

Gravitation, Références, Astronomie et Métrologie

GRAM

8 décembre 2010

Ont contribué à la rédaction : *O. Acef, S. Bize, P. Bouyer, N. Capitaine, C. Caprini, P. Charlot, F. Deleflie, N. Dimarcq, G. Esposito-Farese, P. Exertier, A. Fienga, E.ourgoulhon, D. Hestroffer, M.-T. Jaekel, J. Laskar, A. Landragin, P. Laurent, C. Le Poncin-Lafitte, **G. Métris**, F. Mignard, S. Reynaud, C. Rizzo, E. Samain, G. Theureau, W. Thuillot, P. Touboul, P. Tuckey, J. Vigué J.-Y. Vinet, **P. Wolf***

Contact : Gilles.Metris@obs-azur.fr et Peter.Wolf@obspm.fr

1. Introduction

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.

Bien que la théorie de la relativité générale ait passé avec succès de nombreux tests expérimentaux, on sait que son unification avec les autres interactions conduira à des conséquences observables, sous la forme par exemple d'une violation du principe d'équivalence, d'une « variation des constantes fondamentales » ou d'une nouvelle force se superposant aux quatre interactions fondamentales déjà connues. La découverte d'un de ces effets serait un événement considérable ouvrant une « fenêtre » qui pourrait donner un accès à la nouvelle physique attendue « au-delà du modèle standard ».

Ces points sont clairement mis en évidence par deux missions spatiales, initiées par des équipes françaises, soutenues par le CNES depuis des années dans le cadre de collaborations européennes. Le projet MICROSCOPE (Micro Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) utilisera des accéléromètres ultrasensibles dans l'espace pour gagner un facteur presque 1000 sur la précision du test du principe d'universalité de la chute libre des corps, indépendamment de leur composition. A ce niveau extrême de sensibilité pourront apparaître des violations du principe d'équivalence. Le projet ACES (Atomic Clocks Ensemble in Space) emportera dans l'espace des horloges à atomes froids, aujourd'hui les meilleures horloges sur Terre. Il conduira à la réalisation de tests avec une précision améliorée et porte lui aussi un potentiel de découvertes majeures pour la physique fondamentale.

Le projet international LISA (Laser Interferometric Space Antenna), présélectionné par l'ESA et la NASA, présente également un intérêt scientifique indiscutable. Constitué d'un grand interféromètre optique avec des bras de 5 millions de kilomètres en orbite autour du Soleil, il permettra de détecter le rayonnement gravitationnel à des fréquences de l'ordre du milliHertz pour lesquelles on connaît de nombreuses sources potentielles. Il ouvrira une nouvelle fenêtre d'observation astrophysique, qui accroîtra en particulier considérablement nos connaissances sur les trous noirs. Il permettra aussi de détecter les fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles qui constituent une source d'informations unique sur la cosmologie primordiale.

Au-delà de ces projets, la physique fondamentale propose de nouveaux instruments ayant des performances nettement améliorées par rapport à celles d'aujourd'hui et ouvrant la voie à de nouvelles applications. La télémétrie laser, avec T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser) maintenant embarqué sur Jason 2 avec le soutien du CNES, permet d'obtenir des précisions remarquables dans les mesures de distance avec les satellites et dans la comparaison d'horloges distantes. Elle peut en

principe être étendue avec une excellente précision à des objets naviguant dans le système solaire. Les horloges optiques, les senseurs inertiels à atomes froids, qui utilisent et développent les technologies quantiques dont PHARAO (horloge atomique dans ACES) est un précurseur, conduiront à la mise au point de nouveaux instruments, ayant des sensibilités remarquables en particulier sur le très long terme.

Ces projets de pointe pour l'étude et le recherche d'une éventuelle modification des lois de la gravitation sont fortement dépendants de l'étude très fine des effets de la gravitation classique (champ de gravité du Soleil des planètes et de la Terre), et de la connaissance des trajectoire des corps du système solaire et des satellites (Lune, satellites naturels et sondes artificielles). A l'inverse il s'avère que les techniques utilisés en astrométrie/systèmes de références, en mécanique céleste/éphémérides, et en géodésie spatiale permettent pour certaines des tests extrêmement fins de physique fondamentale ; on peut citer par exemple le test du principe d'équivalence en utilisant le laser lune, la mesure du paramètre PPN γ en VLBI, la mesure du paramètre PPN β avec les éphémérides planétaires, ou encore le test d'invariance de Lorentz en utilisant le GPS. Dans ce contexte le projet Gaia joue un rôle exemplaire, car on s'attend à des améliorations importantes des tests de physique fondamentale en parallèle avec les améliorations prévues en astrométrie.

