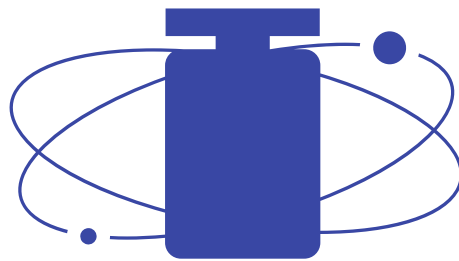


# AS GRAM 2010-2014

Bilan et Prospective

---



# GRAM

**G**RAVITATION **R**ÉFÉRENCES  
**A**STRONOMIE **M**ÉTROLOGIE

Document préparé par G. Metris, P. Wolf et P. Tuckey

avec les contributions de A. Amy-Klein, J.E. Arlot, R. Biancale, P. Charlot, I. Cognard, C. Courde, F. Deleflie, P. Delva, P. Exertier, A. Fienga, H. Halloin, D. Hestroffer, V. Lainey, J. Laskar, F. Mignard, F. Pereira, G. Perrin, M. Rodrigues.

31/08/2015

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Présentation de l'AS GRAM .....</b>	<b>4</b>
1.1	Axes de recherche et grandes questions .....	6
1.1.1	<i>L'hypothèse d'équivalence d'Einstein est-elle un principe exact de la physique ?.....</i>	6
1.1.2	<i>La relativité générale est-elle la bonne théorie métrique de la gravitation ?.....</i>	6
1.1.3	<i>Repousser les limites des systèmes de référence spatio-temporels.....</i>	7
1.1.4	<i>Les lois de la gravitation sont-elles vérifiées en champ fort ?.....</i>	7
1.1.5	<i>Que verra-t-on en ouvrant la nouvelle fenêtre sur l'Univers que sera l'observation directe des ondes gravitationnelles ?.....</i>	8
1.2	Moyens et projets.....	8
1.3	GRAM et les Services Nationaux d'Observation.....	9
1.4	Interaction avec d'autres structures.....	9
<b>2</b>	<b>Bilan et perspectives scientifiques .....</b>	<b>11</b>
2.1	Evénements marquants.....	11
2.2	Mesures fondamentales et leur amélioration.....	12
2.3	Applications .....	14
2.4	Evolutions thématiques.....	15
<b>3</b>	<b>Moyens sol et espace .....</b>	<b>17</b>
3.1	Description des moyens spatiaux.....	19
3.1.1	<i>T2L2.....</i>	19
3.1.2	<i>Gaia.....</i>	19
3.1.3	<i>GNSS.....</i>	20
3.1.4	<i>Lisa Pathfinder et eLISA.....</i>	21
3.1.5	<i>MICROSCOPE.....</i>	22
3.1.6	<i>ACES.....</i>	23
3.1.7	<i>JUICE et Bepi-Colombo.....</i>	23
3.1.8	<i>STE-QUEST.....</i>	24
3.1.9	<i>GRASP.....</i>	25
3.2	Description des moyens sol .....	26
3.2.1	<i>Virgo et Advanced Virgo.....</i>	26
3.2.2	<i>Radiotelescope de Nancay.....</i>	27
3.2.3	<i>LLR/SLR.....</i>	27
3.2.4	<i>Réseau Temps et Fréquence.....</i>	28
3.2.5	<i>Moyens optiques sol.....</i>	29
3.2.6	<i>REFIMEVE+.....</i>	29
3.2.7	<i>VLBI/VGOS.....</i>	30
3.2.8	<i>MIGA : Antenne gravitationnelle basée sur l'interférométrie atomique.....</i>	31
3.2.9	<i>Gravity.....</i>	32
3.2.10	<i>SKA.....</i>	32
3.3	Description des moyens intégrés, observations et exploitation de données.....	33
3.3.1	<i>INPOP.....</i>	33
3.3.2	<i>NAROO (New Astrometric Reduction of Old Observations).....</i>	33
3.3.3	<i>PODET.....</i>	34

3.3.4	<i>Services internationaux IVS, ILRS, IERS, BGI</i> .....	35
<b>4</b>	<b>GRAM en chiffres et en actions</b> .....	<b>37</b>
4.1	Structure et organisation.....	37
4.2	Communauté liée aux thématiques de GRAM .....	40
4.3	Budget.....	41
4.4	Actions soutenues .....	42
4.5	Rencontres scientifiques .....	45
<b>5</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>46</b>

## 1 Présentation de l'AS GRAM

L'Action Spécifique GRAM (Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie) a été créée en 2010 par l'INSU avec le soutien du CNES et de l'INP. Elle a vocation à coordonner et à développer des actions concernant la physique fondamentale dont en particulier la gravitation, la métrologie de l'espace temps et les systèmes de référence, la mécanique céleste et spatiale.

Ces trois grands domaines intéressent une communauté large transverse à l'INSU, l'INP et le CNES mais aussi à l'IN2P3, l'INSIS, le CEA, l'ONERA. Ces domaines ont de forts liens entre eux et forment un ensemble d'activités scientifiques qui n'est représenté ni coordonné par aucune autre structure liée au CNRS.

Le Tableau 1 ci-dessous résume les thématiques concernées à l'intérieur des trois grands domaines ainsi que les projets et les laboratoires impliqués.

Ce document présente un bilan 2010-2014 et une prospective synthétiques du GRAM. Des informations plus complètes sur la vie de l'AS GRAM peuvent être trouvées sur son site web :

<http://gram.oca.eu/>

Le document fondateur ayant servi de référence pour la création de l'AS GRAM est disponible ici :

[http://gram.oca.eu/Ressources\\_doc/doc GRAM/20101208\\_doc\\_fondateur.pdf](http://gram.oca.eu/Ressources_doc/doc_GRAM/20101208_doc_fondateur.pdf)

Domaine	Thématiques fédératrices	Projets	Laboratoires
Gravitation Physique Fondamentale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tests des lois fondamentales de la physique (relativité, lois de gravitation)</li> <li>- Développements technologiques au sol et pour instrumentation embarquée</li> <li>- Théories des interactions fondamentales</li> </ul>	T2L2, PHARAO/ACES, MICROSCOPE, LISA PF, eLISA, STE-QUEST, VIRGO, ICE, Tests en laboratoire, FORCA-G, LLR/SLR, VLBI, Gaia, Nancay/Radio, MIGA, GRAVITY, INPOP, REFIMEVE+, JUICE, Bepi-Columbo	APC, LKB, LP2N, Géoazur, LAGRANGE, ARTEMIS, SYRTE, IMCCE, LUTH, USN, LPT-ENS, DMPH, DOTA, LCAR, LPC2E, LPL, IPhT, LNCMI, IAP, LAL, IRAP, LESIA, CPhT
Métrologie de l'espace-temps/fréquence et Systèmes de référence	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construction &amp; raccordement des systèmes de références</li> <li>- Astrométrie</li> <li>- Géodésie spatiale</li> <li>- Échelles de temps</li> <li>- Rotation de la Terre</li> <li>- Géopotential</li> <li>- Contrainte des modèles d'étude des environnements planétaires</li> </ul>	Gaia, LQAC, LLR/SLR, VLBI, DORIS, GNSS, GEOSTAR, Nancay/Radio, IERS, satellites géodésiques, GRASP, REFIMEVE+, NAROO, T2L2, INPOP	LAB, SYRTE, IMCCE, Géoazur, LAGRANGE, USN, DTP, LAREG, DMPH, PIIM, UTINAM, IPG
Mécanique céleste (trajectoires des corps naturels) et mécanique spatiale (trajectoires des corps artificiels autour des planètes et dans le système solaire)	Principe fondamental de la dynamique, et dynamique orbitale	INPOP, NOE, PODET, Gaia, JUICE, Bepi-Columbo	IMCCE, Géoazur, LAGRANGE, SYRTE, GET

Tableau 1. Equipes et projets liés aux principales thématiques de GRAM

## 1.1 Axes de recherche et grandes questions

La compréhension du cadre spatio-temporel dans lequel nous vivons est depuis longtemps l'une des préoccupations fondamentales des physiciens autour de laquelle se retrouvent, à côté de la communauté de physique fondamentale, les communautés voisines qui interviennent dans le domaine des sciences de l'Univers et dans celui de l'observation de la Terre. Les progrès dans ce domaine constituent aujourd'hui un enjeu majeur de la physique fondamentale, puisqu'ils fournissent un des moyens d'accès à la « nouvelle physique » qui résulterait de l'unification des lois de la physique, en particulier entre ces deux grands piliers que sont la relativité générale d'un côté, la théorie quantique des champs de l'autre. Les grandes questions qui se posent dans le cadre du GRAM sont donc centrées sur la recherche de signatures de cette nouvelle physique dans la métrologie de l'espace-temps (y compris des champs gravitationnels) en passant par la définition et la réalisation des systèmes de références spatio-temporelles.

### 1.1.1 L'hypothèse d'équivalence d'Einstein est-elle un principe exact de la physique ?

Le principe d'équivalence d'Einstein est la fondation de toute théorie métrique de la gravitation, y compris la relativité générale. Il implique que tous les corps se meuvent dans un champ gravitationnel de la même façon indépendamment de leur composition, que le temps s'écoule de la même façon indépendamment du type d'horloge utilisé, mais en fonction du champ gravitationnel et du mouvement de l'horloge. Plus généralement, il implique que toute expérience locale est indépendante de sa position spatio-temporelle, de son orientation et de son mouvement (inertiel). C'est ce principe qui permet de décrire la gravitation de manière géométrique comme une courbure de l'espace-temps, couplé d'une manière universelle à toute masse-énergie. Cela est radicalement différent des trois autres interactions connues du modèle standard qui sont représentées par des champs sur cet espace-temps. La grande majorité des modèles qui cherchent à unifier la gravitation avec les autres interactions prévoient donc une violation du principe d'équivalence à un niveau a priori inconnu. Est-ce que ce principe dans ces différents aspects (mouvement des corps, évolution des horloges) résiste aux mesures de plus en plus exactes permises par les avancées technologiques ? Est-ce qu'il résiste aux mesures faites dans de nouveaux domaines spatio-temporels et gravitationnels (expériences spatiales) et dans de nouveaux régimes physiques (ondes de matière quantiques) ? Est-ce qu'il est vérifié, et à quel niveau, à l'interface entre la gravitation et la mécanique quantique ? Ces questions sont au cœur de notre compréhension du cadre spatio-temporel dans lequel nous vivons, et leurs réponses ont des répercussions sur l'ensemble de la physique, du plus petit (physique des particules) au plus grand (cosmologie).

### 1.1.2 La relativité générale est-elle la bonne théorie métrique de la gravitation ?

En supposant que le principe d'équivalence soit vérifié (au moins au niveau de la sensibilité des mesures actuelles) on peut en déduire que la théorie de la gravitation est nécessairement une théorie métrique, c'est-à-dire se traduit par une courbure de l'espace-temps. Par contre, de nombreuses théories métriques de la gravitation existent (Brans-Dicke, Parametrised-Post-Newtonian (PPN), variantes de MOND, etc...) avec la possibilité que certaines soient favorisées par des considérations théoriques comme certains scénarios issues des théories des cordes, ou des observations galactiques ou cosmologiques. Par conséquent il est nécessaire de mesurer les effets qui permettent de différencier entre ces théories comme la déflexion de la lumière, les modifications des orbites planétaires, les effets post-newtoniens dans les relevés astrométriques, les données de navigation des sondes planétaires, le VLBI, etc..., en essayant de couvrir une variété de types de mesures et d'environnements (eg. système Terre-Lune, système solaire, systèmes planétaires) aussi large que possible. Généralement une éventuelle déviation métrique par rapport à la relativité générale est quantifiée par les paramètres PPN, en premier lieu les

paramètres d'Eddington  $\beta$  et  $\gamma$ . Mais l'espace des théories possibles n'est couvert que très partiellement par ces deux seuls paramètres, avec de nombreuses théories qui n'entrent pas dans ce cadre. Il est donc essentiel d'élargir le domaine de recherche d'une possible déviation au-delà du cadre PPN tout en y rajoutant les nouvelles données de plus en plus précises émanant du laser-lune, du VLBI, de Gaia, des observations planétaires (INPOP) pour ne citer que quelques exemples.

### 1.1.3 Repousser les limites des systèmes de référence spatio-temporels.

La réduction des observations et mesures physiques nécessite la définition et la réalisation des systèmes de références spatio-temporels. Pour les systèmes modernes, les technologies utilisées sont les horloges atomiques et leur comparaison à distance, les mesures astrométriques (spatiales et terrestres) de haute résolution, la mécanique céleste et spatiale. Les systèmes de référence résultants sont par la suite utilisés dans de nombreuses applications comme la physique fondamentale, la géodésie et la géophysique, l'étude du système solaire, la surveillance spatiale (débris, géocroiseurs), la climatologie, etc.

Un exemple parmi d'autres est le développement des éphémérides planétaires françaises INPOP qui ont permis d'obtenir des contraintes parmi les meilleures au monde sur les paramètres PPN ( $\beta$  et  $\gamma$ ) qui caractérisent une possible déviation métrique par rapport à la relativité générale. Un autre exemple est l'étude de l'environnement spatial de la Terre. Les corps naturels et artificiels (satellites, débris, météorites, astéroïdes, comètes, ...) orbitant dans le voisinage de la Terre présentent des risques de collision et d'impact qu'il faut analyser et prévoir. Cela nécessite des actions dédiées sur les mesures astrométriques accompagnant les découvertes, des actions spécifiques de modélisation dynamique (forces gravitationnelles ou non), d'ajustement et propagation d'erreurs et éphémérides à court et moyen terme, etc. Des calculs intensifs et des développements de haute précision pour les orbites sont requis, en liaison avec les aspects de physique fondamentale et d'astrométrie de haute précision.

La question de l'amélioration et du maintien des systèmes de références et de la métrologie qui en est la base (horloges, liens radio et optiques, mesures astrométriques) est une préoccupation permanente et reste au cœur de l'activité du GRAM.

### 1.1.4 Les lois de la gravitation sont-elles vérifiées en champ fort ?

Les effets les plus intrigants de la relativité générale, et de nombreuses théories alternatives, se produisent dans le régime où le champ gravitationnel devient fort, c'est-à-dire où  $GM/(rc^2)$  devient proche de 1. Ce paramètre n'excède pas  $10^{-5}$  dans le système solaire, même à la surface du soleil, mais s'approche de 1 au voisinage d'objets plus compacts comme les étoiles à neutrons et évidemment dans le voisinage des trous noirs. Est-ce que la relativité générale tient bon dans des champs gravitationnels aussi extrêmes ? Est-ce que les trous noirs sont aussi « purs » que prédits par la relativité générale, c'est-à-dire caractérisés par seulement trois paramètres : masse, charge, spin ? Quels sont les meilleurs moyens pour sonder ces champs et la théorie qui les régit ? Des réponses à ces questions semblaient hors d'atteinte il y a encore quelques années, mais deviennent possibles avec le chronométrage des pulsars, les observations optiques, rayons-X, et radio proches du trou noir au centre de notre Galaxie, et bien sûr l'observation des ondes gravitationnelles attendue dans le futur proche.

### 1.1.5 Que verra-t-on en ouvrant la nouvelle fenêtre sur l'Univers que sera l'observation directe des ondes gravitationnelles ?

L'élargissement du spectre électromagnétique observable a permis des nombreuses découvertes et a bouleversé notre compréhension de l'Univers et de la physique. De même on s'attend à ce que l'observation directe des ondes gravitationnelles prédites par la relativité générale nous permette de sonder bien plus profondément de nombreux aspects de notre Univers et des lois qui le régissent, et cela à tous les niveaux, de la galaxie jusqu'au premiers instants après le big bang. La détection des ondes gravitationnelles par les observatoires terrestres (VIRGO, LIGO), ainsi que dans un plus long terme par l'observatoire spatial eLISA, nous renseignera sur les processus les plus violents comme la coalescence de trous noirs ainsi que sur des signaux issus de l'Univers primordial comme le fond stochastique d'ondes gravitationnelles, à l'image de ce qu'a apporté le fond cosmologique micro-onde. eLISA permettra également de tester la Relativité Générale en champs forts avec une précision inégalée.

L'ensemble de ces observations, à la fois terrestres et spatiales, ouvrira une nouvelle fenêtre sur la physique de l'Univers à très haute énergie et apportera, par exemple, de nouveaux éclaircissements sur le modèle  $\Lambda$ -CDM de la cosmologie, et sur les énigmes de l'énergie et de la matière sombres inhérents à ce modèle.

## 1.2 Moyens et projets

Les moyens utilisés dans les domaines du GRAM sont d'un spectre très large aussi bien au sol que dans l'espace. Cela est la conséquence des techniques très variées qui contribuent aux mesures fondamentales (horloges et interféromètres atomiques, liens et interféromètres optiques, astrométrie, VLBI, radio-astronomie...). Par ailleurs, ces moyens de mesure et d'observation sont souvent accompagnés de traitements et analyse de données lourds (éphémérides, catalogues ICRF, Gaia, ...) qui nécessitent des moyens de calcul importants, ainsi qu'une structuration au sein de services scientifiques.

