unforeseen sources

*Table 1 : Objectifs scientifiques de la mission LISA identifiés dans la réponse à l'appel à mission*

### **La réponse à l'appel à mission LISA**

Le consortium européen LISA a répondu à l'appel d'offres lancé en octobre et clos le 16 janvier.

La mission proposée est une mission à 3 bras (six liens laser). La longueur de chaque bras est de 2,5 millions de km. La durée nominale de la mission est de 4 ans, mais avec la possibilité de l'étendre à 10 ans. La courbe de bruit est celle obtenue par LISAPathfinder, puisqu'elle satisfait déjà largement les spécifications.

La puissance de sortie des lasers est de 2W. La taille des télescopes qui servent à la fois à focaliser le faisceau laser émis et à focaliser la lumière reçue du satellite voisin (200 pW) est de 30 cm. Etant donnée la puissance des lasers, on ne peut réfléchir les faisceaux sur les masses test (on n'obtiendrait que quelques photons en retour) : on réémet un faisceau de 2W, verrouillé en phase sur le faisceau reçu.

L'orbite de la constellation suit celle de la Terre avec un angle de 18°. Dans son mouvement, la constellation ne garde pas exactement la même distance entre les satellites. Elle « respire », mais sur des durées de temps beaucoup plus grandes que 10000 secondes, ce qui n'affecte pas les mesures dans la bande de fréquence  $[10^{-4}, 10^{-1}]$  Hz. Les deux télescopes présents dans chaque satellite doivent donc pouvoir bouger de façon indépendante.

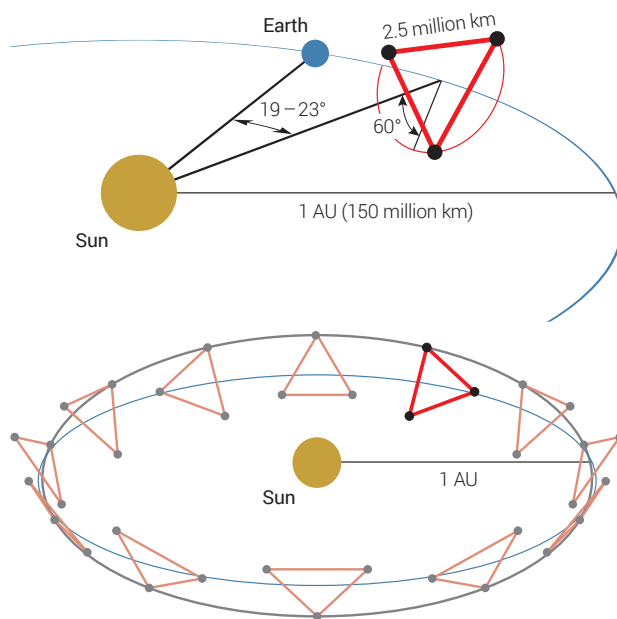


Figure 13: orbite de la constellation LISA

Le consortium européen compte aujourd'hui 12 pays (voir Figure 14). Le but étant de rester le plus proche possible de la mission LISAPathfinder, chaque pays participant à LISAPathfinder est en charge des mêmes réalisations. La répartition est donc très similaire de celle identifiée pour la compétition L1 (voir plus haut) et la France reste en charge du Centre de Traitement des Données (Data Processing Centre, DPC) et de l'intégration de l'instrument délivré par le consortium européen (voir prochaine section).