Plus spécifiquement en ce qui concerne la Terre, la métrologie de son champ de gravité offre un accès privilégié aux sources de ce champ et, donc, aux variations spatio-temporelles de masse volumique dans chacune des parties de la planète. Le champ de gravité conditionne aussi les mouvements de fluide à sa surface, par exemple la circulation océanique par rapport au géoïde. L'étude de ce champ est l'un des buts premiers de la géodésie spatiale avec les missions en cours CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) et GOCE (Gravity and Ocean Circulation Explorer), dont les accéléromètres de l'ONERA constituent le cœur instrumental. Elle est directement liée à l'altimétrie avec l'unification des systèmes d'altitude, et plus généralement aux sciences de la Terre solide, liquide et gazeuse. Les applications spatiales concernent la trajectographie très précise de certains satellites pour la constitution de systèmes de référence (l'altimétrie des océans en tire à nouveau un bénéfice direct), la localisation précise d'objets dans le système solaire (la mesure du système Terre-Lune en est un exemple spectaculaire au niveau de la précision) et donc l'amélioration de sa connaissance, le suivi télémétrique, le contrôle et la commande de missions de planétologie.

De manière générale, tout instrument permettant des gains dans la sensibilité de mesures cruciales a une importance pour la physique fondamentale aussi bien que pour les applications. Cette recherche est simultanément un moteur pour le développement d'une instrumentation de pointe avec des retombées en métrologie, intéressant dans le domaine de la physique fondamentale aussi bien que pour d'autres applications. A titre d'exemple, il est clair que la disponibilité de très bonnes horloges dans l'espace dessine une perspective à long terme où l'échelle de temps international sera construite dans l'espace et disséminée de manière précise et rapide à la surface de la Terre. Ceci permettra de dépasser les limites liées à l'environnement terrestre, qui sont déjà perceptibles aujourd'hui et d'imaginer des techniques de positionnement global ayant une résolution nettement meilleure que dans les systèmes GNSS (GPS et Galileo), qui constituent des exemples éclatants d'application inattendue des ressources de la physique quantique aussi bien que de la relativité.

Ce document présente un aperçu de l'activité scientifique au niveau national à l'intersection des trois grands domaines concernés :

- La Physique Fondamentale, en particulier en ce qui concerne les tests expérimentaux des théories de la Gravitation
- La métrologie de l'espace-temps et les systèmes de références
- La mécanique céleste et la mécanique spatiale

Aucun de ces trois grands domaines n'est couvert dans son intégralité, mais seulement dans ses aspects qui sont liés aux deux autres de sorte à former un ensemble d'activités scientifiques interdépendantes mais pour le moment non représentées et organisées au sein d'une même structure. Cet état de fait a pour conséquence un certain manque de coordination en ce qui concerne les priorités en termes de moyens, missions spatiales, accompagnement et exploitation scientifique de ces missions, ainsi que de support sol et services d'observation et calcul associés. Comme exemples on peut citer des missions en cours ou en préparation notamment en physique fondamentale (T2L2, ACES/PHARAO, MICROSCOPE, LISA-Pathfinder, ...) qui dans la phase de préparation et d'exploitation ont besoin d'accompagnement au niveau technologique, d'analyse de données, et de l'exploitation scientifique. Cela implique des activités en physique fondamentale (théories alternatives,

dérivation d'effets observables, etc...) mais aussi sur les systèmes de références, et en mécanique céleste (éphémérides, positions et potentiels des stations sol, orbitographie ultra-précise etc...).

Le tableau 1 ci-dessous résume les thématiques concernées à l'intérieur des trois domaines ainsi que les projets et les laboratoires impliqués. Ce tableau n'a pas vocation à être exhaustif, mais représente l'état de la réflexion à l'heure actuelle suite à des échanges au niveau national essayant d'impliquer tous les acteurs concernés.