Les moyens sol et espace et les projets les plus significatifs mis en œuvre pour répondre aux questions décrites ci-dessus, sont détaillés dans le chapitre 0. Nous voulons ici seulement souligner des caractéristiques importantes, assez souvent partagées par ces moyens :

- Le segment spatial joue dans nos thématiques un rôle prépondérant ; cela est bien entendu le cas pour d'autres programmes nationaux mais c'est pour nous très souvent une nécessité de principe, au delà d'une simple augmentation des performances d'observation. Nombre de nos thématiques sont nées ou ont pris un essor très important dès les premières années de l'ère spatiale, comme par exemple la plupart des techniques utilisées pour les systèmes de référence spatiaux (télémétrie laser, GNSS, Doris), des tests de gravitation dans l'espace (avec Gravity Probe A, avec la dynamique de la Lune, avec la dynamique des satellites LAGEOS...).
- La notion de réseaux terrestres (au niveau national au minimum, mais au niveau mondial le plus souvent) est fortement présente ; ceci est souvent en liaison avec des moyens spatiaux (réseaux laser, GPS, Doris, VLBI) mais pas exclusivement (nous avons par exemple un réseau mondial d'horloges atomiques ou encore un réseau en émergence de comparaison de temps/fréquence par liens fibrés au niveau national et Européen). Cette notion de réseau est une nécessité qui peut induire des difficultés, comme par exemple un déficit de visibilité individuelle, qui peut rendre le financement plus compliqué.
- La pérennité est aussi une caractéristique indispensable quand il s'agit de systèmes de référence d'espace et de temps, d'observations de spécificités dynamiques ou d'évolution



des fréquences d'horloges très ténues pouvant caractériser un aspect particulier de la gravitation.

- Enfin, beaucoup de ces moyens s'appuient très souvent sur plusieurs des thématiques de GRAM (ce qui avait été une forte motivation pour la création de cette structure).

### 1.3 GRAM et les Services Nationaux d'Observation

Les thématiques de GRAM sont très liées aux services d'observation et en particulier aux SO1. Beaucoup de ces services sont indispensables non seulement pour les objectifs scientifiques de GRAM, mais aussi comme support à d'autres moyens de l'astronomie bien au-delà de GRAM et même souvent à la société civile ; c'est évidemment le cas des systèmes de référence d'espace et de temps, ainsi que des éphémérides du système solaire. Cette notion de service est renforcée par les notions de réseau et de pérennité : dans beaucoup de cas une observation n'est utile que lorsque elle est ajoutée à beaucoup d'autres faites en d'autres points du globe et/ou à d'autres dates. En conséquence, les observations et produits sont mis en commun et ouvert à tous les utilisateurs ayant participé ou non à leur élaboration.

### 1.4 Interaction avec d'autres structures

Les liens les plus directs concernent les autres thématiques de l'astronomie et en particulier celles du PNCG, du PNHE et du PNP. Le point commun entre GRAM et le PNCG ainsi que le PNHE est essentiellement la gravitation. GRAM s'intéresse au développement et au test de théories étendues de la gravitation. Ces théories sont au cœur des modèles cosmologiques et les observables au niveau galactique et cosmologique sont aussi un moyen de mettre ces théories à l'épreuve dans des conditions très différentes. Par ailleurs la gravitation est une des interactions fondamentales étudiées au PNHE, en particulier à travers les observations des phénomènes en champ fort via les messagers à haute énergie et les ondes gravitationnelles. Les liens avec le PNP concernent la mécanique céleste : ce sont plus ou moins les mêmes outils appliqués dans des contextes différents qui permettent d'exploiter les données de navigation spatiale ou de construire les éphémérides du système solaire ou de calculer l'évolution et la stabilité d'un système planétaire à très long terme.

Il existe également des liens forts avec l'observation de la Terre (divisions Terre Solide et Océan-Atmosphère de l'INSU). Par exemple la modélisation du champ de gravité terrestre, même si elle n'est pas un objectif principal de GRAM mais plutôt du Groupe de Recherche en Géodésie Spatial (GRGS), est très proche de nos thématiques par les outils que cela met en jeu (mécanique orbitale, métrologie, systèmes de référence). Par ailleurs les mises en œuvre des systèmes de référence céleste (objectif explicite de GRAM) et terrestre (plutôt sciences de la Terre) sont fortement liées, utilisant souvent les mêmes techniques d'observation. Notons aussi que la référence verticale fournie par la télémétrie laser est essentielle pour les missions spatiales de surveillance du niveau de la mer.

Au-delà de l'INSU, il existe évidemment un lien très fort entre le GRAM et des laboratoires relevant de l'INP (co-tutelle du GRAM) notamment en ce qui concerne la physique quantique et atomique (eg. horloges atomiques) la physique fondamentale (eg. théories d'unification, violation du principe d'équivalence), de même qu'avec les communautés IN2P3 (ondes gravitationnelles, modèle standard), INSIS (technologies temps-fréquence, ondes gravitationnelles) et INSMI (systèmes dynamiques).

A l'extérieur du CNRS, des groupes faisant partie d'autres établissements sont associés à certains des objectifs de GRAM et sont d'ailleurs représentés dans le conseil scientifique. Cela concerne actuellement le CEA et l'ONERA.

Enfin, l'importance du secteur spatial dans nos recherches ayant été soulignée, cela s'accompagne d'un rôle majeur du CNES qui est une des tutelles de GRAM. Inversement, il existe, autant que nécessaire, des échanges informels avec le groupe thématique en physique fondamentale du CNES.

## 2 Bilan et perspectives scientifiques

Comme en témoigne la suite de cette section, ces dernières années ont été riches en faits marquants dans les thématiques de GRAM. Nous voudrions cependant souligner en préambule combien dans nos domaines, peut-être encore plus que dans les autres thématiques de l'astronomie, des résultats marquants ne sont souvent obtenus qu'au prix de longues années de mesures précises, nombreuses, régulières, variées, et d'efforts d'analyse peu spectaculaires par eux mêmes. Les résultats s'appuient également sur des services, en particulier sur les systèmes de référence de temps et d'espace, qui à ce titre figurent en tant que tels dans la liste explicite de nos moyens sols.

### 2.1 Événements marquants

Le satellite Gaia lancé avec succès le 19 décembre 2013 est en quelque sorte l'héritier de la mission astrométrique Hipparcos (1989-1993). Si les retombées de Gaia débordent très largement des thématiques de GRAM, celles-ci restent au cœur de la mission comme en atteste le fait que la loi de balayage du ciel a été optimisée pour la physique fondamentale. Les résultats attendus concernant GRAM sont en particulier l'établissement d'un système de référence spatial d'une qualité et d'une densité sans précédent, des mesures de position des petits corps du système solaire qui vont permettre de contribuer à la qualité de leurs éphémérides, ou bien encore l'utilisation de la courbure des rayons lumineux pour améliorer la contrainte sur le paramètre PPN  $\gamma$  et surtout sur son isotropie.

Le projet spatial MICROSCOPE mis en œuvre par le CNES, qui vise à répondre à une autre grande question concernant la validité du principe d'Equivalence, est arrivé à maturité au cours de ce quadriennal : le modèle de vol de la charge utile (constituée d'accéléromètres électrostatiques différentiels) a été livré, le satellite vient de passer avec succès la Revue Critique de Définition pour un lancement prévu en 2016.

L'expérience européenne ACES est également très avancée et sera embarquée en 2016/2017 à bord de la station spatiale internationale avec l'horloge française PHARAO utilisant des atomes de césium refroidis par laser. Outre la mise en œuvre d'une horloge avec une stabilité inégalée, cette expérience permettra entre autres de repousser les limites du test du décalage gravitationnel vers le rouge, et de comparer des signaux d'horloges au sol avec une exactitude améliorée par rapport aux systèmes existants dans les domaines micro-onde et optique (T2L2).

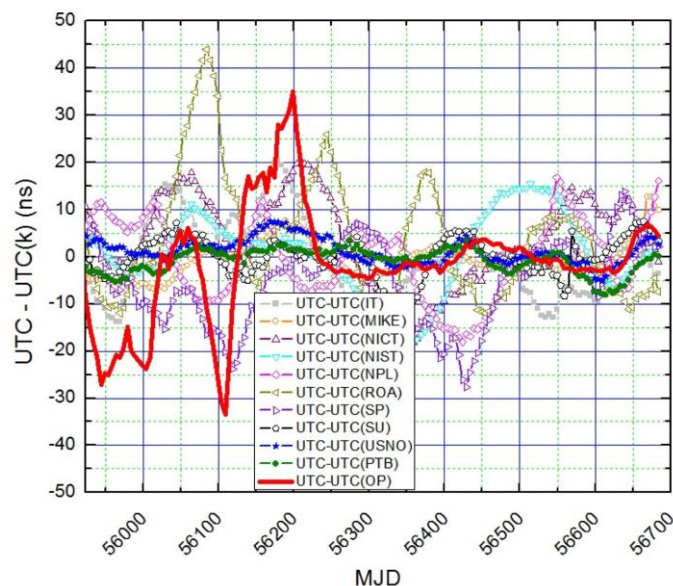
La France contribue de manière forte (elle développe notamment le modulateur laser et participe à l'analyse des données) à la mission LISA Pathfinder qui sera lancée en 2015 et est destinée à tester les technologies clés pour une mission très ambitieuse de détection des ondes gravitationnelles. Cette thématique vient en effet d'être approuvée par l'ESA pour sa 3<sup>ème</sup> mission large (L3) prévue pour le milieu des années 2030.

Le nouveau pulsar triple J0337+1715 (Ransom et al. Nature 505, 520, 2014), observé régulièrement à Nançay, devrait permettre de rapidement tester le Principe d'Equivalence Fort. En effet, les énergies de cohésion gravitationnelle ( $\sim GM/5Rc^2$ ) de ces astres sont bien supérieures à celles trouvées dans le système solaire (utilisé jusqu'à présent). La plupart des théories métriques de la Gravitation sauf la Relativité Générale prédisent des violations du Principe d'Equivalence Fort, que les mesures précises de temps d'arrivée testeront de façon unique.

## 2.2 Mesures fondamentales et leur amélioration

Les horloges atomiques ont connu un essor formidable ces dernières années, les horloges optiques ayant surpassé les horloges à césium qui réalisent la définition de la seconde actuelle. L'incertitude des horloges optiques atteint aujourd'hui la gamme des  $10^{-18}$  en exactitude et en stabilité de fréquence, ce qui conduira sans doute à une nouvelle définition de la seconde dans les années à venir. Les équipes françaises sont très compétitives, ayant réalisé les mesures les plus exactes de la fréquence SI d'une horloge optique et ayant obtenu le meilleur accord entre deux horloges optiques.

Le temps universel coordonné, UTC, est l'échelle de temps de référence mondiale. Il est calculé en différé par le Bureau International des Poids et Mesures à partir de données d'horloges de nombreux pays, et n'est donc pas disponible en temps réel pour dater des événements. Pour cette raison, l'Observatoire de Paris génère une approximation temps-réel à UTC, l'UTC(OP), qui constitue la référence opérationnelle pour la mesure du temps en France et permet de matérialiser l'heure légale. D'autres pays génèrent des échelles de temps analogues, appelées collectivement des « UTC(k) ». En octobre 2012 un nouveau système de réalisation d'UTC(OP) a été mis en service, qui tire partie de l'ensemble de fontaines atomiques du SYRTE pour piloter UTC(OP) très finement. Ce changement a conduit à une amélioration d'environ un ordre de grandeur de l'écart entre UTC(OP) et UTC, qui est passé de quelques dizaines de nanosecondes à quelques nanosecondes (voir Figure 1). Cette amélioration est utile pour les applications les plus avancées, telles que les systèmes européens de navigation par satellites, EGNOS et Galileo.



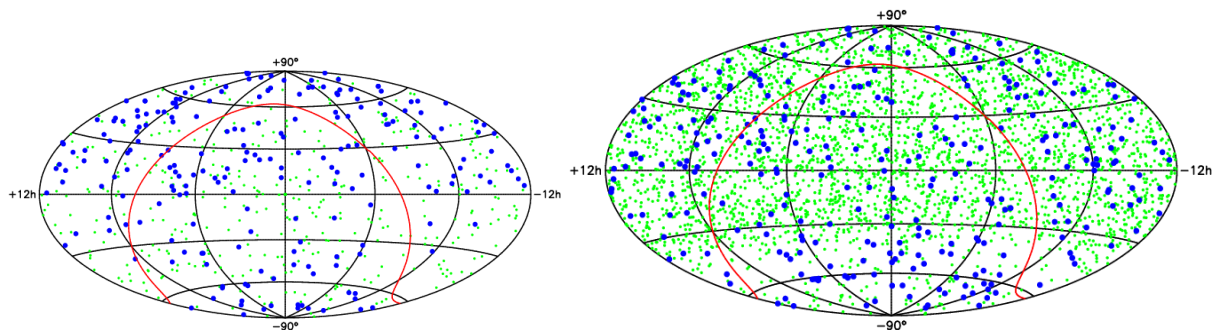
**Figure 1. Comparaison de différentes réalisations en temps réel UTC(k) à UTC (calculé en temps différé) depuis début 2012. L'amélioration de l'UTC(OP) (France, en rouge) à partir d'octobre 2012 est bien visible, et place UTC(OP) parmi les meilleurs mondiaux, à comparer par exemple à UTC(NIST, USA) ou UTC(PTB, Allemagne)**

Depuis une décennie, le Comité International des Poids et Mesures publie une liste de transitions atomiques recommandées en tant que représentations secondaires de la seconde. Il s'agit de transitions dont les fréquences ont été mesurées si précisément que leurs incertitudes sont proches de la limite imposée par les fontaines à atomes froids de césium, qui réalisent la définition actuelle de la seconde. La reconnaissance de ces représentations secondaires est un

premier pas vers une redéfinition de la seconde, qui pourrait être basée sur l'une ou plusieurs d'entre elles. Jusqu'à récemment l'utilisation de ces représentations secondaires a été limitée à des expériences de métrologie et de physique. Cela a changé en juillet 2013, quand les mesures issues d'une fontaine atomique du SYRTE mettant en œuvre la transition hyperfine de l'état fondamental du rubidium, ont été prises en compte pour la première fois dans le pilotage du temps universel coordonné (UTC). Ce succès est un aboutissement de plus de 15 ans de travaux sur la fontaine à rubidium et représente un changement de paradigme dans la réalisation de UTC.

T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser) est un système de transfert de temps basé sur la télémétrie laser sur satellite, développé par le laboratoire Géoazur et le CNES. Le segment spatial dédié est embarqué sur le satellite Jason-2, lancé en 2008. La caractérisation détaillée de T2L2 a permis de démontrer une incertitude de seulement 200 picosecondes pour la comparaison de temps entre deux horloges distantes. Ce résultat améliore d'un facteur de plus que 5 la performance atteinte par la méthode d'échange de signaux micro-ondes via des satellites de télécommunications (TWSTFT), la meilleure des méthodes utilisées actuellement pour les comparaisons d'horloges au niveau mondial pour la réalisation de l'UTC.

La nouvelle version, ICRF2, du repère international de référence céleste est entrée en vigueur le 1er janvier 2010 (remplaçant ICRF qui date de 1998). Elle représente une amélioration significative par rapport à la précédente version (cf. Figure 2), tout en conservant, par construction, la même direction des axes de référence ; elle contient plus de 3 000 sources au lieu de 600 ; sa précision (de l'ordre de 40 microsecondes de degré) est cinq fois meilleure que celle de l'ICRF qui avait lui-même des incertitudes environ 100 fois plus petites que celles du catalogue d'étoiles FK5, précédente référence officielle de l'UAI. D'importants efforts doivent encore être déployés afin d'améliorer et densifier des repères de référence de grande exactitude à d'autres longueurs d'onde et de les raccorder avec l'ICRF2.



**Figure 2. Les deux versions successives ICRF (gauche) et ICRF2 (droite) du repère international de référence céleste. Sur ces représentations de la sphère céleste, sont indiquées les positions des radiosources de « définition » (points bleus) et des autres sources (points verts). L'ICRF résultait de 1 600 000 observations par interférométrie à très longue base (VLBI) menées de 1979 à 1995, tandis que l'ICRF2 résulte de 6 000 000 d'observations de 1979 à 2009.**

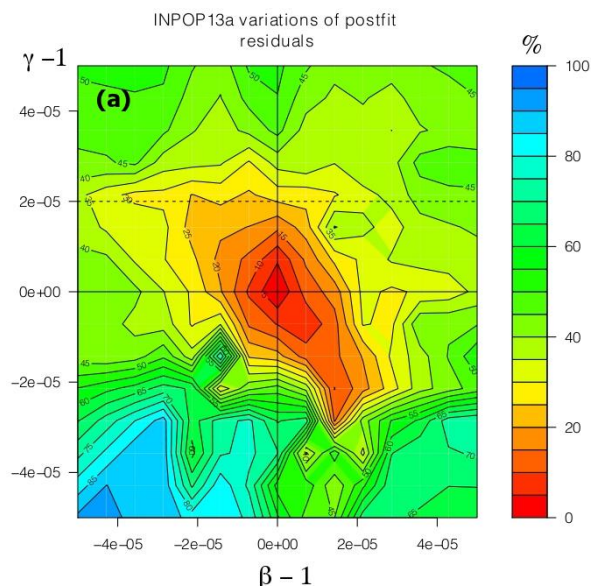
Le futur catalogue astrométrique Gaia va permettre de gagner un ordre de grandeur dans la réduction des observations sol ou spatiales. Ainsi, toutes les observations effectuées avant Gaia pourront être re-réduites, en particulier celles des corps du système solaire qui nécessitent des données sur des intervalles de temps longs. Dans les 4 années qui viennent de s'écouler, des séries d'observations anciennes des satellites naturels des planètes ont été re-réduites avec le catalogue UCAC2. En particulier, les observations au sol des satellites de Mars effectuées dans les années 1970 ont fourni des données dont la précision astrométrique est similaire à celle des observations de la sonde Mariner nous faisant gagner un ordre de grandeur en précision. Ces

progrès en astrométrie permettent de valider les modèles dynamiques qui décrivent l'évolution et la formation du système solaire.