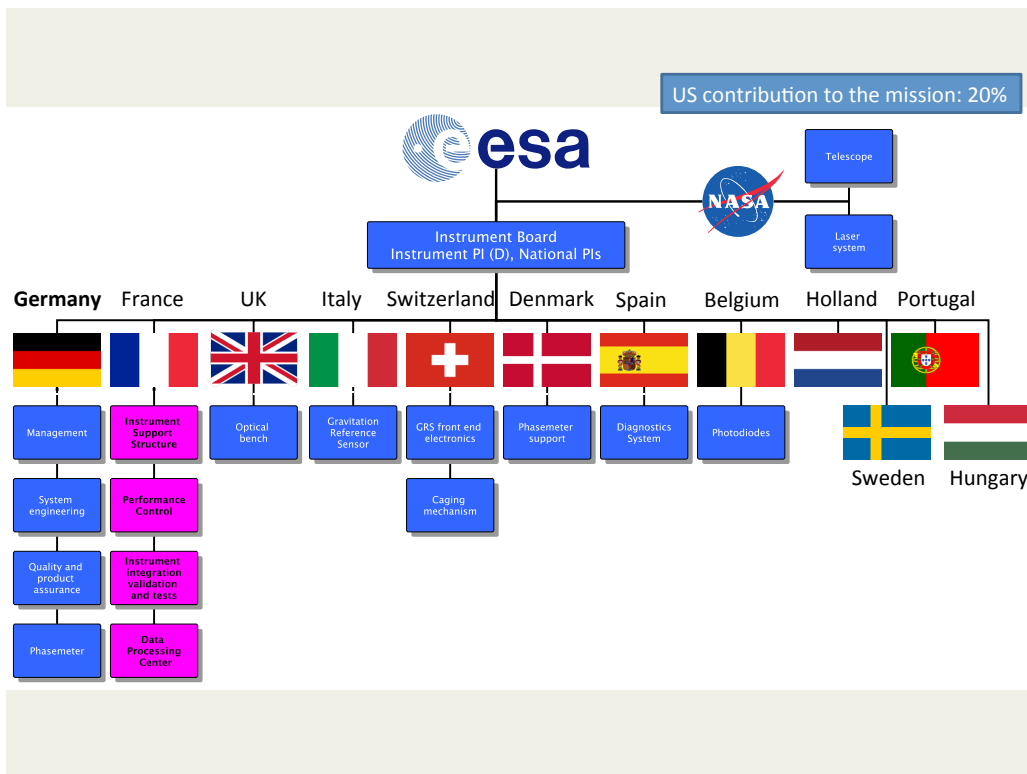
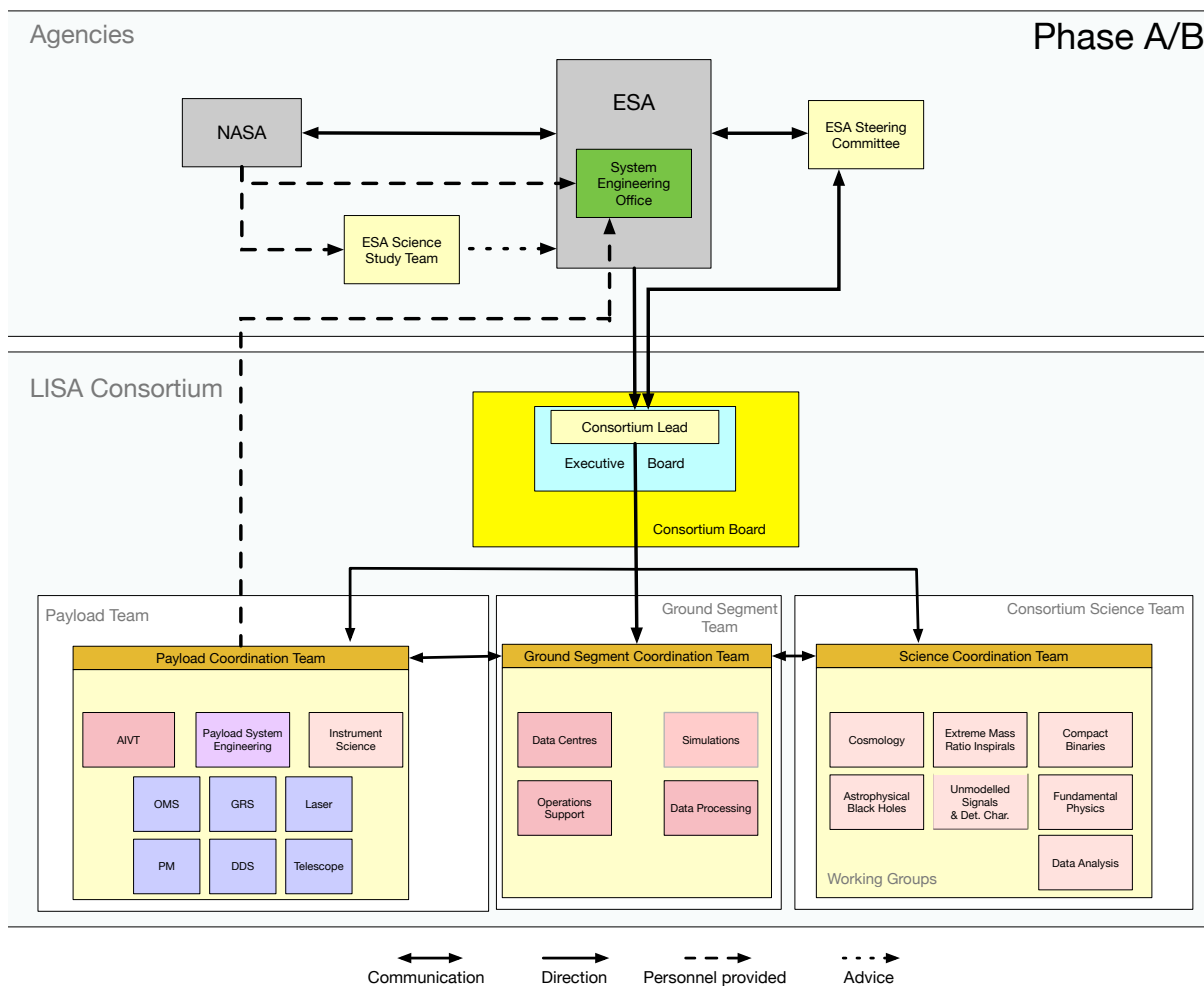