Le présent document a pour but d'initier une structure nationale couvrant ces thématiques au sein de l'INSU, par exemple une action spécifique ou, à terme, un programme national, avec la participation d'autres instituts et organismes qui ont indiqué leur intérêt (INP, INST2I, CNES, ONERA) ou qui pourrait être intéressés (IN2P3, IGN, CEA, LNE,...). Cette structure (appelée GRAM par la suite) jouera le rôle d'un coordinateur de l'activité scientifique des participants et représentera cette activité vis-à-vis des tutelles et autres structures et organismes au niveau national, européen et international. La figure 1. donne un aperçu de l'intégration du GRAM dans le paysage actuel. Les propositions en ce qui concerne l'organisation et les activités du GRAM sont écrites de façon plus détaillée dans la partie 4. La partie 2 présente brièvement la situation actuelle et le chapitre 3 décrit en détail les différentes activités scientifiques concernées et leur prospective. Il est composé des contributions fournies par les différents participants du GRAM.

2. Etat des lieux des structures existantes

La physique fondamentale dans l'espace, en tant que discipline spécifiquement et explicitement identifiée, est relativement récente aussi bien en France qu'en Europe. Peu de projets spatiaux avaient été menés à bien ou décidés avant les années 2000. Le plus souvent, les résultats en physique fondamentale liés à des activités spatiales ont été acquis dans le cadre de missions dont le but principal était autre (par exemple la détermination du paramètre PPN gamma par la mission astrométrique Hipparcos ou par la mission planétaire Cassini, l'observation de l'effet Lense-Thirring par l'orbitographie fine du satellite Lageos, l'estimation de l'effet Nordvedt au moyen de la télémétrie laser sur la Lune,...). Mais l'avantage de réaliser des expériences de physique fondamentale dans l'espace s'est révélé suffisamment convaincant pour que les principales agences spatiales (en particulier le CNES, l'ESA et la NASA) ajoutent un secteur physique fondamentale aux deux piliers historiques que sont l'observation de la Terre et l'exploration de l'Univers.

De façon parallèle, le GDR GREX (GRavitation et EXpérience : <http://www.spectro.jussieu.fr/GREX/>) a fédéré de 1995 à 2006 les scientifiques (d'abord français puis avec de plus en plus de participants étrangers) autour de la gravitation expérimentale avec un fort accent sur le spatial. Ce GDR a rapidement regroupé des spécialistes issus de différentes spécialités : physique (expérimentale et théorique), astrophysique, astronomie fondamentale, géodésie spatiale. Dans ce contexte, plusieurs missions spatiales de physique fondamentale ont été rapidement décidées : T2L2, ACES/PHARAO, MICROSCOPE, LISA PATHFINDER. La communauté française est très présente dans ces différentes missions, en particulier grâce à la caution scientifique donnée par le GREX à l'époque et au volontarisme du CNES.

Le GREX ayant atteint en 2006 la durée de vie maximale pour un GDR, il n'existe plus aujourd'hui de structure formelle inter-laboratoires pour accompagner les projets en cours et en soutenir de nouveaux. Deux initiatives récentes ont été prises pour tenter de combler ce vide tout en renforçant les liens entre les communautés de la physique fondamentale, de la métrologie, des systèmes de référence et de la géodésie spatiale. La plus récente est le groupe GPhyS (<http://gphys.obspm.fr/French/Accueil.html>), structure fédérative de 12 laboratoires coordonnée et financée par l'Observatoire de Paris et qui reprend les thèmes du GREX. D'autre part le groupe GRAAPH (Gravitation et Références pour des Applications en Astronomie et en Physique : <http://www-g.oca.eu/heberges/pnaf/>) a été créé dans la lignée du GDR AGRET (Astrométrie, Géodésie, Références d'Espace et de Temps) mais avec une extension marquée vers la physique fondamentale. Il faut en particulier mettre à son actif l'organisation et l'animation, depuis 2003, d'une session aux journées scientifiques de la SF2A ; cette session regroupe les communautés concernées par GRAM. Cependant GRAAPH est une structure informelle et sans financement propre.

Par ailleurs, une partie des activités françaises en métrologie de l'espace et du temps et systèmes de références d'une part, et en mécanique céleste, mécanique spatiale et géodésie spatiales d'autre part sont ancrées au GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale).