### 2.3 Applications

Les éphémérides planétaires à long terme de l'IMCCE sont depuis plus de 20 ans la référence mondiale pour l'étude des paléoclimats de la Terre et de Mars. Elles ont permis d'établir en 2004 la première échelle de temps astronomique pour la calibration du Néogène, adoptée par l'ICS et l'IUGS. Depuis, le défi consistait dans l'extension de cette échelle de temps au Cénozoïque, soit sur 65 millions d'années, en dépit du mouvement chaotique des planètes. Mais la découverte du chaos fort engendré par les rencontres proches entre Ceres et Vesta a montré qu'il est illusoire d'obtenir une solution pour le mouvement de la Terre au-delà de 60 millions d'années, limite pratiquement atteinte par la dernière solution à long terme de 2010 s'appuyant sur INPOP. Par ailleurs, l'étude statistique de 2501 trajectoires sur 5 milliards d'années a montré que les collisions sont possibles entre le Soleil, Mercure, Venus, la Terre, et Mars, avec une probabilité d'environ 1%. En l'absence de la relativité générale, la probabilité d'une collision entre Mercure et le Soleil ou Vénus sur la même durée atteint 60%.

Depuis 2010, un effort important a été apporté à l'analyse et à l'exploitation des données spatiales de navigation dans le but d'améliorer les éphémérides planétaires et effectuer des tests de physique fondamentale. Dans ce cadre, l'utilisation des données de la sonde Messenger associées aux données de MEX, MRO, MGS, VEX, Galileo et Cassini a permis l'obtention de nouvelles contraintes sur les paramètres PPN  $\beta$  et  $\gamma$ , de l'ordre de  $10^{-5}$  pour les deux paramètres (Figure 3). La première contrainte globale incluant  $\beta$ ,  $\gamma$ , les variations de la constante de la gravitation  $G$ , et le taux d'aplatissement du soleil  $J_2$  a aussi été obtenue grâce à INPOP et aux données de Messenger. Quelques dizaines de masses d'astéroïdes sont aussi régulièrement déterminées, permettant ainsi d'améliorer les estimations de masses moyennes par famille d'astéroïdes. Notons enfin que les éphémérides INPOP sont les éphémérides de référence pour la mission Gaia.



**Figure 3. Augmentation (en %) des résidus d'observation des planètes calculés avec INPOP13a quand on varie les valeurs des paramètres PPN  $\beta$  et  $\gamma$  (en relativité générale  $\beta=\gamma=1$ ).**



Un éloignement progressif dix fois plus rapide qu'attendu des lunes de Saturne sous l'action des effets de marées a été mis en évidence en utilisant plus d'un siècle d'observations astrométriques ainsi que les données de la sonde Cassini. En utilisant un modèle d'évolution de ce système, il a été démontré que ces lunes s'étaient très probablement formées à partir de gros blocs présents au sein même des anneaux de Saturne, il y a plus de 2,5 milliards d'années. Ces résultats reposent sur plusieurs avancées importantes telles que de nouvelles réductions astrométriques de plaques photographiques anciennes, de nouveaux modèles dynamiques d'évolution de système de satellites ainsi que de nouveaux processus de dissipation de marées. En particulier, les effets de dissipation dus aux noyaux des planètes géantes ont été développés, apportant ainsi un élément clef à la dissipation de marées dans le système saturnien. D'autre part, l'excitation de marées des couches fluides des planètes géantes, en présence d'ondes inertielles, a été étudiée en détail et la communauté française a pu mettre en évidence, pour la première fois, l'impact de la dissipation de marées par ondes inertielles et gravito-inertielles.

Des mesures précises de temps d'arrivée des impulsions radio reçues d'un ensemble de pulsars ultra-stables (Pulsar Timing Array ou PTA) permettent de chercher, par corrélation, la signature d'ondes gravitationnelles. Cet interféromètre céleste est sensible aux fréquences de l'ordre du nanoHertz et le fond attendu devrait être constitué par les trous noirs binaires super-massifs. Le programme PTA conduit au radiotélescope de Nançay fait partie d'une collaboration européenne (European PTA ou EPTA), elle-même incluse dans un International PTA regroupant l'Europe, l'Australie et l'Amérique du Nord. L'excellence de l'instrumentation de dédispersion cohérente de Nançay couplée à la grande cadence d'observation offre une place prédominante dans l'EPTA et situe les mesures de temps d'arrivée de Nançay parmi les meilleures du monde. Diverses limites contraignantes ont déjà été posées par les différents groupes et toute la collaboration IPTA travaille maintenant à homogénéiser les données et produire une limite globale.

## 2.4 Evolutions thématiques

En ce qui concerne les tests de gravitation plusieurs évolutions majeures se profilent dans les prochaines années. D'une part les expériences proches ou déjà en cours comme GAIA, Microscope ou ACES livreront leurs résultats, ce qui pourrait révolutionner notre compréhension de la gravitation et son interface avec les autres interactions. En effet, si la mise en évidence expérimentale d'une violation du principe d'équivalence serait un bouleversement majeur, même des limites plus fortes sur sa non violation apporteraient des contraintes importantes pour toute théorie alternative à la RG et au modèle standard. D'autre part l'évolution rapide de la technologie, au sol et embarquée, en métrologie de l'espace-temps permettra la conception de nouveaux types d'expérience, comme les tests quantiques qui sondent l'interface entre la gravitation et la mécanique quantique, ou bien dans d'autres domaines comme les champs forts ou les portés très courtes.

Un autre exemple d'évolution attendue dans ce domaine est la découverte récente du pulsar triple J0337+1715 (Ransom et al. Nature 505, 520, 2014). Il est maintenant observé régulièrement à Nançay, ce qui devrait permettre de rapidement tester le Principe d'Equivalence fort. En effet, les énergies de cohésion gravitationnelle ( $\sim GM/5Rc^2$ ) de ces pulsars sont bien supérieures à celle trouvées dans le système solaire (utilisé jusqu'à présent). La plupart des théories métriques de la gravitation sauf la Relativité Générale prédisent des violations du Principe d'Equivalence fort que les mesures précises de temps d'arrivée testeront de façon unique.

La détection directe d'ondes gravitationnelles ouvrira une nouvelle frontière pour la compréhension de l'Univers à très grand redshift et la physique fondamentale à des échelles d'énergie très élevées ; les premières détections sont attendues dans les quelques années à venir grâce aux détecteurs au sol et en particulier Advanced VIRGO. A plus long terme une expérience spatiale du type e-LISA devrait permettre de nombreuses observations au delà de simples détections. Les détecteurs reposant sur le principe de l'interférométrie atomique tels que MIGA en sont à leur début mais sont également très prometteurs. Finalement on s'attend à ce que le chronométrage des pulsars en réseau Européen et international (EPTA) détecte les ondes gravitationnelles à très basse fréquence (nHz), ou continue à améliorer les contraintes sur les limites supérieures de ces ondes.

L'accélération du développement de la métrologie reposant sur des techniques quantiques, en particulier pour les horloges et les interféromètres atomiques devrait se confirmer et permettre de continuer à améliorer les performances à un rythme élevé. Ceci permet d'envisager diverses applications compétitives telles que le test du principe d'équivalence au moyen de l'interférométrie atomique (au sol ou dans l'espace) ou la géodésie au moyen d'horloges. En effet, une variation d'altitude de 1 m au niveau de la surface terrestre induit une variation relative de fréquence de  $10^{-16}$  ; inversement, un réseau d'horloges d'une stabilité au niveau de  $10^{-18}$  pourrait permettre de déterminer le géoïde au niveau centimétrique, ce qui est compétitif avec les meilleures mesures actuelles. Cela nécessitera la comparaison d'horloges distantes avec une grande exactitude, ce qui est possible en particulier grâce aux liens optiques fibrés qui ont déjà prouvé des performances suffisantes sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres et dont le réseau va s'étendre rapidement. Par ailleurs les liens fibrés constituent des interféromètres Sagnac géants qui pourront être utilisés, par exemple, pour mesurer la rotation de la Terre, cependant avec une sensibilité qui pour l'instant est estimée un facteur 10 en deçà des meilleurs gyromètres laser en laboratoire. Néanmoins ces technologies et leurs applications sont à un stade très jeune et on s'attend à des améliorations rapides.

L'amélioration des systèmes de références spatio-temporelles sera le résultat d'une part de l'amélioration des techniques métrologiques fondamentales (horloges, liens, astrométrie, etc.) et d'autre part de nouvelles mises en œuvre de ces technologies. Par exemple, on prévoit d'accroître les capacités des constellations dédiées au positionnement par satellite en ajoutant des liens directs inter-satellites aux liens classiques satellite-sol, ou d'améliorer la cohérence entre les différents systèmes de références en embarquant sur un même satellite l'ensemble des instruments de positionnement actuels (GNSS, SLR, DORIS, VLBI) : il s'agit du projet GRASP.



### 3 Moyens sol et espace

Les deux premiers tableaux ci-dessous résument les moyens spatiaux et sol actuels et futurs, avec des degrés de pertinence affichés en fonction des grandes questions dans le domaine du GRAM développées plus haut. Un troisième tableau rassemble des projets qui, en plus de s'appuyer sur des moyens observationnels (non définis exhaustivement), incluent une grande part d'assimilation et d'analyse de données. Une description synthétique de tous ces moyens, de leur statut, du rôle de la communauté nationale, est ensuite développée.

	Principe Equivalence	Test champ faible	Test champ fort	Sys. Ref. réalisation	Sys. Ref. applications	Ondes grav.
T2L2	P2			<b>P0</b>	P1	
Gaia		<b>P0</b>		<b>P0</b>	<b>P0</b>	
GNSS				<b>P0</b>	<b>P0</b>	
LISA-PF		P2			P2	<b>P0</b>
MICROSCOPE	<b>P0</b>					
ACES	<b>P0</b>			<b>P0</b>	P1	
JUICE	P2	P1		P1		
Bepi- Colombo		P1		P1		
eLISA			<b>P0</b>			<b>P0</b>
STE-QUEST	<b>P0</b>			<b>P0</b>	<b>P0</b>	
GRASP				<b>P0</b>	<b>P0</b>	

Tableau 2. Moyens spatiaux (existants, futurs)

	Principe Equivalence	Test champ faible	Tests champ fort	Sys. Ref. réalisation	Sys. Ref. applications	Ondes grav.
(adv) VIRGO			P1			<b>P0</b>
Nançay radio			<b>P0</b>			P1
LLR/SLR	<b>P0</b>	<b>P0</b>		<b>P0</b>	<b>P0</b>	
Réseau TF	<b>P0</b>		P1	<b>P0</b>	<b>P0</b>	
Moyens optiques sol		P1		P1	<b>P0</b>	
REFIMEVE+	P1		P1	<b>P0</b>	<b>P0</b>	
VLBI/VGOS		P2		<b>P0</b>	P0	
MIGA			P1		P1	<b>P0</b>
GRAVITY			<b>P0</b>			
SKA			<b>P0</b>	<b>P0</b>		P1

Tableau 3. Moyens sol (existants, futurs)

	Test champ faible	Sys. Ref. réalisation	Sys. Ref. applications	Risque
INPOP	<b>P0</b>	<b>P0</b>	P1	P1
NAROO		P2	P1	P1
PODET				<b>P0</b>
Services (IVS, ILRS, IERS...)		<b>P0</b>	P1	P2

Tableau 4. Moyens intégrés observations et exploitation de données

### 3.1 Description des moyens spatiaux

#### 3.1.1 T2L2

T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser) est un instrument passager de la mission d'océanographie Jason 2, qui a été placée en juin 2008 sur une orbite à 1335 km d'altitude et inclinée à 66°. L'objectif de T2L2 est de synchroniser des horloges éloignées au sol au moyen de la télémétrie laser sur satellite. A bord du satellite, le segment spatial de T2L2 comporte un bloc optique de détection et un dateur électronique ; Au sol, T2L2 s'appuie sur le réseau international laser de 40 stations, dont 22 observent Jason-2 de manière régulière ; les stations poursuivent le satellite Jason2 à raison de 5 à 6 passages par jour de 10 à 15 minutes chacun.

T2L2 bénéficie de la télémétrie 2 voies, avec une précision de quelques mm et une exactitude meilleure que 1 cm (donc inférieure à 30 ps en équivalent temps de vol). La datation bord des événements optiques (pulses laser provenant des stations au sol) s'appuie sur un oscillateur ultra stable (quartz) qui est le cœur du système de poursuite DORIS du CNES et de l'IGN.

T2L2 est un instrument disponible pour les communautés scientifiques (les données sont accessibles sur le site web <https://t2l2.oca.eu/>) impliquées dans les domaines du temps-fréquence, de la géodésie spatiale et de la physique fondamentale. Une application pour le test de l'invariance de Lorentz est en cours, mais semble limitée par les effets systématiques (température, magnétique) affectant la fréquence de l'oscillateur quartz à bord.

T2L2 est également un démonstrateur technologique. Ses performances se situent dans la gamme des 100 ps en exactitude, de 1 ps à 1000 s puis 10 ps à un jour, en terme de "time stability". Il permet ainsi d'étudier le comportement de l'oscillateur à bord de Jason 2.

Prévu initialement pour un fonctionnement de 2 ans, il a été prolongé à 2 reprises par le CNES, jusqu'en 2014. Mises à part quelques interruptions en 2009, en 2010 et en 2013 (quelques jours à chaque fois), l'instrument fonctionne correctement et en permanence depuis juillet 2008. Il enregistre en moyenne 100,000 datations d'événements optiques par jour. Avec 5 à 6 stations laser participantes en 2008, nous sommes passés en 2 ans à 22-24 stations laser qui envoient leur données (dates des tirs laser en UTC station et distances 2 voies) régulièrement aux data centres de Géodésie Spatiale (EDC et CDDIS).

#### 3.1.2 Gaia

Gaia est une mission de classe "cornerstone" dans le programme Horizon 2000+ de l'ESA. Approuvée en 2000, puis lancée en décembre 2013, elle est en opération nominale depuis juillet 2014. Cette mission a pour objectif principal de réaliser une carte en 3-dimensions de notre galaxie, avec les mesures de positions et de mouvements pour un grand nombre d'objets. Successeur de Hipparcos/Tycho, Gaia nous fait toutefois entrer dans une autre ère, tant pour le saut en précision (d'un facteur 100) que pour le nombre d'objets observés (d'un facteur 1000) et les nombreuses applications - jusqu'ici inaccessibles - qui en découlent.

La charge utile est composée de deux miroirs primaires de taille 1,45 x 0,5m fixés sur une structure en SiC, et d'instruments opérants dans le visible. Une mosaïque de 106 CDDs constitue le large plan focal (1,0 x 0,7 m). Le satellite Gaia en rotation balaye le ciel de manière continue et recueille les images sur la mosaïque de CCD (opérant en mode TDI - time-delayed integration). Les principales mesures obtenues concernent l'astrométrie (centrage de la PSF), la photométrimétrie (par un spectrographe basse résolution sur l'ensemble de la plage spectrale [0,35 -

1,0]  $\mu\text{m}$ ) et les vitesses radiales au niveau du km/s (spectromètre haute résolution sur la bande [0,847 – 0,874]  $\mu\text{m}$ ).

La précision attendue pour les positions et parallaxes, en combinant l'ensemble des mesures récoltées pendant les 5 ans de la mission, est de l'ordre de 25  $\mu\text{as}$  (micro-arcsecond) pour une étoile de magnitude  $V \approx 15$ . Gaia, fournira un catalogue astrométrique dense : environ 1 milliard d'étoiles, quelques millions de QSOs et galaxies, et quelques centaines de milliers d'objets du système solaire. Ce catalogue, en établissant un repère de référence cinématiquement non tournant dans le visible et directement relié à l'ICRF, permettra des applications fondamentales en métrologie de l'Espace et du Temps.

La précision des mesures exige une réduction des données, des transferts de temps, et les modélisations de l'instrument et des transformations à un niveau dix fois meilleur ; ceci nécessite en outre une orbitographie précise du satellite Gaia lui-même. Gaia apportera aussi bien des mesures directes de haute précision de corps du système solaire, que des mesures indirectes (pseudo-positions de planètes, réduction de SSO via le catalogue stellaire) permettant la détermination de masses d'astéroïdes, d'effets non gravitationnels, l'amélioration globale des éphémérides planétaires, etc. Parmi les applications scientifiques on peut relever des tests de la relativité générale via les mesures de la déviation des rayons lumineux (provoquées par le Soleil, ou par Jupiter - expérience GAREX), et les mouvements des objets du système solaire.

Le consortium DPAC de réduction et validation des données a été constitué en 2006 ; celui-ci regroupe diverses équipes réparties dans les pays membres de l'ESA, avec, sur les 400 collaborateurs chercheurs, doctorants, ingénieurs, une contribution majeure de la France impliquant les laboratoires GEPI, IMCCE, SYRTE à l'Observatoire de Paris, Lagrange à l'OCA Nice, LAB à Bordeaux, UTINAM à Besançon, LUPM à Montpellier et l'Observatoire Astronomique de Strasbourg. Par ailleurs, Le CNES est un des six centres d'analyse des données ayant en charge environ 40% de l'ensemble des traitements. Le catalogue final est prévu pour 2023 ; des éditions intermédiaires seront cependant distribuées à différentes étapes, à commencer par la "Gaia 1st release" en mi-2016.

### 3.1.3 GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) est le terme générique pour désigner un système de positionnement par satellites. Les deux principales constellations utilisées sont le GPS (US) et Glonass (Russe). Galileo (Europe) est en cours de déploiement et devrait être complet vers 2020. Les GNSS sont un outil indispensable pour toutes les applications de précision centimétrique ou sub-centimétrique. Complétés au sol par le réseau de récepteurs géodésiques de l'IGS (International GNSS Service), il sont utilisés pour la réalisation du système de référence terrestre conventionnel: l'ITRS (International Terrestrial Reference System). Ce système de référence est défini et recommandé par plusieurs instances internationales, parmi lesquelles l'UAI (Union Astronomique Internationale) et l'IUGG (Union Internationale de géodésie et géophysique). L'IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) est en charge de la réalisation de ce système de référence, dont la version la plus récente est ITRF2008. Ce référentiel est indispensable pour un grand nombre de recherches scientifiques (e.g géophysique, climatologie, sismologie) nécessitant un positionnement précis, aussi bien au sol qu'en orbite basse. En tant que moyen fondamental de réalisation d'un système de référence et de positionnement, les GNSS sont un outil préalable à de nombreuses recherches du GRAM. Des évolutions concernant les GNSS sont en cours d'étude, qui permettraient d'aller vers encore plus de précision en positionnement, et faire des GNSS un outil pour les tests de physique

fondamentale: ajout d'accéléromètres à bord des satellites et de liens inter-satellites pour le positionnement relatif.