Figure 14 : le consortium européen qui a répondu à l'appel à mission L3.

Les Américains assurent 20% du budget de la mission, ce qui correspond à la limite fixée par l'ESA pour un partenaire international. Ils devraient fournir en particulier les lasers et les télescopes.

Le consortium est organisé de la façon suivante :



Un bureau exécutif (executive board) gère avec le P.I. Karsten Danzmann (D) le fonctionnement du consortium et rapporte au Consortium Board. Il est constitué de 5 co-P.I.:

- Stefano Vitale (I) en charge de l'héritage de LISAPathfinder
- Pierre Binétruy (F) en charge de la Science
- Harry Ward (UK) en charge de la métrologie optique
- David Shoemaker (US) pour assurer la liaison avec la communauté américaine
- Domenico Giardini (CH) pour assurer la liaison avec les autres pays européens

### La contribution française

Comme indiqué plus haut, la contribution française n'a pas varié depuis la proposition L1. Il s'agit de :

- La fourniture du Data Processing Centre (DPC) de la mission

Une phase 0 a été conduite par le CNES en 2013-2014 pour identifier les contours et le coût de la contribution française.

Dans le schéma proposé par l'ESA, le Science Operations Centre (sous responsabilité ESA) transforme les données brutes en données de niveau L1 qu'il fournit au DPC (sous responsabilité du consortium). Le DPC transforme les données en données de niveau L2 et L3 (par exemple, catalogue et caractérisation des sources) avant de les confier de nouveau à l'ESA pour archivage et mise à disposition à la communauté.

Il est à noter que, parce que la constellation LISA est très loin de la Terre, la quantité de données transmises est faible (ceci donne environ 500 Mo par jour au niveau L1). En revanche, parce que les rapports S/B sont très grands, la difficulté de l'analyse est de distinguer les signaux les uns des autres : on procède par soustraction des signaux de plus grande amplitude. Pour ce faire, on doit retraiter les données toutes les semaines (la plupart des signaux sont dans la bande de LISA plusieurs semaines voire plusieurs mois). On a donc un besoin important de CPU.

Selon le schéma présenté dans la réponse à l'appel à mission, il y a un seul DPC (sous responsabilité française) mais il s'appuie sur les ressources de Data Computing Centres (DCC) nationaux (ou américain).