Le GRGS a été fondé en 1971. C'est un groupement scientifique, sans personnalité morale, qui a pour but de fédérer les équipes françaises (ou parties d'équipes) appartenant à différents organismes, qui

ont des activités en géodésie spatiale. Le GRGS comprend dix organismes membres (dont l'INSU depuis 1987). Son champ d'activités étant explicitement limité aux activités de géodésie spatiale, la liste du personnel est remise à jour chaque année par le comité directeur en fonction des besoins et des propositions des organismes membres. Le GRGS joue un rôle moteur dans ses domaines de compétence et en particulier dans les secteurs liés à l'observation de la Terre : définition et accompagnement de missions spatiales mais aussi coordination de moyens sol, organisation d'écoles d'été, ... Le GRGS a sans aucun doute contribué à la position de premier plan des laboratoires français dans les domaines de la géodésie spatiale, de la métrologie et des systèmes de référence. Cependant le rôle du GRGS a plusieurs limites liées à sa définition :

- son champ scientifique est distinct (bien que non disjoint) de celui de GRAM : il comprend des domaines qui n'ont pas vocation à faire partie de la structure GRAM (tels que l'étude des océans, l'hydrologie globale ou la géophysique) et d'autres (tels que la métrologie du temps) en sont absents.
- La liste explicite de ses membres institutionnels ne peut être modifiée que sur avis formel de son comité directeur.
- Le GRGS n'est pas une structure émanant du CNRS et ne peut constituer le maillon qui manque pour compléter le pavage de l'astronomie française.

3. Axes de recherche

3.1. Tests expérimentaux de PF, théories alternatives, modélisation et analyse des données

Le programme spatial PHARAO/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. La possibilité d'installer aussi un lien optique du type T2L2 est encore à l'étude à l'ESA. ACES sera installée sur une palette externe fixée sur le module Columbus de la station internationale.

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 ces horloges ont une exactitude de fréquence dans la gamme des 10^{-16} et commencent, pour deux d'entre elles aux Etats-Unis, à atteindre la gamme des 10^{-17} . 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 (le rythme de 2 horloges basées sur des atomes différents se modifierait-il au cours du temps ?). 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 servir de référence 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 en 2006. L'année 2007 a été consacrée aux tests fonctionnels de l'horloge et à plusieurs essais de performance. La validation complète du modèle d'ingénierie a été réalisée en 2008/2009. La construction du modèle de vol est en cours pour un lancement prévu en 2013. La mise en place des moyens d'analyse scientifique des données est en cours au SYRTE.

Le projet MICROSCOPE

L'universalité de la chute libre dans un champ gravitationnel indépendamment de la composition des corps est une conséquence directe du principe d'équivalence, un des principes fondamentaux de la relativité générale. Cette universalité a été vérifiée avec une précision relative de quelque 10^{-13} pour différents couples de matériaux à l'aide d'expériences en laboratoire ou des mesures laser de distance Terre-Lune. Cependant presque toutes les tentatives théoriques (comme les super cordes) pour unifier la gravitation aux autres interactions, prévoient la possibilité d'une violation du principe d'équivalence à des niveaux plus faibles. Le test du principe d'équivalence est donc aujourd'hui certainement l'une des expériences les plus à notre portée pour tester non seulement le caractère géométrique de l'interaction gravitationnelle mais également la pertinence de ces théories.

La mission spatiale MICROSCOPE a pour objectif de tester l'identité de la chute libre avec une précision de 10^{-15} (soit plus de 100 fois mieux que les tests actuels) de masses d'épreuve en platine et en titane orbitant autour de la Terre. Cette mission, proposée par l'ONERA et l'OCA a été sélectionnée par le CNES dans le cadre de sa filière Myriade de microsattellites ; elle bénéficie par ailleurs d'une contribution de l'ESA pour le système de propulsion. Le principe de l'expérience consiste à mesurer la différence d'accélération qui pourrait apparaître entre les masses possédant exactement la même orbite grâce à des accéléromètres électrostatiques ultra sensibles développés par l'ONERA. Les mesures en orbite permettent à la fois de bénéficier d'une chute libre quasi-parfaite et aussi longue que souhaitée, et d'un environnement très bien contrôlé du point de vue thermique, magnétique, vibratoire ou gravitationnel. De plus un système de propulsion très précis, asservi sur l'accélération mesurée en mode commun par les accéléromètres, permet à ces instruments de fonctionner dans leur plage de très haute sensibilité et de quasi-linéarité.