### 3.1.4 Lisa Pathfinder et eLISA

Déformations de l'espace-temps, les ondes gravitationnelles sont une prédiction directe de la théorie de la Relativité Générale, mais n'ont jamais été directement mesurées. Leur détection n'est pas seulement d'une grande importance en physique fondamentale (la RG décrit-elle bien la gravitation en champ fort ?), mais aussi pour l'astrophysique (Par exemple : comment, où et quand se sont formés les objets compacts ?).

Les détecteurs interférométriques terrestres (en particulier VIRGO) atteindront prochainement des sensibilités suffisantes pour rendre probable une première mesure directe dans les toutes prochaines années. Cependant, les perturbations terrestres (vibrations, mouvements tectoniques, etc.) ne permettent pas la détection de phénomènes de fréquences inférieures à quelques Hz. Ces détecteurs sont donc optimisés pour des événements 'rapides' telles que la coalescence de binaires de naines blanches, ou l'explosion de supernovae.

Les sources compactes d'ondes gravitationnelles les plus intenses mettent cependant en jeu des astres binaires beaucoup plus massifs, dont la période de rotation se situe entre la seconde et quelques heures. Afin de mesurer des phénomènes d'aussi basses fréquences, il est nécessaire d'aller dans l'espace et de bénéficier ainsi d'un environnement gravitationnel local extrêmement stable sur de longues périodes.

Le projet spatial eLISA (evolved Laser Interferometer Space Antenna, successeur des projets LISA puis NGO) a pour objectif de détecter et mesurer précisément les caractéristiques de dizaines de sources (trous noirs super-massifs, binaires de masses extrêmes, binaires de naines blanches galactiques, fond cosmologique, etc.) émettant des ondes gravitationnelles entre  $10^{-4}$  et 1 Hz.

eLISA est un interféromètre constitué de 3 satellites en vol inertiel (i.e. uniquement soumis aux forces de gravité), formant un triangle équilatéral de 106 km de côté. Cette constellation orbitera autour du Soleil, à 1 unité astronomique, suivant la Terre à environ  $20^\circ$  de distance. Cette mission repose sur 2 principaux défis technologiques : la capacité des satellites à suivre (quasiment) parfaitement des géodésiques autour du Soleil et la mesure au niveau picométrique de variations cohérentes, différentielles, de distance entre les satellites distant de 106 km.

Afin de caractériser les performances du vol inertiel (telles que requises par eLISA), une mission de démonstration technologique (LISA Pathfinder) sera lancée au deuxième semestre 2015, avec une exploitation des données en 2016. Le CNES et le laboratoire APC sont particulièrement impliqués dans cette mission. La France contribue en particulier à LISA Pathfinder dans le suivi de réalisation et de validation en vol de l'unité de modulation laser, et la mise en place d'un centre de traitement de données complémentaire. Des exercices de simulation et analyse des données sont régulièrement menés au sein de la communauté LISA Pathfinder afin de préparer les procédures de traitement. Le rôle du centre complémentaire d'analyse de données hébergées au Centre François Arago (laboratoire APC) est double : assurer une analyse plus approfondie (hors ligne) de certains résultats obtenus (alors que le centre opérationnel de l'ESA assurera une analyse de premier niveau en 'temps réel') et réagir aux alertes émises par le Centre Opérationnel en cas de mesure anormale et dont l'interprétation demande une analyse approfondie.

Après la sélection du thème ‘Ondes Gravitationnelles’ par l’ESA pour la mission L3 (lancement prévu au plus tard en 2034), le développement du concept d’eLISA se poursuit activement afin de conforter la maturité technologique des sous-systèmes, un modèle d’ingénierie de l’instrument devant être développé à partir de 2019-2020. La contribution française à eLISA est, à l’heure actuelle, centrée autour de la mise en place du centre de traitement de données de la mission, ainsi que des activités d’intégration et de tests de l’instrument et d’une partie de l’ingénierie système.

Les laboratoires et instituts français participant à eLISA sont regroupés au sein de consortium LISA France (APC, ARTEMIS, IAP, LAPP, LUTh, ONERA, SYRTE, CEA/SPhT et LPC2E).

LISA Pathfinder et eLISA sont donc deux missions majeures dans le domaine des sciences de la gravitation. LISA Pathfinder volera en 2015 et eLISA est le projet de mission correspondant à la thématique ‘ondes gravitationnelles’, thématique approuvée pour un lancement au plus tard en 2034. Plusieurs laboratoires français du GRAM participent déjà à ces missions et cette implication est amenée à se renforcer dans les prochaines années.

### 3.1.5 MICROSCOPE

La mission spatiale MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l’Observation du Principe d’Equivalence) impliquant le CNES et l’ESA, l’ONERA et l’OCA (proposants de la mission), et le ZARM (Université de Brême) soutenu par le DLR, a pour objectif de tester le Principe d’Equivalence (via l’universalité de la chute libre) dans l’espace avec une sensibilité de  $10^{-15}$  soit un gain d’un facteur 100 par rapport aux expériences terrestres. Le cœur de la charge utile (le double accéléromètre différentiel T-SAGE de l’ONERA) a été intégré dans le satellite et est en cours de test au CNES Toulouse pour un tir programmé en avril 2016. La mission est dimensionnée pour une durée de 2 ans.

Le principe de l’expérience consiste à comparer la chute libre de 2 masses macroscopiques soumises à la gravité terrestre et protégées des effets non-gravitationnels par le satellite qui les embarque. En pratique, il est plus simple de contraindre les masses à rester immobiles (tout déplacement étant mesuré par détection capacitive) par rapport au satellite en leur appliquant des forces électrostatiques qui compensent les autres perturbations éventuelles (incluant une potentielle violation du principe d’équivalence). La mesure de la tension appliquée permet donc de détecter l’ensemble des perturbations. Ce mode de fonctionnement permet en particulier de garder les centres des masses d’épreuve quasi-confondus et de minimiser ainsi le gradient de gravité. Le test du principe d’équivalence sera fait en comparant une masse en titane et une masse en platine tandis qu’un couple de 2 masses en platine (pour lequel aucune violation ne doit intervenir) servira à contrôler la précision et l’exactitude de l’expérience.

L’OCA et l’ONERA développent les outils de traitements scientifiques qui seront implantés dans le Centre de Mission Scientifique de MICROSCOPE, en cours d’installation à l’ONERA. Ce centre aura également la charge de traiter les données, les valider et de piloter le scénario de mission opérationnel. Les tests de qualification sont en cours avec le CNES et devront se terminer fin 2015.

Au-delà du test du PE, le « Science Working Group » de la mission va proposer via le CNES en 2015 d’élargir le champ des applications de la mission par un appel d’offre à la participation au traitement des données. Le SWG comprend une majorité de scientifiques provenant de disciplines diverses (Gravitation, Physique fondamentale, Physique, Champ de gravité terrestre, Aéronomie), de France et d’Europe

### 3.1.6 ACES

La mission spatiale ACES, acronyme de « Atomic Clock Ensemble in Space », est développée conjointement par l'agence spatiale européenne, ESA, et par l'agence française, CNES. Cette mission européenne à vocation internationale repose sur la comparaison en phase/fréquence d'horloges au sol et en orbite, avec des résolutions inégalées. Les objectifs sont de déduire des résultats en physique fondamentale, en métrologie, en géodésie et en navigation.

La charge utile d'ACES inclut une horloge à atomes froids de césium, PHARAO acronyme de Projet d'Horloge Atomique à Refroidissement d'Atomes en Orbite, un maser à hydrogène, un asservissement de phase PHARAO/maser et un moyen de transfert de temps par émission/réception de signaux électromagnétiques synchronisés sur les horloges. En outre un récepteur de navigation, GPS et Galileo, est installé sur ACES pour fournir une orbitographie exacte en position et en vitesse ainsi qu'un lien optique du type T2L2. ACES sera installée sur une palette externe fixée sur le module Columbus de la station internationale, avec un lancement prévu début 2017.

ACES s'appuie aussi sur plusieurs dizaines d'horloges sol de grandes performances actuellement développées dans le monde : horloges micro-onde en fontaine atomique, horloges optiques à ions ou à atomes neutres. Aujourd'hui les meilleures de ces horloges ont une exactitude de fréquence dans la gamme des  $10^{-18}$ . Avec un tel niveau d'exactitude et une telle diversité dans les atomes utilisés, ACES permettra de les comparer et de les utiliser avec une résolution en temps-fréquence inégalée.

Cet ensemble fournira de nouveaux instruments pour effectuer des mesures extrêmement fines sur l'environnement spatio-temporel de ces horloges. Cela concerne l'ensemble de la relativité avec comme corollaire les principes d'invariance et le principe d'équivalence. L'objectif principal en physique fondamentale est un test du décalage gravitationnel du temps (gravitational redshift) dans le champ de la Terre à un niveau 10 à 30 fois mieux que le meilleur test actuel.

La mesure directe du potentiel gravitationnel par le rythme des horloges ouvre aussi la voie à une géodésie relativiste permettant de relier les potentiels locaux sur des échelles intercontinentales. Et enfin ACES pourra être comparé aux constellations de navigation avec les mesures à bord et les mesures combinées au sol des signaux ACES, GPS et Galileo ; les effets atmosphériques seront donc aussi finement étudiés.

L'instrument le plus complexe sur les plans technologique et opérationnel est l'horloge à atomes froids PHARAO. Cette horloge est développée par le CNES avec le soutien de l'équipe du SYRTE. L'horloge inclut 4 sous-systèmes développés par des industriels différents et assemblés au CNES. Le modèle de vol de PHARAO a passé tous les tests et a été livré à l'ESA en 2014. Il est actuellement en cours d'intégration sur la palette ACES.

### 3.1.7 JUICE et Bepi-Colombo

Dans le cadre des missions M et L de l'ESA d'exploration du système solaire, la communauté organisée autour du GRAM est impliquée fortement dans les missions Bepi-Colombo vers Mercure et JUICE vers le système jovien.

Le lancement de la mission Bepi-Colombo est prévu pour juin 2016 avec une mise en orbite de deux modules en janvier 2024. L'exploration du champ de gravité et de la physique interne de la planète sera effectuée par l'expérience de radio-science MORE et l'altimètre BELA embarqués sur le module MPO en orbite circulaire. La relativité générale sera testée dans le voisinage du soleil de même que d'autres théories alternatives de gravitation au travers de l'analyse des



données de radio-science. Dans ce contexte, la communauté française joue en rôle important au sein du Bepi Colombo Science Group dans la préparation de la mission et la valorisation scientifique des données qui seront récoltées. Notamment, dans les thématiques afférentes à l'AS GRAM, la communauté française (OCA, IMCCE) intervient dans l'élaboration d'éphémérides planétaires du système solaire (INPOP). Ces éphémérides sont fondamentales pour l'ajustement de l'orbite de Mercure à partir de laquelle seront effectués les tests de relativité générale et l'évaluation des paramètres PPN  $\beta$ ,  $\gamma$  mais aussi  $dG/dt$  et  $\eta$ . Des études sur la rotation de la planète et sur les contraintes qu'il sera possible de déduire de la combinaison des données de radio-science et altimétriques sont aussi en cours.

La mission JUICE s'appuie sur un important héritage de la mission Bepi-Colombo par l'utilisation des données radio-science (expérience 3GM) et des données altimétriques (GALA) qui seront embarquées pour un lancement en 2022 et une arrivée dans le système jovien en 2030.

Dans le cadre des thématiques de GRAM, la mission JUICE a pour but principal la caractérisation physique des satellites Ganymède, Europa et Callisto et l'étude dynamique des quatre satellites galiléens. En effet, les mouvements orbitaux contiennent des signatures dynamiques associées à l'environnement gravitationnel du système. A titre d'exemple, l'examen des variations séculaires d'énergie orbitale et moment angulaire du système permettent de déduire l'intensité des effets de marées présents dans Jupiter et ses satellites, à commencer par Io. Si les données des expériences de radio-science 3GM et VLBI PRIDE permettront d'obtenir une résolution très fine de la dynamique orbitale de Ganymède, les observations de la caméra JANUS seront importantes pour contraindre la dynamique des trois autres satellites au moment de la mission. La dynamique des quatre lunes intérieures que sont Métis, Adrasteé, Amalthée et Thébé permettra également de bien sonder l'environnement jovien, grâce aux observations de l'instrument JANUS.

Contrairement à Bepi-Colombo, l'aspect test de gravité est moins prépondérant dans les buts de la mission mais néanmoins présent. De plus, du fait de la complexité de la caractérisation géophysique à obtenir, une plus grande synergie entre les instruments sera utilisée lors de la valorisation scientifique des données : l'imagerie dans le vert mais aussi la spectrographie UV et les mesures de champs magnétique pourront être combinées avec les données radio-science et d'altimétrie pour une meilleure estimation des densités, compositions et épaisseurs de la croûte et de l'océan. La communauté scientifique française impliquée dans ces thématiques contribue d'une part à l'établissement des éphémérides planétaires et de satellites galiléens (OCA, IMCCE) nécessaires à la navigation de la sonde mais aussi à l'analyse des données et aux études physiques des satellites, et d'autre part à l'établissement de modèles d'effet de marées et physique interne des satellites (Université de Nantes, IMCCE).

### 3.1.8 STE-QUEST

STE-QUEST est une mission de physique fondamentale, qui a fait l'objet d'une étude de phase A ESA dans le cadre de l'appel Cosmic-Vision M3, et qui a été reproposée à l'ESA en réponse à l'appel d'offre Cosmic Vision M4. Les études de STE-QUEST ont été soutenues et suivies jusqu'à présent par le CNES et par les agences de sept autres pays membres de l'ESA. Nous décrivons ci-dessous les principaux objectifs scientifiques.

- Test du Principe d'équivalence : le principe d'équivalence d'Einstein est l'une des fondations de la théorie de la gravitation ; il implique que la gravitation peut être complètement assimilée à la courbure de l'espace-temps. L'objectif principal de STE-QUEST est de réaliser des tests approfondis de différents aspects de ce principe en combinant plusieurs mesures qui tentent de détecter des violations de l'universalité de



la chute libre dans le domaine quantique et de l'invariance de position locale dans le champ du soleil et de la lune.

- Accélération différentielle d'ondes de matière en chute libre : il s'agit d'un test direct de l'universalité de la chute libre. L'objectif de STE-QUEST est de comparer les accélérations en chute libre de deux systèmes quantiques constitués d'espèces atomiques différentes (87Rb et 41K), avec une incertitude de  $2 \times 10^{-15}$  exprimé en terme du paramètre dit d'Eötvös. Ce test est complémentaire des comparaisons de l'accélération en chute libre de masses macroscopiques qui seront réalisées par la mission MICROSCOPE avec une incertitude de  $1 \times 10^{-15}$ . L'incertitude visée par STE-QUEST sera un énorme bond en avant pour les tests sur systèmes quantiques, une amélioration de plus de 7 ordres de grandeur par rapport aux meilleures mesures actuelles, réalisées en laboratoire. Les tests sur systèmes quantiques conserveront un potentiel significatif d'amélioration supplémentaire à long terme.
- Test de dilatation gravitationnelle du temps dû aux champs solaire et lunaire : l'effet de ralentissement d'une horloge dans un champ gravitationnel peut être déduit directement de l'invariance de position locale à l'aide de l'effet Doppler ; sa mesure constitue donc un test bien connu de l'invariance de position locale. La meilleure mesure de cet effet, pour le champ gravitationnel de la Terre, a été réalisée par la mission Gravity Probe A en 1976, avec une incertitude de  $7 \times 10^{-5}$ . La mission ACES vise à améliorer cette incertitude d'un facteur de 10 à 30. L'objectif de STE-QUEST est de réaliser des tests de dilatation du temps dues aux champs gravitationnels du Soleil et de la Lune, en comparant des horloges distantes sur terre avec des incertitudes inégalées. Cela améliorera la meilleure incertitude actuelle dans le champ du soleil d'environ 4 ordres de grandeur à  $2 \times 10^{-6}$ , et le test dans le champ lunaire sera une première.

Pour réaliser ces objectifs principaux, STE-QUEST mettra en œuvre des équipements permettant des mesures ultra-précises de temps, fréquences, distances et de certains phénomènes atomiques. Cela conduit naturellement à plusieurs objectifs additionnels : contribution aux échelles de temps atomiques, comparaisons d'horloges sols à très longue distance, cartographie du potentiel gravitationnel terrestre par l'effet de dilatation gravitationnelle du temps, physique des ondes atomiques, unification des systèmes de références terrestres et célestes.

### 3.1.9 GRASP

Les systèmes de référence d'espace et de temps sont un enjeu majeur dans les thématiques GRAM. Le système de référence terrestre est notamment déterminé par les techniques actuelles de géodésie spatiale (DORIS, GNSS, SLR, VLBI - selon leur potentiel) qui possèdent néanmoins des systématismes liés à leurs caractéristiques propres, électroniques et géométriques.

Le rassemblement de plusieurs de ces techniques, sinon toutes, dans des observatoires géodésiques fondamentaux par des liens terrestres contribue à l'homogénéisation du système de référence, mais il a été montré que le lien spatial par l'embarquement de ces systèmes sur une même plateforme peut permettre d'accéder à la précision millimétrique du système de référence et promouvoir de ce fait des avancées majeures dans les applications géophysiques et océanographiques.

La mission GRASP (Geodetic Reference Antenna in Space) proposée par le JPL dans le cadre du programme «venture» de la NASA et soutenue par la communauté géodésique nationale pour une collaboration avec le CNES répond à des exigences de précision à 1 mm et de stabilité à 0,1 mm/an avec comme objectifs principaux l'étalonnage des biais inter-instruments et la ré-interprétation de l'élévation du niveau des océans par altimétrie et marégraphie.