La phase 0 CNES s'est conclue par la constatation que la responsabilité du DPC était tout à fait dans les capacités techniques et financières de la France. Elle recommandait de ne prendre aucune décision sur le type d'infrastructure choisie mais encourageait à démarrer un proto-DPC dès 2014 au Centre François Arago à l'APC (proto-centre qui est maintenant en opération et a été fort utile à la communauté internationale lors de la réponse à l'appel à mission). Une récente réévaluation (à la baisse) des coûts présentée lors d'une revue CNES en décembre dernier indiquait une somme de 23,5 M€ en coût CNES, et une somme de 12M€ en coûts CNRS<sup>1</sup>.

- L'intégration de l'instrument fourni par le consortium européen.

Une phase 0 devrait être conduite par le CNES début 2017 pour voir les options possibles, et identifier les coûts. Comme dans le cas de la proposition L1, la France n'a pas la responsabilité de toute l'intégration (puisque ni laser ni télescope ne font partie de la contribution du consortium européen) : la France a la responsabilité de l'intégration du senseur inertielle (GRS) et du banc optique sur une structure commune (voir Figure 6) et des tests de performance de la charge utile avec le phasemètre.

A ce titre, le CNES souhaite que la France joue un rôle important dans l'ingénierie système de la charge utile, et dans le contrôle de performances.

Une première évaluation des coûts, à raffiner, donne 27,8 M€ en coût CNES et 17,8 M€ en coût CNRS<sup>1</sup>.

### **La communauté française derrière LISA**

Depuis 2005 s'est formé le consortium LISA-France (financé par le CNES) des laboratoires français impliqués dans la mission LISA. On compte à ce jour :

- l'APC qui coordonne les activités,
- le laboratoire ARTEMIS de l'Observatoire de la Côte d'Azur,
- l'IAP, Paris,

---

<sup>1</sup> Les coûts CNES incluent les salaires des ingénieurs CNES et le financement des laboratoires par le CNES, les coûts CNRS n'incluent que les salaires, sur la période 2017-2041.



- l'Institut de Physique Théorique, Saclay,
- le LPCEE, Orléans,
- l'ONERA.

Le LAPP en a fait partie pendant plusieurs années (une réunion LISA-France y a même été organisée). Le LMA vient de rejoindre le consortium : il travaille avec APC et ARTEMIS (ainsi que la NASA) sur les questions de lumière diffusée.

D'autres laboratoires ont récemment indiqué leur intérêt à rejoindre ce groupe : à l'IN2P3 ce sont le LAL, le CPPM et le LUPM ; à l'INSU, le LAM à Marseille. Une réunion devrait être organisée courant février pour voir comment les laboratoires de l'IN2P3 pourraient participer à la contribution française. Ceci permettrait de renforcer le leadership de l'IN2P3 sur la participation française à cette mission majeure de l'ESA.

### **Les prochaines étapes**

Les prochaines étapes envisagées par l'ESA sont les suivantes :

- En mars, lettre d'endossement du CNES, indiquant l'ordre de grandeur de la contribution française.
- Janvier-Avril : étude par l'ESA de la réponse à l'appel à mission
- Mai-Juin : étude technique de la mission proposée, lors d'une série de sessions de travail à la *Concurrent Design Facility* de l'ESTEC (centre technique de l'ESA en Hollande)
- Été 2017 : préparation des contrats pour la phase A industrielle
- Automne 2017-Automne 2019 : phase A industrielle compétitive

L'ESA est plus floue sur la suite du calendrier. Elle dépendra en partie du fait de savoir si la communauté, les industriels et l'ESA sont capables de suivre le calendrier agressif décrit ci-dessus.

L'adoption de la mission suivra la fin de phase A dans un délai de un à trois ans. A partir de ce moment-là, la mission sera figée, car elle sera pilotée par l'industriel en charge du satellite. La contribution de chaque Etat membre sera alors très précisément définie.

C'est donc très rapidement que les laboratoires qui veulent rejoindre la mission LISA pour faire une contribution technique doivent intégrer le consortium européen. Ceci est aujourd'hui relativement aisé, mais au cours des mois deviendra plus complexe. Les années 2017-2019 seront des années où CNES et CNRS devront étudier en détail la contribution française pour s'engager sur les moyens humains et financiers sur le long terme.