Pour cela, GRASP emporterait à l'horizon 2020 les systèmes DORIS, GNSS, SLR et VLBI (sous forme d'un quasar artificiel) dont tous les éléments seraient étalonnés a priori de façon à atteindre une précision orbitale millimétrique.

GRASP est pour le moment la seule mission géodésique envisagée dédiée au système de référence terrestre et retient naturellement toute l'attention de la communauté GRAM.

## 3.2 Description des moyens sol

### 3.2.1 Virgo et Advanced Virgo

Après de longues années de maturation technologique, les prochaines années sont cruciales pour l'astronomie des ondes gravitationnelles. En effet, tout indique que les premières détections devraient avoir lieu dans la période 2016-2018, notamment grâce aux détecteurs interférométriques de nouvelles générations : aLIGO et AdvVIRGO.

Les détecteurs terrestres dits de première génération ont été mis en marche et ont atteint leur sensibilité nominale pendant la décennie 2000-2010, avec des prises de données régulières pendant les dernières années.

Les détecteurs VIRGO et LIGO ont été les premiers interféromètres kilométriques pour la détection des ondes gravitationnelles, avec un défi technologique pour l'obtention de la sensibilité nominale, mais aussi des cycles utiles permettant une exploitation scientifique. Lors de ses dernières campagnes de mesures, VIRGO a démontré une sensibilité meilleure que  $h = 10^{-22}/\sqrt{\text{Hz}}$  dans une large bande de spectre, ce qui représente une horizon moyen de détection de 10 Mpc pour les événements de coalescences d'étoiles à neutrons, pour un cycle utile supérieur à 80%. La sensibilité et le cycle utile obtenus par VIRGO représentent une validation des choix technologiques faits et, plus généralement, une validation du schéma du détecteur.

VIRGO a entrepris plusieurs campagnes de prise de données scientifiques communes avec les détecteurs de LIGO entre 2007 et 2011. Aucun événement n'a été détecté à ce jour. Cependant les retombées scientifiques ne sont pas nulles... La plupart des sources astrophysiques potentielles, coalescences binaires, gamma ray bursts (GRB), pulsars, etc. ont été scrutées et de nombreuses limites supérieures ont pu être établies. L'extrapolation des résultats des prises de données de LIGO et VIRGO permet d'être confiant. Ainsi, de marginale pour les détecteurs actuels, la détection d'une coalescence de binaires par exemple deviendra presque certaine avec les détecteurs avancés.

Des détecteurs dits de deuxième génération, Advanced Virgo (AdvVIRGO) et Advanced LIGO (aLIGO), sont en construction en utilisant les mêmes infrastructures que les interféromètres de première génération et des technologies déjà testées. Ces détecteurs visent une sensibilité dix fois meilleure. Cette amélioration nécessite plusieurs changements de l'interféromètre. La quantité de lumière stockée dans les bras de l'interféromètre augmente, avec une puissance injectée passant de 20 W à 125 W. La qualité des miroirs est améliorée d'environ un ordre de grandeur. Il est aussi nécessaire de réduire l'effet du bruit thermique des miroirs en augmentant la taille des faisceaux à environ 10 cm de diamètre. Le bruit thermique des suspensions des miroirs est aussi réduit en utilisant des suspensions monolithiques en silice.

80% du budget nécessaire à ces modifications a aujourd'hui été engagé, et leur installation et vérification sont en bonne voie. Les laboratoires français (ARTEMIS, APC, LKB, LMA, LAL, LAPP, ESPCI) continuent à avoir une contribution majeure aux projets VIRGO et Advanced VIRGO, notamment la réalisation des miroirs, des systèmes optiques et électroniques de détection, la

mise sous vide, ainsi que l'analyse de données. Les premières prises de données d'Advanced VIRGO, conjointement à aLIGO, devraient avoir lieu en 2016. Si la sensibilité espérée est atteinte, une première détection directe des ondes gravitationnelles est attendue d'ici 2018...

### 3.2.2 Radiotélescope de Nançay

Parmi les instruments de radioastronomie gérés par l'Observatoire de Paris sur la Station de radioastronomie à Nançay, le grand radiotélescope décimétrique se concentre depuis une dizaine d'années maintenant sur les observations des pulsars. Pour obtenir une précision de datation des instants d'arrivée au niveau de quelques dizaines de nanosecondes, une instrumentation spécifique a été développée en collaboration avec l'équipe 'radioastronomie' du LPC2E à Orléans et installée à Nançay (dédispersion cohérente directement faite sur la forme d'onde du signal), et elle fournit, en ce début 2015, les meilleures datations d'Europe et parmi les meilleures au monde.

L'objectif scientifique principal des datations régulières, effectuées sur un ensemble de pulsars ultra-stables bien répartis dans le ciel (un PTA : Pulsar Timing Array), est la détection de la signature des ondes gravitationnelles, imprimée directement dans les variations des 'temps de vol' entre les pulsars et la Terre. Les sources astrophysiques attendues dans la gamme de fréquence sondée ( $\sim 10^{-8}$  Hz) sont les trous noirs binaires super-massifs ( $\sim 10^9$  masses solaires) situés au coeur des galaxies. L'équipe d'Orléans est membre à part entière de l'EPTA (European Pulsar Timing Array) et l'EPTA est l'un des trois consortia constituant l'IPTA (International PTA) avec la collaboration nord-américaine NanoGrav et l'australienne PPTA (Parkes PTA). Des limites sur l'amplitude des ondes de plus en plus contraignantes sont régulièrement publiés par les trois collaborations et une série de sept articles EPTA décrivant les données et les différentes analyses de recherche de signal est en cours de finalisation.

Grâce aux excellentes mesures qui sont faites aussi sur des pulsars binaires compacts et relativistes, des tests contraignants de physique fondamentale sont également conduits avec le soutien de l'AS GRAM. Parmi les nombreux systèmes binaires relativistes intéressants mis au jour récemment (dans le cadre de la collaboration Fermi/LAT ou de grands relevés radio) et qui apporteront de nouveaux tests de la gravitation ces prochaines années, un pulsar triple a été découvert en 2012 (Ransom et al., Nature 505, 520, 2014) et qui, une fois réglée la modélisation complexe des interactions à trois corps, permettra de tester le Principe d'Equivalence Forte (SEP) en champ gravitationnel fort de façon inégalée.

Ce double thème, autour des tests de la gravitation et de la recherche d'ondes gravitationnelles, est l'un des principaux programmes clés du futur grand radiotélescope SKA, en particulier de la phase I. L'expertise ainsi développée et maintenue grâce au soutien de l'AS GRAM est essentielle pour la participation future de la France à cette nouvelle génération d'instruments.

### 3.2.3 LLR/SLR

La station de télémétrie laser satellitaire et lunaire (SLR et LLR) MéO est installée à l'Observatoire de la Côte d'Azur dans l'arrière-pays Grassois à 1270 mètres d'altitude depuis le début des années 80. Ce moyen est constitué d'un télescope motorisé, de type Ritchey-Chrétien avec un miroir primaire d'1,5 mètres de diamètre. Ses composants optiques, traités pour tenir à l'exposition de fortes puissances laser, permettent de manipuler des impulsions lumineuses ultra-brèves. Le procédé instrumental mis en œuvre consiste à mesurer avec une précision d'une dizaine de picoseconde, le temps mis par une impulsion laser pour parcourir la distance aller-retour entre un satellite artificiel ou naturel comme la Lune et l'instrument. La métrologie repose sur un laboratoire temps/fréquence composé d'horloges ultra-stables associé à des

moyens de détection et de datation de simple-photon. Ce procédé instrumental fait partie des quatre principales techniques contribuant à la géodésie spatiale et bénéficie d'une organisation à l'échelle internationale via l'ILRS (International Laser Ranging Service). Cette technique joue aussi un rôle important en physique fondamentale. La télémétrie laser participe ainsi :

- à la localisation de points terrestres avec une exactitude meilleure que le centimètre,
- à la réalisation du système de référence terrestre international,
- au suivi de phénomènes variables à l'échelle planétaire comme le champ de gravité terrestre, l'augmentation du niveau moyen des mers mais aussi les variations de vitesse de rotation de la Terre et de son axe,
- au transfert de temps (T2L2) et à la comparaison d'horloges,
- à la calibration et à la validation des orbites des satellites GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO),
- à l'étude physique de la Lune

Ce moyen joue un rôle très important à l'échelle internationale : la station MEO produit plus de 50% des données mondiales en télémétrie laser sur la Lune. La plateforme MEO est aussi bien adaptée pour le développement instrumental autour des liens optiques et de l'imagerie. Elle a accueilli, entre-autres, le projet mini-DOLL pour des expériences de liens optiques cohérents. Un banc d'optique adaptative a récemment été acquis suite à une collaboration scientifique avec l'ONERA. Les perspectives de développements instrumentaux pour les années à venir sont riches : détecteurs vert et infra-rouge hautes cadences pour l'amélioration de l'exactitude au niveau millimétrique, caractérisation de la turbulence atmosphérique, R&D en télécommunications optiques.

### 3.2.4 Réseau Temps et Fréquence

Le réseau temps-fréquence réalise et met à disposition les références françaises de fréquence et de temps. Les oscillateurs ultra-stables et fontaines atomiques du SYRTE réalisent l'unité de temps, la seconde. Des horloges atomiques commerciales du SYRTE, pilotées à l'aide des fontaines, réalisent l'échelle de temps nationale UTC(OP). Des horloges atomiques de UTINAM et de Géoazur réalisent des références locales et sont raccordées en permanence au SYRTE à l'aide d'équipements de transfert temps-fréquence à distance par satellites (méthodes GNSS et TWSTFT), installés dans ces trois laboratoires. Par ailleurs, FEMTO-ST fournit des moyens complémentaires de caractérisation de stabilité de fréquence et de bruit de phase. Ces laboratoires et moyens sont très bien situés dans le temps-fréquence mondial, la France faisant partie du petit groupe de pays les plus performants. Ils contribuent avec un poids important à la référence internationale, UTC, réalisée par le BIPM, ce qui assure l'équivalence internationale des références françaises.

Le référentiel temporel est en soit l'un des sujets centraux du GRAM. Par ailleurs, les références fournies par le réseau temps-fréquence sous-tendent les développements des horloges optiques et des nouvelles méthodes de transfert à distance (T2L2, fibre optique), et sont essentielles pour la télémétrie laser, la chronométrie des pulsars, en physique de laboratoire (spectroscopie haute précision,...), tests de la physique fondamentale (en laboratoire, segment sol d'ACES), ainsi que pour de nombreuses problématiques scientifiques en dehors du GRAM. Elles constituent également un service pour tout le pays, dans le cadre de missions confiées au SYRTE, UTINAM et FEMTO-ST par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE). Un petit nombre d'entités publiques (CNES, DGA,...) et d'industriels (Orange,...) accèdent aux références nationales en participant directement au réseau temps-fréquence par comparaisons GNSS. Diverses autres méthodes sont utilisées pour diffuser ces références aux autres utilisateurs.

Les perspectives du réseau temps-fréquence dans la décennie à venir incluent une extension importante de la diffusion de références de fréquence de très haute performance par fibre optique, grâce à l'EquipEx REFIMEVE+. La diffusion du temps par fibre optique commence à se développer également. L'EquipEx Osc IMP est en train de renforcer les moyens de FEMTO-ST et de UTINAM. A l'échéance de 5 à 10 ans, il est attendu que les horloges optiques jouent un rôle croissant dans la réalisation de la seconde et des échelles de temps, remplaçant progressivement les fontaines atomiques et autres horloges à césium actuelles.

### 3.2.5 Moyens optiques sol

Les télescopes de taille petite ou moyenne (0.7 - 4m), ou les télescopes grand-champ sont utiles pour l'astrométrie des petits corps du système solaire et les débris spatiaux. Les télescopes robotisés, comme TAROT, sont, de même, bien adaptés au suivi de ces corps. Des observations sur des temps longs sont nécessaires aux caractérisations orbitales des objets étudiés ; aussi les télescopes sol, plus que les télescopes spatiaux, offrant de bonnes disponibilités d'accès (i.e. plus grande que celle des très grands télescopes) sont bien adaptés à ces études. Ces observations peuvent être complémentaires à des observations astrométriques de grande précision (radar, Gaia, Cassini, ...) ; par ailleurs elles pourront utiliser avec un très grand bénéfice le catalogue astrométrique Gaia (projet NAROO). Les observations astrométriques des satellites naturels sont utiles pour la détermination des positions des planètes extérieures. Les observations astrométriques optiques sol en combinaison avec des données spatiales, de radio science et/ou de données VLBI permettent des caractérisations des champs de gravité et de gravitation uniques. Enfin la caractérisation des perturbations gravitationnelles mutuelles, ou des forces non-gravitationnelles est essentielle pour mieux déterminer les accélérations relativistes et aborder les tests de gravitation en champ faible.

### 3.2.6 REFIMEVE+

Le projet EQUIPEX REFIMEVE+ (Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne +) a été sélectionné dans le cadre de l'appel d'offre Equipements d'Excellence 2011 des investissements d'avenir. Il a pour objectif la dissémination d'une référence de fréquence optique sur l'ensemble du territoire national. Le LPL et le SYRTE coordonnent le développement de ce réseau, en partenariat avec RENATER (Réseau national pour la technologie, l'enseignement et la recherche) qui fournit le réseau de fibres optiques. Une vingtaine de laboratoires français sont également partenaires de ce projet en tant que futurs utilisateurs du signal ultrastable distribué. De nombreux champs disciplinaires vont tirer parti de la dissémination de cette fréquence : la métrologie temps/fréquence, la physique fondamentale sur terre et dans l'espace, la spectroscopie de précision appliquée à l'environnement et à la physique de l'atmosphère. Par ailleurs, cet équipement pourra être testé en tant que gyromètre géant et également comme senseur sismique.

Le signal ultrastable disséminé dans le réseau est développé par le SYRTE. Il s'agit d'un signal émis par un laser continu de longueur d'onde optique 1.542  $\mu\text{m}$ , stabilisé sur une cavité ultrastable et dont la fréquence peut être contrôlée par rapport aux étalons primaires du SYRTE. Afin d'assurer un transfert optimal de ce signal par fibre optique, il faut corriger activement les fluctuations du délai de propagation, liées aux instabilités thermiques et acoustiques. Ceci est assuré par des stations optoélectroniques installées tous les 200 ou 300 km sur le réseau. Ces stations permettent également d'amplifier sélectivement le signal de référence de fréquence. Des prototypes réalisés en laboratoires ont permis de démontrer un lien optique compensé en bruit sur près de 1500 km entre Paris et Strasbourg et retour. La stabilité de fréquence du signal disséminé est ainsi de l'ordre de  $10^{-18}$  en valeur relative après quelques heures de mesure.

Le signal ultrastable se propage dans les mêmes fibres que les données numériques du trafic Internet, par multiplexage en longueur d'onde. Comme la compensation du bruit de propagation nécessite une propagation bidirectionnelle, le signal ultrastable contourne les équipements unidirectionnels du réseau de télécommunications et est amplifié par des amplificateurs bidirectionnels. Ces amplificateurs, ainsi que les stations optoélectroniques, sont en cours de développement par un consortium de trois sociétés, Muquans, Syrlinks et Keopsys. Dans une seconde phase, il est prévu d'étudier les possibilités d'un transfert de temps simultané au transfert de fréquence.

REFIMEVE+ constitue une première étape pour la construction d'un réseau à l'échelle européenne avec une extension déjà réalisée vers l'Allemagne.

### 3.2.7 VLBI/VGOS

Le réseau international VGOS (VLBI Global Observing System) est le réseau d'observation VLBI nouvelle génération de l'IVS (International VLBI Service for geodesy and astrometry).

Les objectifs scientifiques de ce nouveau réseau sont : (i) d'établir un repère de référence terrestre ultra-précis, de niveau millimétrique à l'échelle de la Terre ; (ii) de suivre en continu la rotation de la Terre qui n'est pas prédictible à court terme ; et (iii) d'établir et de maintenir un repère de référence céleste ultra-précis, basé sur la position de sources extragalactiques compactes déterminées avec une précision meilleure que 50  $\mu$ s, conjointement avec un suivi de leur évolution morphologique avec le même niveau de résolution. Les enjeux scientifiques du projet couvrent un large domaine allant de la géophysique à l'astrophysique, ceux-ci concernant à la fois la dynamique et le mouvement de la Terre (déformations de la croûte, atmosphère, rotation,...) et les objets qui matérialisent le repère de référence céleste (morphologie des sources, stabilité de la position de ces sources, cosmologie,...).

Le concept des antennes VLBI nouvelle génération ainsi que les systèmes d'acquisition de données afférents ont été étudiés de façon à ce que le futur réseau VGOS intégrant ces antennes puisse atteindre les précisions voulues. Ceci a abouti aux spécifications suivantes :

- Antennes de petite taille (12 m de diamètre) et ultra-mobiles (vitesses de 12°/s en azimut et de 6°/s selon la hauteur), permettant d'accroître le volume d'observations acquis en 24h d'un ordre de grandeur.
- Antennes très solides mécaniquement pouvant observer 24h sur 24 et 365 jours par an, afin de pouvoir suivre en continu la rotation de la Terre.
- Système d'observation large bande (2-14 GHz) permettant de compenser la petitesse de l'antenne via l'enregistrement d'une plus grande largeur de bande et ainsi de conserver approximativement la même sensibilité qu'aujourd'hui.
- Transmission des données par réseau très haut débit spécialisé avec corrélation dans la foulée ou en temps réel, permettant d'obtenir les résultats sous 24h, ce qui est essentiel pour le suivi de la rotation de la Terre.

Comme le montre la Figure 4, une vingtaine d'antennes de ce type sont aujourd'hui achevées ou en construction dans le monde, dont la plupart se situe dans l'hémisphère nord. Dans ce contexte, le projet de la communauté française est d'implanter une telle antenne à Tahiti. En effet, compte tenu du nombre d'antennes déjà prévues en Europe, il y aurait peu d'intérêt à en rajouter une nouvelle en métropole. A l'inverse, le Pacifique Sud est dépourvu de stations VLBI, ce qui a un impact significatif sur la qualité du réseau, une distribution des sites homogène à l'échelle de la planète étant en effet cruciale pour atteindre le niveau de précision voulu. Des simulations montrent ainsi que le rajout d'une seule antenne dans le Pacifique Sud permettrait



d'améliorer la précision des paramètres d'orientation de la Terre de 30% (Mac Millan 2011) tandis qu'une étude d'optimisation du réseau (Hase & Pedreros 2014) place Tahiti en seconde priorité à l'égard de l'implantation d'un nouveau site. Une telle implantation est essentielle et appelée de tous ses vœux par la communauté internationale.

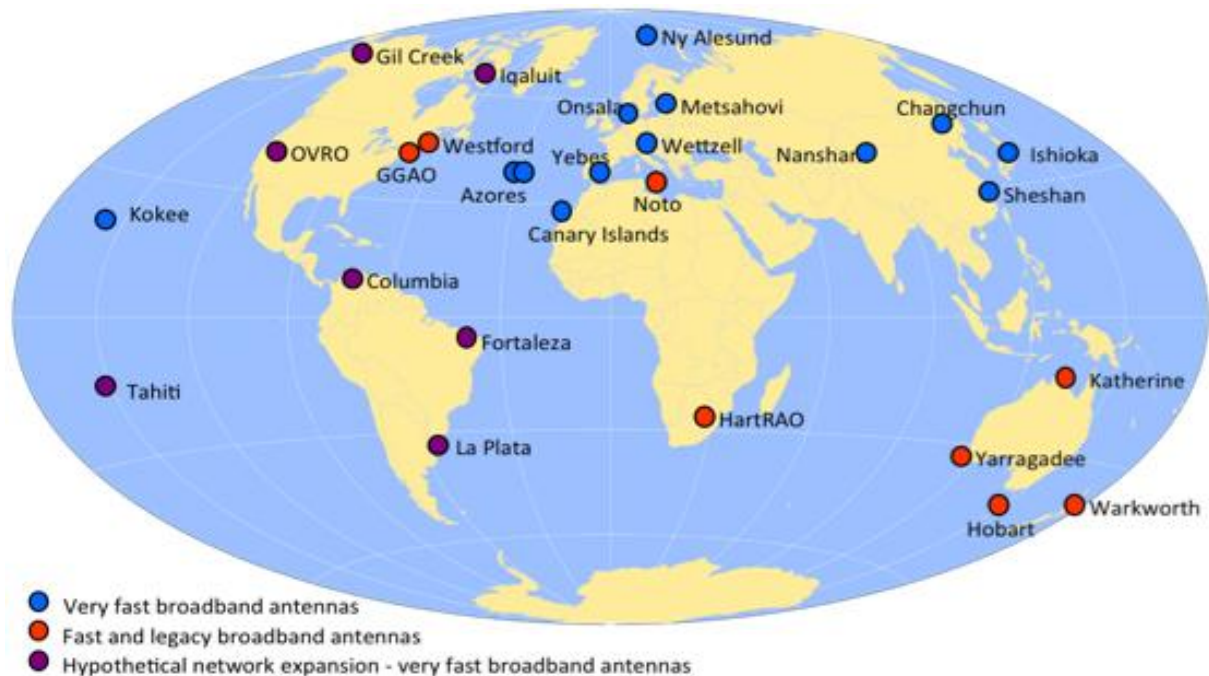


Figure 4. Réseau international des antennes VLBI

### 3.2.8 MIGA : Antenne gravitationnelle basée sur l'interférométrie atomique

MIGA est un interféromètre pour l'observation du champ gravitationnel de la Terre. Il est constitué par la construction d'une infrastructure nouvelle permettant d'étudier les déformations de l'espace-temps et de la gravitation. En utilisant une nouvelle approche pour la mesure de ces contraintes, basée sur l'utilisation de techniques d'interférométrie atomique, cette infrastructure permettra de mieux comprendre les variations du champ de gravité terrestre. Les applications du projet MIGA s'étendent de la surveillance de l'évolution du champ gravitationnel terrestre jusqu'à fournir un nouvel outil pour détecter les ondes gravitationnelles. En combinant la géophysique et la physique fondamentale dans une seule infrastructure, MIGA constitue une étape sans précédent dans la compréhension des phénomènes géophysiques et permettra à terme d'améliorer les détecteurs d'ondes gravitationnelles actuels et futurs.

Le projet MIGA a été sélectionné en 2011 lors de la deuxième vague de sélection des projets d'Equipements d'Excellence dans le cadre du grand emprunt. Le projet, piloté par Philippe Bouyer du LP2N à Bordeaux et dans lequel les équipes du GRAM jouent un rôle moteur, est une collaboration entre 15 laboratoires de recherche, et 3 industriels. Le projet est actuellement dans sa phase de développement. Elle sera suivie par une phase d'implémentation avec la construction de l'antenne dans le Laboratoire Souterrain Bas Bruit (LSBB) à Rustrel, puis d'une phase d'exploitation. Cet équipement contribuera à maintenir la France parmi les leaders dans de nombreux domaines comme la physique fondamentale, l'interférométrie à ondes de matière, la géophysique et l'astronomie des ondes gravitationnelles.

### 3.2.9 Gravity

GRAVITY est l'un des deux instruments de deuxième génération du VLTI. C'est un recombineur à 4 télescopes fonctionnant dans la bande K (2 à 2,4  $\mu\text{m}$ ) à vocation généraliste permettant l'observation en mode référence de phase. GRAVITY a été dimensionné pour l'observation du centre galactique. Il est doté d'un suiveur de franges à 4 faisceaux, de 4 optiques adaptatives, de deux recombineurs (un pour la voie scientifique et un pour la voie de référence) et d'une métrologie permettant la mesure des différences de marches relatives entre voies scientifique et de référence avec une précision de quelques nanomètres dans le but d'atteindre une précision astrométrique de 10 micro-secondes d'angle correspondant à la dimension apparente du rayon de Schwarzschild de Sgr A\*. GRAVITY est entré en phase de réalisation en janvier 2012. L'expédition de l'instrument à Paranal est prévue au printemps 2015 pour une première lumière fin 2015.

GRAVITY est un instrument généraliste mais a été conçu dans l'optique d'observer Sgr A\* pour élucider sa nature ainsi que celle de son environnement et pour étudier la relativité générale en champ fort. La mode imagerie de GRAVITY permettra la mesure des orbites des étoiles à quelques centaines d'unité astronomique du trou noir et la mise en évidence d'effets relativistes pour potentiellement remonter au taux de rotation et au moment quadropolaire du trou noir et tester le théorème d'absence de chevelure des trous noirs. Le mode astrométrique permettra d'utiliser les sursauts pour mesurer la métrique d'espace-temps en champ fort et tester ainsi la théorie de la relativité générale dans ce régime.

### 3.2.10 SKA

Le Square Kilometre Array (SKA) est un interféromètre qui couvrira les bandes de fréquence radio métrique et centimétrique avec une surface collectrice totale attendue à terme de 1 km<sup>2</sup>. L'instrument sera installé conjointement en Afrique du Sud et en Australie à l'horizon 2020-2025. Grâce à sa surface collectrice mais aussi à son champ de vue instantané beaucoup plus vaste, ainsi qu'à l'usage massif de nouvelles technologies pour l'acquisition et le traitement des données, SKA sera 50 fois plus sensible que les plus grands instruments de radioastronomie actuels et permettra de cartographier le ciel 1000 fois plus rapidement.

Les objectifs scientifiques visés avec SKA sont extrêmement variés et couvrent de vastes champs de l'astronomie et de la physique fondamentale : cosmologie, époque de la ré-ionisation, magnétisme cosmique, astrophysique galactique et extragalactique, pulsars, objets transients, planètes extra-solaires, ... Y figurent notamment en tant que programme clé des tests de la gravité en champ fort, via l'observation de pulsars et de trous noirs. Comme indiqué dans le paragraphe 3.2.2, le chronométrage des pulsars a en effet pour objectif de détecter les ondes gravitationnelles primordiales et, dans le cas de systèmes binaires ou triples, à tester les prédictions de la Relativité Générale en régime de champ fort.

SKA pourra de plus aussi être utilisé comme élément d'un réseau VLBI intercontinental, sa composante située en Afrique du Sud étant idéale pour une utilisation conjointe avec le réseau VLBI européen (EVN), renforçant ainsi la résolution Nord-Sud de ce réseau qui est une déficience actuelle. Un tel réseau VLBI incluant SKA permettra par ailleurs de gagner un facteur 10 en sensibilité, rendant ainsi un plus grand nombre de sources accessibles à l'observation. Qu'il s'agisse d'astrométrie absolue (systèmes de référence, lien avec le repère optique Gaia) ou différentielles (mesure de distance et de mouvements propres), SKA permettra des avancées majeures dans ces domaines d'intérêt pour la communauté GRAM.



### 3.3 Description des moyens intégrés, observations et exploitation de données.

#### 3.3.1 INPOP

Depuis 2006, INPOP est devenu une référence mondiale pour la navigation spatiale, la dynamique des objets du Système solaire, et la physique fondamentale. Avec l'utilisation des données VEX et MEX de l'ESA, des observations LLR et le développement de nouveaux modèles d'éphémérides et de nouveaux ajustements pour les planètes et la Lune, INPOP08 et INPOP10a ont établi INPOP à la pointe d'éphémérides planétaires globales. Plusieurs versions ont été construites jusqu'à la dernière, INPOP13c. INPOP est l'éphéméride planétaire officielle de Gaia, pour la navigation de la sonde ainsi que pour l'exploitation scientifique de la mission. L'équipe INPOP (Géoazur / IMCCE) est également impliquée dans la préparation de Bepi Colombo et JUICE. Les livraisons régulières des éphémérides INPOP sont effectuées par l'intermédiaire du site <http://www.imcce.fr/inpop>. Positions et vitesses des planètes et de la Lune, les angles de rotation de la Terre et la Lune sont fournis aux utilisateurs ainsi que la différence entre le temps terrestre et le temps dynamique barycentrique (TT-TDB).

Les éphémérides planétaires sont également utilisées comme un outil très efficace pour de nombreuses applications scientifiques. Avec INPOP, les déterminations de l'aplatissement du Soleil, du paramètre post Newtonien  $\beta$ , et les estimations des avances des périhélie des huit planètes du Système solaire ont été obtenus avec une grande précision. Aucun écart de  $\beta$  par rapport à l'unité n'a pu être mis en évidence, confirmant la validité de la relativité générale au niveau de quelques  $10^{-5}$ . Les contraintes supplémentaires de INPOP sur les avances des nœuds et périhélie des planètes donnent des contraintes strictes sur les modèles cosmologiques de gravité tels que MOND. De nouvelles contraintes ont été obtenues pour la physique des vents solaires, et 48 nouvelles déterminations de masses d'astéroïdes ont été proposées. Les éphémérides planétaires INPOP ont un rôle important dans des domaines très différents, y compris la préparation de missions spatiales.

INPOP fournit aussi une détermination précise du vecteur Terre-Lune et de l'orientation de la Lune. Le modèle de l'orbite et de la rotation de la Lune inclut des effets dynamiques complexes tels que les effets de figure entre le Soleil, la Lune et la Terre non sphériques, et des planètes ponctuelles, les effets des marées et les effets figure-figure entre la Terre et la Lune non-rigides. Les ajustements aux observations LLR permettent d'obtenir aussi des coefficients connexes tels que les coefficients du potentiel de la terre et de la Lune, en visant à une meilleure compréhension de la rotation de la Lune.

#### 3.3.2 NAROO (New Astrometric Reduction of Old Observations)

La métrologie du système solaire a besoin d'être réalisée sur des intervalles de temps longs pour une bonne modélisation de la dynamique de ce système. Outre la réalisation continue d'observations astrométriques au sol ou dans l'espace, la recherche d'observations anciennes permet d'étendre l'échantillonnage d'observations vers le passé. Ces observations anciennes sont indispensables pour modéliser les effets cumulatifs, en particulier liés aux marées dans les systèmes de satellites des planètes géantes et valider les modèles de formation et d'évolution de ces systèmes. Elles sont aussi indispensables pour obtenir des éphémérides (planètes, astéroïdes, satellites naturels, comètes) que l'on peut extrapoler dans le futur pour la préparation des missions spatiales.

L'arrivée prochaine du catalogue de référence Gaia va nous permettre d'effectuer une nouvelle réduction astrométrique des observations anciennes et ainsi d'observer "dans le passé" avec la

précision d'aujourd'hui (Figure 5). Le catalogue Gaia va fournir les positions des étoiles de référence présentes sur les plaques du début du XX<sup>ème</sup> siècle avec une précision de l'ordre de 2 millisecondes d'arc.

Un effort particulier doit être fait dans les années à venir sur la sélection, l'analyse et la réduction des observations astrométriques du XX<sup>ème</sup> siècle des corps du système solaire afin d'obtenir un échantillonnage d'observations permettant de valider les modèles dynamiques actuels. Dans le cadre du projet NAROO, un scanner sub-micrométrique doit être installé à l'observatoire de Paris (Meudon) pour numériser les plaques photographiques sélectionnées pour la métrologie du système solaire. A noter que l'analyse automatique des plaques astrographiques, en particulier des plaques de Schmidt conservées à l'OCA, va permettre, non seulement une nouvelle réduction astrométrique mais aussi d'effectuer des pré-découvertes d'astéroïdes TNO ou géocroiseurs et de comètes non détectés lors de la première réduction effectuée peu après l'observation.

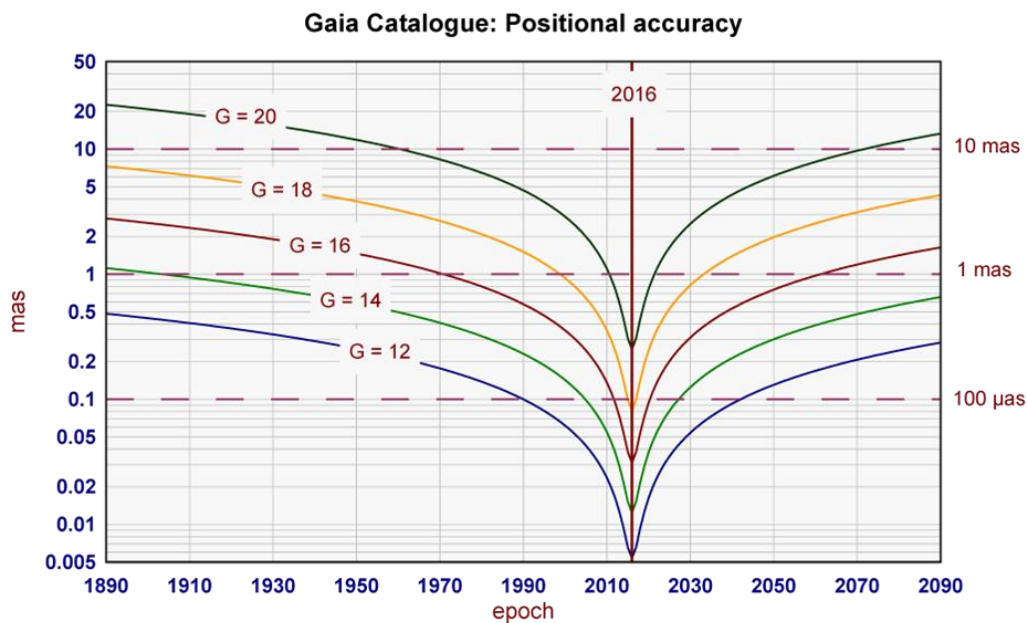


Figure 5. Précision des positions d'étoiles extrapolées dans le temps à partir du futur catalogue GAIA

### 3.3.3 PODET

L'environnement spatial de la Terre est d'un intérêt grandissant pour des aspects théoriques de recherche sur des axes liés à l'astronomie, la dynamique et la mécanique céleste, la physique solaire, la planétologie ainsi que pour des aspects sociétaux. Cette thématique recouvre, en suivant le cadre du SSA (Space Situational Awareness) de l'ESA, la météorologie de l'espace, le suivi des débris spatiaux et la caractérisation dynamique et physique des objets géocroiseurs. Le pôle PODET, pôle sur la dynamique de l'environnement spatial, développé à l'IMCCE s'inscrit dans ce cadre et recouvre l'étude des objets géocroiseurs, astéroïdes - météoroïdes - comètes, essaims météoritiques et celle des débris spatiaux. Le pôle regroupe en amont des aspects de recherche, et des aspects de service en aval, avec des axes de développement communs pour les 3 types d'objets étudiés (météorites, débris spatiaux, géocroiseurs).

S'agissant de phénomènes rares, voire extrêmement rares, et de risques, des approches et modélisations différentes et complémentaires sont nécessaires pour toute validation des résultats. Les activités de recherche couvrent des observations spécifiques ou en alerte, des aspects de modélisation orbitale et de théorie, la propagation court et/ou long-terme des orbites et des erreurs, l'intégration numérique et calcul intensif, les prévisions et calculs de probabilités d'impact. À cela s'ajoutent des aspects de service avec la diffusion des résultats via notamment un site web dynamique, ainsi que la mise en place de bases de données, d'outils de diffusion interopérables et sous format Observatoire virtuel. Enfin, des actions de diffusion des connaissances, cours, TP et conférences complètent les activités PÔDET.

Au niveau national, Le CNES mène des activités sur les débris spatiaux notamment en conformité avec la loi d'orientation spatiale (LOS), et d'autres sur les rentrées atmosphériques des corps artificiels (débris spatiaux) et corps naturels (astéroïdes-météoroïdes). Les activités de service SNO entrent dans le cadre du SO6 défini par l'INSU. Enfin des liens sont tissés au sein de l'Observatoire de Paris avec la météorologie de l'espace (action fédératrice ESTERS associant les départements IMCCE, LESIA, USN NAÇAY et LPP) et avec l'ONERA pour la caractérisation des entrées atmosphériques.

Ces questions sont également prises en compte au niveau international : outre le programme SSA de l'ESA (auquel la France a participé pour la première phase 2009-2012), la commission européenne soutient des activités de recherche pour la mitigation et caractérisation des objets géocroiseurs et de suivi des débris. (PROTECT1 et PROTECT2 du programme cadre H2020). L'ONU avec le COPUOS a mis en place le IAWN (International Asteroid Warning Network) et le SMPAG (Space Mission Planning Advisory Group), et l'UAI un groupe de travail sur les géocroiseurs.

### 3.3.4 Services internationaux IVS, ILRS, IERS, BGI

La France participe de manière très importante à différents services internationaux liés aux thématiques de GRAM. Les produits opérationnels et scientifiques délivrés par ces services sont, schématiquement :

- La réalisation et la maintenance du système de référence céleste ;
- La réalisation et la maintenance du système de référence terrestre ;
- Le calcul de paramètres de rotation de la Terre, compléments à la théorie issus de l'observation, permettant de faire le lien entre système terrestre et système céleste ;
- Le temps français et une contribution à UTC (voir section 3.2.4) ;
- Mesures et modélisations du champ de gravité de la Terre avec ses variations temporelles.

Tout d'abord plusieurs centres de coordination ou décisionnaires sont hébergés dans des laboratoires français :

- Trois centres de produit du Service International des Systèmes de Référence et de la Rotation de la Terre (IERS) :
  - Le centre de l'Orientation Terrestre (Observatoire de Paris), est responsable de la collecte d'information sur la rotation de la Terre et du calcul et de la distribution de séries de référence pour des applications liées à la métrologie des systèmes de référence ainsi que pour la recherche en géophysique. Ce service est également responsable de la décision de l'introduction de la seconde intercalaire dans l'échelle de temps UTC ;

- Le centre du Système International de Référence Céleste (ICRS) (Observatoire de Paris) est responsable, conjointement avec l'US Naval Observatory, de la réalisation et de la maintenance de l'ICRS ;
- L'IGN héberge, au sein du LAREG, le centre des systèmes terrestres, qui est responsable de la réalisation et maintenance du Système de Référence Terrestre International (ITRS);
- Le Bureau Gravimétrique International (Observatoire Midi-Pyrénées) gère et développe une base de données gravimétriques et offre également toute une palette de services annexes, couvrant la valorisation des données et l'expertise au sens large en gravimétrie.

Les laboratoires français hébergent également des centres d'analyse, c'est-à-dire des centres agréés au niveau international qui calculent une version des produits concernés, l'ensemble des versions au niveau international étant fusionnées par le centre de coordination :

- Deux centres d'analyse IVS (Observatoire de Bordeaux et Observatoire de Paris) qui sont en charge de l'analyse opérationnelle des sessions VLBI et contribuent également aux diverses campagnes ITRS ;
- Un centre d'analyse ILRS des données de télémétrie laser satellite pour les systèmes de référence (Observatoire de Paris, Observatoire de la Côte d'Azur, IMCCE, Observatoire Midi-Pyrénées)
- Un centre d'analyse ILRS des données de télémétrie laser lune pour les systèmes de référence (Observatoire de Paris).

Ces services sont des préalables indispensables pour les études scientifiques, qui bénéficient ainsi de tout l'investissement réalisé dans le cadre des tâches de service du CNAP.

## 4 GRAM en chiffres et en actions

### 4.1 Structure et organisation

L'AS GRAM est animée par un conseil scientifique d'une grosse quinzaine de membres représentant au mieux les différentes techniques et thématiques de GRAM. Des représentants des tutelles (INSU, INP, CNES) sont invités permanents à ce conseil. Le Tableau 5 donne la composition du CS pour la période 2010-2014 tandis que la Tableau 6 présente le conseil renouvelé pour 2015.

Le conseil se réunit 2 fois par an, typiquement en mars et en novembre.

La présidence du conseil scientifique et l'exécution de ses recommandations (direction du GRAM) sont assurées par deux responsables. En pratique ces deux responsables ont des profils complémentaires de façon à couvrir au mieux les thématiques de GRAM.

Nom	Domaine	Appartenance	Laboratoire
A. Amy-Klein	Instrumentation, Métrologie Temps	INP	LPL
R. Biancale	Navigation sondes spatiales, géodésie spatiale	CNES	CNES
S. Bize	Horloges à atomes froids, Instr. Phys. Fond	INP	SYRTE
L. Blanchet	Phys. Fond. Théo, OG	INP	IAP
C. Caprini	Cosmo, Astroparticules	INP	IPhT
P. Charlot	Syst. Réf., rotation terre, VLBI	INSU	LAB
B. Christophe	Instr. Phys. Fond., Acceleros	ONERA	DMPH
P. Fayet	Phys. Fond. Théo.	INP	LPTENS
A. Landragin	Senseurs inertiels à atomes froids, Instr. Phys. Fond.	INSIS	SYRTE
J. Laskar	Ephémérides, dynamique orbitale	INSU	IMCCE
<b>G. Métris</b>	Méca céleste, navigation sondes, géod. spatiale	INSU	GéoAzur
F. Mignard	Astrométrie, Phys. Fond.	INSU	CASSIOPEE
E. Plagnol	Astroparticules, Cosmologie	IN2P3	APC
S. Reynaud	Phys. Fond. Exp. et Théo.	INP	LKB
E. Samain	Liens laser, géodésie spatiale	INSU	GéoAzur
P. Tuckey	Métrologie Temps, Astro., Phys. Fond. Théo	INSU	SYRTE
<b>P. Wolf</b>	Phys. Fond. Théo et exp.	INSU	SYRTE

Tableau 5. Conseil scientifique de GRAM 2010-2014

En gras les responsables actuels de l'AS-GRAM

- **Représentant de l'INSU : Jean-Pierre Lasota puis Claude Zeippen**
- **Représentant de l'INP : Noël Dimarcq**
- **Représentant du CNES : Sylvie Léon-Hirtz**

Nom	Domaine	Appartenance	Laboratoire
A. Amy-Klein	Instrumentation, Métrologie Temps	INP	LPL
R. Biancale	Navigation sondes spatiales, géodésie spatiale	CNES	CNES
S. Bize	Horloges à atomes froids, Instr. Phys. Fond	INP	SYRTE
L. Blanchet	Phys. Fond. Théo, OG	INP	IAP
C. Caprini	Cosmo, Astroparticules	INP	IPhT
P. Charlot	Syst. Réf., rotation terre, VLBI	INSU	LAB
C. Courde	Liens laser, géodésie spatiale	INSU	GéoAzur
H. Halloin	Ondes Grav.	IN2P3	APC
J. Laskar	Ephémérides, dynamique orbitale	INSU	IMCCE
<b>G. Métris</b>	Méca céleste, navigation sondes, géod. spatiale	INSU	GéoAzur
J. Novak	Phys. Fond. Théo.	INSU	LUTH
F. Pereira	Instr. Phys. Fond., senseurs inertiels à atomes froids,	INSIS	SYRTE
S. Reynaud	Phys. Fond. Exp. et Théo.	INP	LKB
M. Rodrigues	Instr. Phys. Fond., Acceleros	ONERA	DMPH
<b>P. Tuckey</b>	Métrologie Temps, Astro., Phys. Fond. Théo	INSU	SYRTE
P. Wolf	Phys. Fond. Théo et exp.	INSU	SYRTE

Tableau 6. Conseil scientifique de GRAM en 2015

En gras les responsables actuels de l'AS-GRAM

- **Représentant de l'INSU : Michel Perault**
- **Représentant de l'INP : Noël Dimarcq**
- **Représentant du CNES : Sylvie Léon-Hirtz**

## 4.2 Communauté liée aux thématiques de GRAM

Cerner les limites d'une communauté est un exercice qui se heurte à plusieurs difficultés.

Tout d'abord il existe des thèmes de recherche qui sont à la frontière de plusieurs structures scientifiques mais qu'il est difficile de scinder de façon objective en terme de ressources humaines ; dans le cas de GRAM on peut donner quelques exemples : les activités liées aux systèmes de référence terrestre (très liés aux systèmes de référence céleste), l'étude du champ de gravité de la Terre (sous produit de nombreux projets spatiaux), les ondes gravitationnelles, les horloges et senseurs inertiels atomiques,...

D'autre part, au sein d'un laboratoire ou d'une équipe concerné par une ou plusieurs thématiques de GRAM, il n'est pas toujours simple de séparer le personnel travaillant sur ces thématiques.

Enfin, il est clair que les personnes effectivement impliquées dans nos thématiques ne le sont pas forcément à temps plein.

Les chiffres que nous citons ont été obtenus en compilant les résultats d'une enquête envoyées à un contact (souvent le responsable mais pas toujours) par laboratoire ou équipe que nous avons estimé impliqué dans les thématiques de GRAM. Cette enquête était très simplifiée dans le but d'obtenir un fort taux de retour (ce qui a été le cas à 90%).

Une enquête assez similaire avait été menée en 2009 pour la création de l'AS GRAM. Nous avons identifié 24 groupes (un groupe étant tout ou partie d'un laboratoire, éventuellement réduit à toute ou partie d'une équipe) impliqués à cette époque contre 30 en 2014. Corrélativement, le nombre de personnels (toutes catégories confondues) recensé est passé de un peu plus de 300 à un peu plus de 450. Dans le même temps, le nombre de chercheurs permanents est passé de 175 à 200. Ces chiffres sont à considérer avec précaution pour les raisons mentionnées ci-dessus.

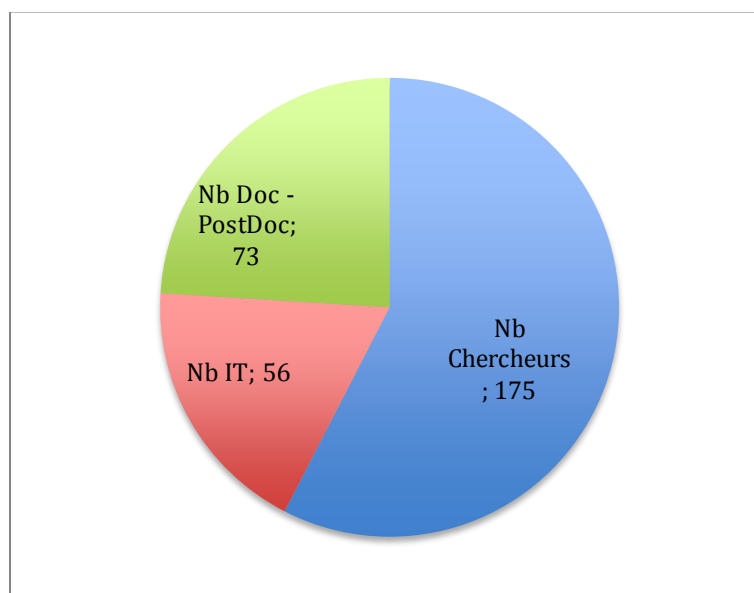


Figure 6. La communauté GRAM en 2009



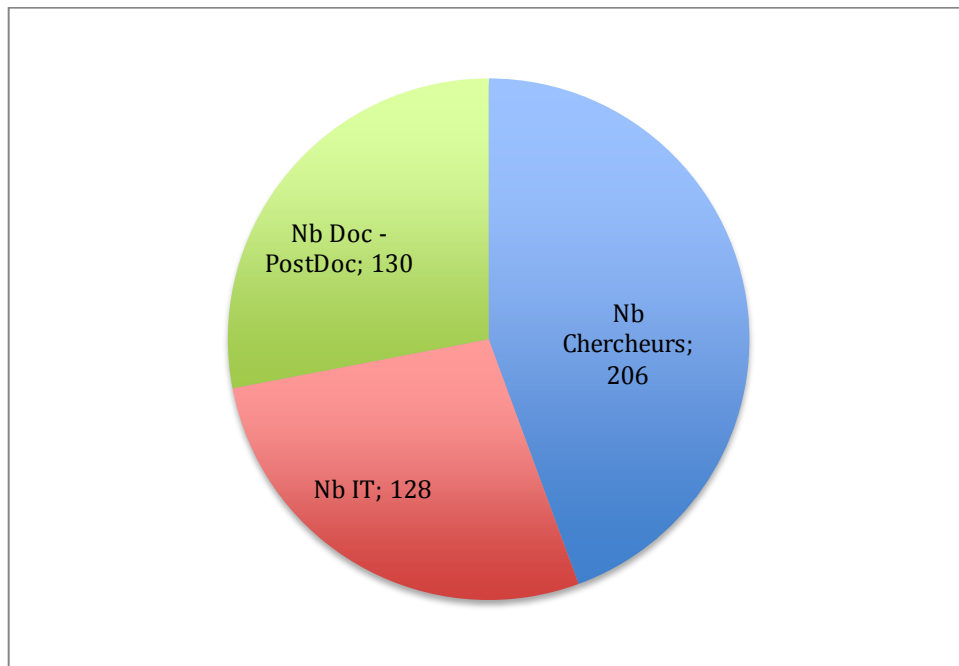


Figure 7. La communauté GRAM en 2014

#### 4.3 Budget

Les recettes de l'AS GRAM proviennent du soutien des 3 tutelles actuelles : l'INSU et l'INP ont des contributions identiques au niveau de 20 k€ par an et le CNES a une contribution équivalente à la somme, soit 40 k€ par an. Le budget de GRAM est donc typiquement de 80 k€ par an.

Le principal poste de dépenses (86 %) est naturellement le soutien à des actions sélectionnées chaque année à la suite de réponses à un appel à propositions (cf section suivante pour plus de détails). Le poste suivant concerne l'organisation des journées scientifiques de GRAM (organisées en 2010 et en 2014 mais vont devenir bisannuelles).

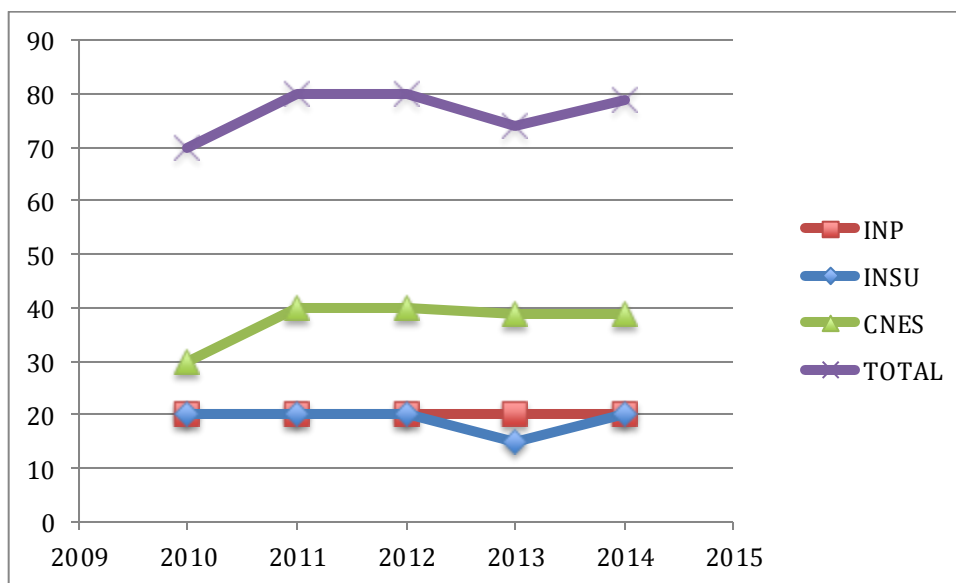


Figure 8. Evolution du budget de l'AS GRAM

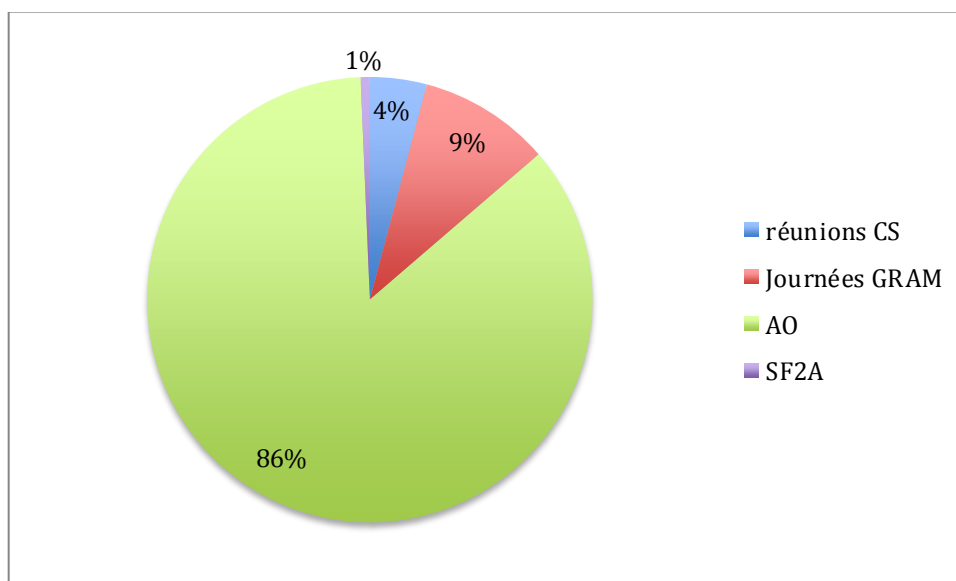


Figure 9. Répartition des dépenses de l'AS GRAM sur la période 2010-2014

#### 4.4 Actions soutenues

Comme tous les programmes nationaux et les autres actions spécifiques, GRAM soutient chaque année des actions de recherche sur appel à propositions. Les types d'actions soutenues sont :

- Des équipements, contributions aux expériences terrestres ou à la R&T spatiale
- Des activités d'analyse de données et de modélisation (eg. achat de données, moyens de calcul lourds, etc...)
- Des collaborations entre équipes et actions structurantes
- Des colloques et écoles thématiques.

Nous avons financé 15 à 20 projets par an (67 au total sur 4 ans) pour des montants variant de 1 à 18 k€ (moyenne de 5,25 k€).

La

Figure 10 et la Figure 11 présentent la répartition des financements entre les différents types d'action, d'une part en nombre et d'autre part en volume. On constate que si le soutien à l'organisation de (ou à la participation à des) colloques est important en nombre, c'est le financement d'expériences qui domine en volume (le financement par projet est logiquement plus élevé pour des expériences). Chaque type de financement a son intérêt et ses mérites mais il faut noter que dans plusieurs cas, le soutien de GRAM a permis de démarrer ou de consolider un projet qui a pu ainsi être validé et obtenir des financements beaucoup plus importants. Ainsi, les financements de GRAM ont contribué à l'obtention de 3 ANR, 1 contrat dans le cadre d'un IDEX, un contrat « Emergence » de la ville de Paris, et sur le dépôt de 2 brevets. Par ailleurs deux grands projets qui étaient soutenus par la GRAM depuis des nombreuses années, et continuent de l'être, sont devenus des EQUIPEX (MIGA et REFIMEVE+). On constate donc là le rôle clé que peut jouer une structure comme le GRAM, qui permet avec des moyens relativement faibles d'organiser et structurer une communauté afin d'améliorer ses chances d'obtenir des financements plus importants dans un deuxième temps, voire de traverser les périodes difficiles entre deux financements consécutifs.

La Figure 12 et la Figure 13 présentent la répartition entre deux groupes de thématique de GRAM : astronomie fondamentale, systèmes de référence, mécanique céleste d'une part et physique fondamentale d'autre part. La physique fondamentale a une part un peu plus importante. Notons que nous avons identifié également les projets émergeant dans les deux thématiques et qu'ils représentent un petit tiers des financements.

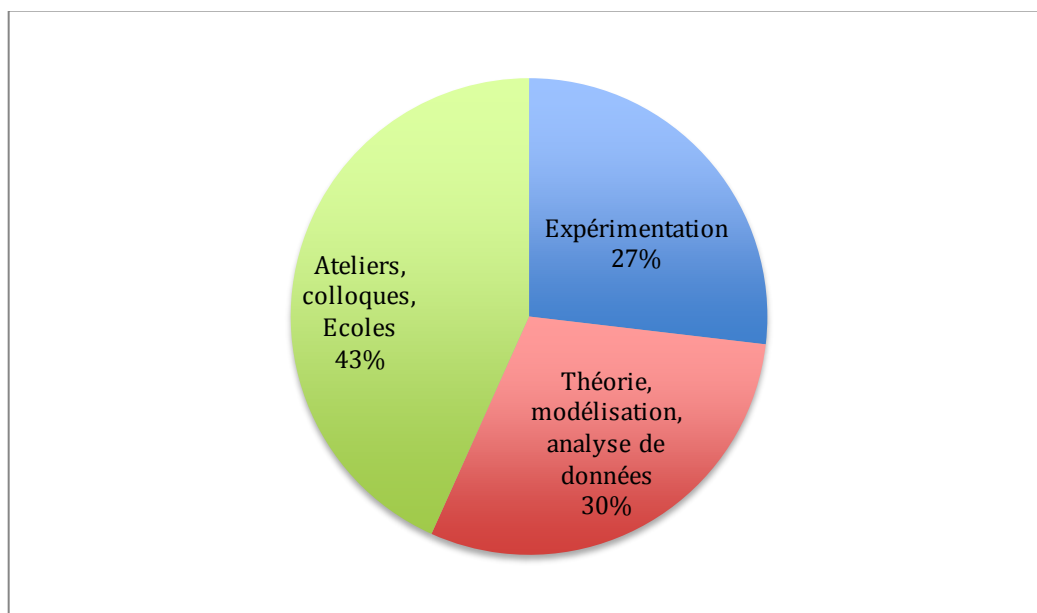


Figure 10. Répartition (en nombre) par type d'action des soutiens GRAM

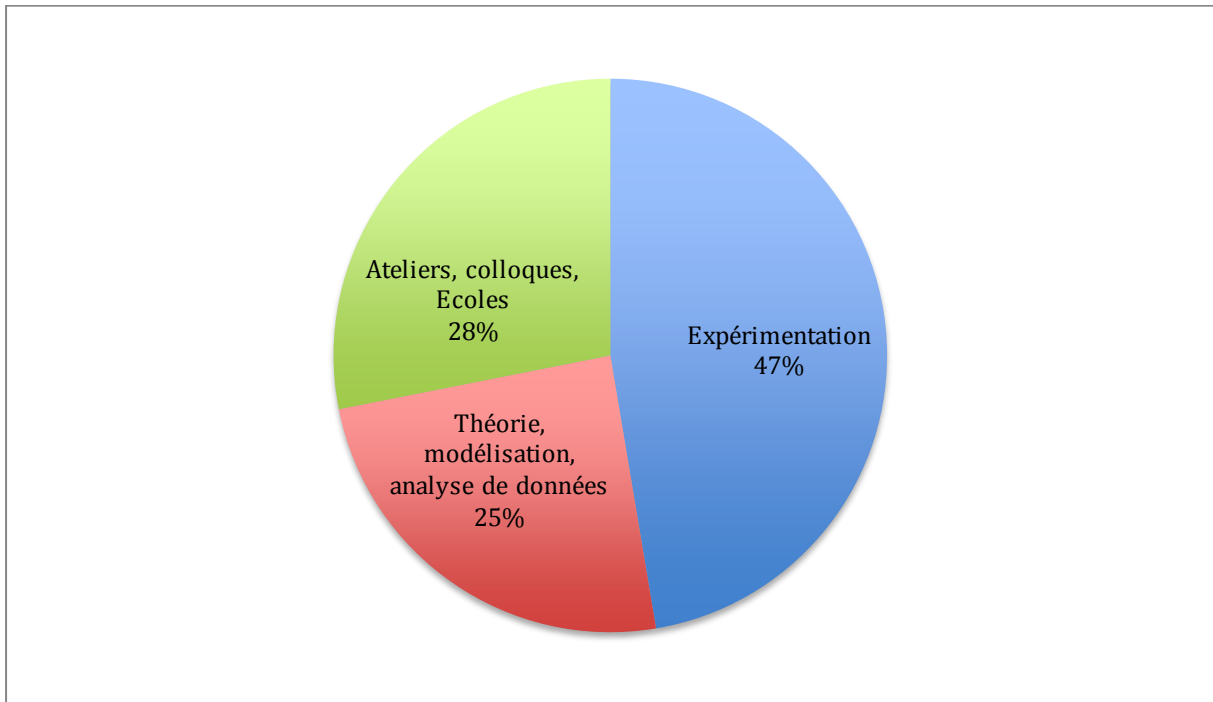


Figure 11. Répartition (en volume) par type d'action des soutiens GRAM

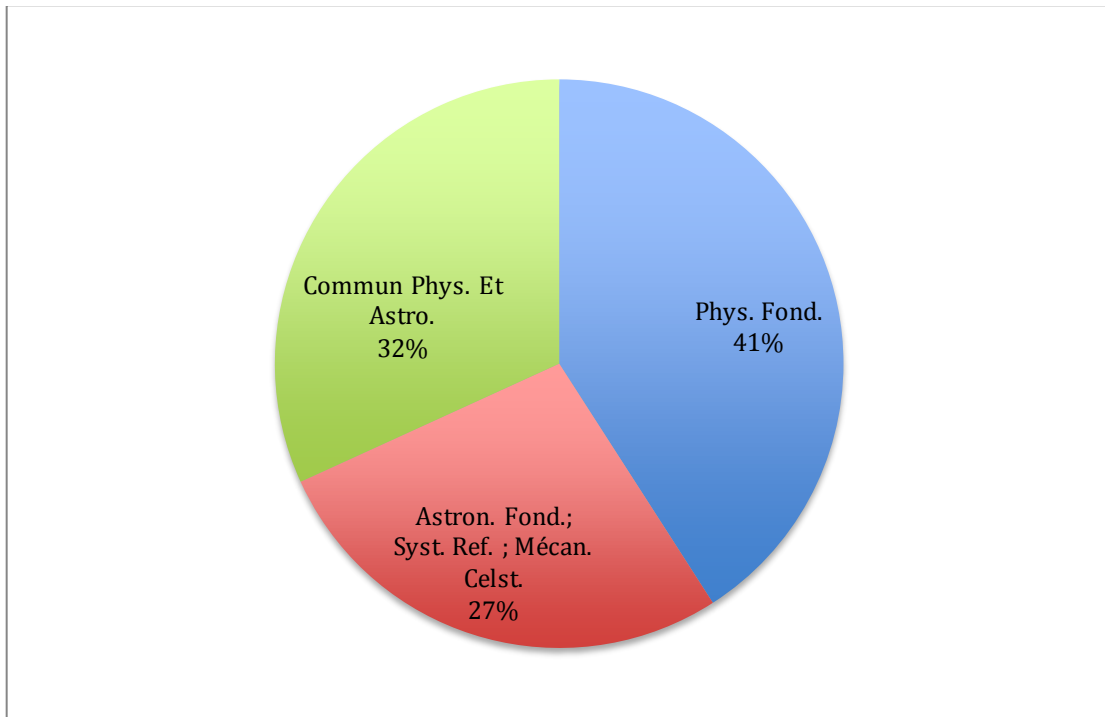


Figure 12. Répartition (en nombre) par domaine des soutiens GRAM

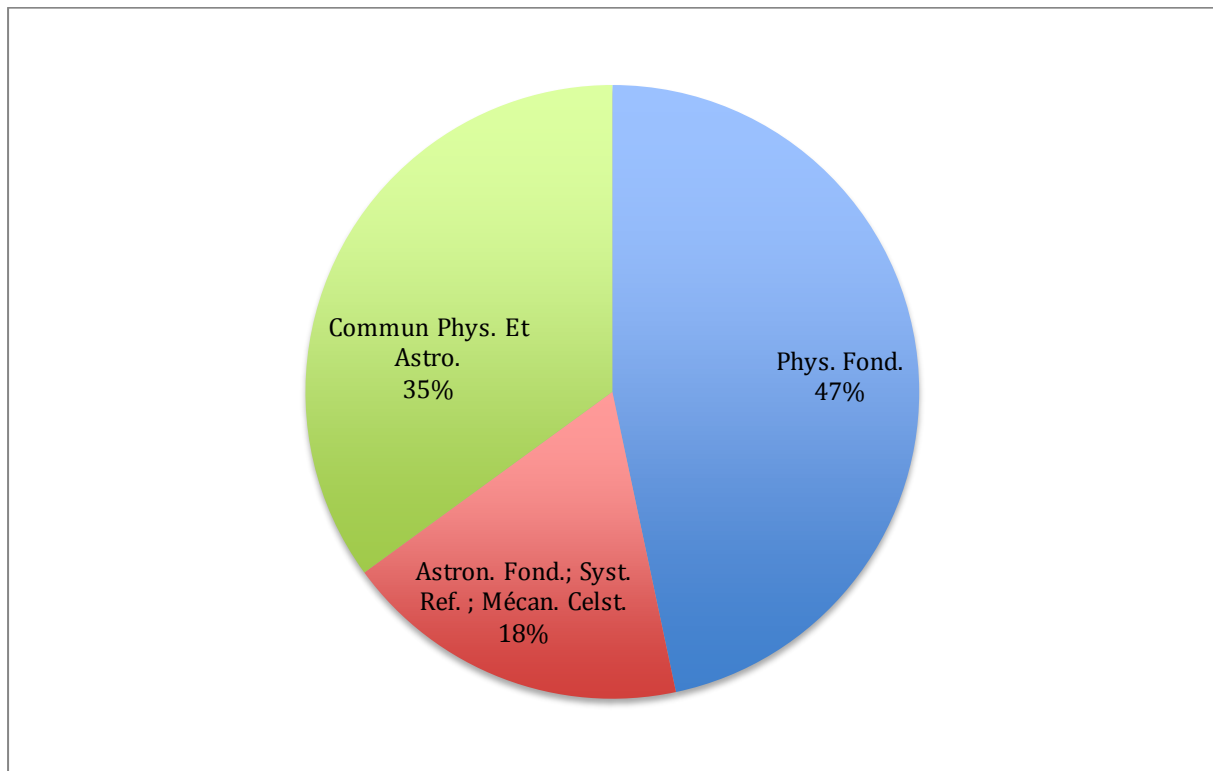


Figure 13. Répartition (en volume) par domaine des soutiens GRAM

On peut trouver l'intitulé de l'ensemble des actions financées sur la page [http://gram.oca.eu/soutiens GRAM.html](http://gram.oca.eu/soutiens_GRAM.html).

#### 4.5 Rencontres scientifiques

Au delà du soutien apporté, dans le cadre de l'AO annuel pour l'organisation de colloques, d'écoles et d'ateliers, GRAM participe directement à l'organisation de rencontres scientifiques.

Des journées scientifiques de l'AS GRAM ont été organisées en 2010 à Nice (90 participants, [http://gram.oca.eu/Workshop/2010\\_Journees\\_GRAM/journees.html](http://gram.oca.eu/Workshop/2010_Journees_GRAM/journees.html)) et en 2014 à Bordeaux (60 participants en raison de la concurrence de plusieurs autres événements proches, <http://jsgram2014.sciencesconf.org>). Ces journées permettent de regrouper les différentes thématiques de GRAM dans une même conférence, et aussi de faire un exercice de bilan et prospective.

Par ailleurs l'AS GRAM organise des ateliers annuels lors de la semaine de l'astrophysique. En 2012 nous avons organisé, en plus de l'atelier GRAM, un atelier commun avec l'AS GAIA. Logiquement, ces ateliers sont fréquentés majoritairement par la composante INSU de GRAM. Aussi, de façon complémentaire, GRAM va participer activement, à partir de 2015, à la session gravitation des rencontres de Moriond (<http://moriond.in2p3.fr/J15/>) qui a lieu tous les 4 ans.

## 5 Conclusion

L'existence d'une structure regroupant les thématiques Gravitation, Systèmes de référence d'espace et de temps, Astronomie fondamentale et techniques de Métrologie associées, pour compléter la structuration des sciences de l'Univers sous l'égide de l'INSU (en association avec l'INP et le CNES), était souhaitée depuis un certain temps. En ce sens, la création de l'AS GRAM en 2010 était un premier succès. Mais ce n'était évidemment pas une fin en soi et il restait à vérifier dans l'action que cette structure était utile. Pour cela on peut s'appuyer sur quelques éléments factuels :

- Une trentaine de groupes (typiquement partie de laboratoire), représentant environ 200 chercheurs, travaillent sur des thématiques liées à GRAM.
- Un réel succès auprès de la communauté concernée que l'on peut mesurer non seulement lors des appels à propositions (une quinzaine de demande déposées chaque année) mais aussi lors des journées scientifiques de GRAM (une petite centaine de participants). A chacun de ces événements, les participants nous ont incités à organiser ces journées plus fréquemment. Cela sera fait à partir de 2015.
- Un impact positif des soutiens de GRAM à des propositions scientifiques : toutes les conséquences des financements de GRAM ne sont pas mesurables mais nous avons recensé plusieurs obtentions d'ANR, financement d'excellence (...EX), ou de contrats européens et dépôts de brevet pour des projets dont le démarrage avait été favorisé par le financement de GRAM. On ne peut évidemment affirmer avec certitude que ces succès auraient été impossibles sans GRAM, mais le fait est que les porteurs concernés soulignent le rôle facilitateur de GRAM.
- Nous constatons que GRAM est maintenant devenu un acteur naturel de la communauté des sciences de l'Univers. Cela a été par exemple fortement souligné lors de la dernière prospective de l'INSU.

GRAM a été soutenu financièrement par 3 tutelles : l'INSU, l'INP et le CNES pour un montant annuel d'environ 80 k€. Nous espérons prochainement élargir encore ce soutien à d'autres instituts (IN2P3, CEA, ONERA).

Une des difficultés qui émergeaient lors de la création de GRAM, de l'aveu même des scientifiques concernés, était le risque de recouvrement thématique, avec des structures déjà existantes telles que par exemple le Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS) ou GPhyS : même si ces structures ne s'inscrivaient pas dans le même contexte soit géographique, soit organisationnel, elles partageaient en effet des thématiques et des acteurs. Avec ces 5 années de recul, il semble qu'un équilibre se soit naturellement établi avec une complémentarité aussi bien dans les financements que dans le fonctionnement. On peut au contraire citer des actions communes (même si elles n'ont pas été étiquetées comme telles) comme par exemple un atelier de travail sur la participation de la communauté française au projet de satellite géodésique (avec des applications potentielles en physique fondamentale) GRASP (<http://grgs.omp.obs-mip.fr/formation/ateliers>).

Bien entendu, il reste des limites à la cohésion de GRAM. Par exemple, si il est manifeste que les acteurs de différentes origines se rencontrent avec enthousiasme et volonté de construire lors de certains événements (en particulier les journées GRAM), ils n'en restent pas moins très liés à leur « communauté naturelle » d'origine. Mais il ne faut pas oublier que GRAM regroupe des scientifiques de différents instituts (INSU, INP, CEA, ONERA...) et l'objectif ne doit pas être une assimilation totale, mais bien une stimulation d'échanges et une coordination qui ne se seraient pas forcément produites sans GRAM. Finalement, GRAM est encore jeune, et il est probable que

ce rôle de stimulation d'échange continue à se renforcer menant à des collaborations et synergies interdisciplinaires de plus en plus fortes.