Après étalonnage en orbite des instruments, la perturbation dominante avant traitement est le gradient spatial de gravité de la Terre agissant sur les masses d'épreuve dont les centres de masse peuvent être excentrés de quelques microns. Cependant des considérations fréquentielles et un traitement adapté permettent de corriger ce signal avec une précision suffisante, en tenant compte d'une connaissance précise de la position et de l'attitude du satellite par rapport à la Terre.

La charge utile de MICROSCOPE développée par l'ONERA est en phase C/D de réalisation et de qualification alors que le satellite est en complément de phase B de définition afin de pouvoir intégrer un système propulsif à gaz froid ou électrique. En parallèle, un bilan très détaillé des performances est élaboré par l'ONERA, le CNES et l'OCA. Les méthodes et les logiciels d'analyse des données sont développés par l'OCA et l'ONERA.

T2L2 et futurs liens optiques

L'expérience T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser) développée sous la responsabilité scientifique de l'OCA, est embarquée sur le satellite altimétrique Jason2, lancé le 20 juin 2008. Le satellite est muni d'un réflecteur laser qui permet de mesurer le temps de vol d'une impulsion laser entre une station de télémétrie laser au sol et le satellite. De plus, un système de détection à bord du satellite permet la datation de la réception de l'impulsion laser par le satellite. Ainsi, connaissant le temps de vol, il est possible d'évaluer la désynchronisation entre les horloges de la station laser et du satellite. Lorsque plusieurs stations tirent sur Jason 2 en vue commune, il est possible de comparer les horloges liées à chacune de ces stations en utilisant l'horloge de bord sur des durées très courtes (moins d'une seconde). Ainsi, l'objectif de T2L2 est de pouvoir synchroniser des horloges en vue commune avec une stabilité de 1 picoseconde et une exactitude 100 picosecondes. Si des stations tirent en vue non commune, l'horloge de bord intervient sur des durées plus longues et dégrade la performance.

Les objectifs assignés à la mission T2L2 peuvent être scindés en 3 catégories :

- les objectifs technologiques liés à la validation fonctionnelle et des performances de T2L2,
- les objectifs scientifiques liés à l'utilisation des mesures de comparaison d'horloges réalisées par T2L2. Les principaux domaines adressés sont la métrologie Temps – Fréquence (Constitution d'échelles de temps, étalonnages des autres dispositifs de comparaison ...) et la physique fondamentale,
- les objectifs associés à Jason-2, liés à la caractérisation indépendante de l'Oscillateur Ultra Stable (OUS) DORIS en particulier vis-à-vis de l'anomalie de l'Atlantique Sud (effets des radiations sur les électroniques embarquées), à une amélioration de la localisation des balises sol dans cette même région et à une participation à la télémétrie laser en autorisant des mesures même en l'absence d'écho retour.

Les premières données sont en cours de validation par le Centre de Mission Scientifique développé à l'OCA. D'autre part des campagnes de transfert de temps en France et en Europe sont prévues en 2009 et 2010. Ces campagnes nécessitent en particulier le développement d'un « kit T2L2 » pour équiper

les stations de télémétrie laser existantes. D'autres expériences consistent à utiliser la station de télémétrie laser mobile de l'OCA et/ou la fontaine atomique mobile de l'Observatoire de Paris.

Dans le domaine des liens optiques pour la mesure des distances, l'observatoire de la Côte d'Azur a démarré en 2005 le projet ILIADE en associant le savoir faire des UMRs Artemis et GeoAzur. L'idée est de combiner dans un même système des moyens de mesure macroscopique basés sur l'analyse des modulations d'une porteuse optique, avec des moyens de mesure microscopique basés sur l'analyse en interférométrie de la porteuse. Cette association, doit permettre de mesurer des distances exactes sur des milliers de kilomètres avec une résolution du nanomètre. Le projet permettra de répondre à des besoins identifiés concernant la géodésie spatiale et probablement de générer de nouveaux projets dans divers domaines, en particulier la physique fondamentale, les télescopes spatiaux et d'une façon plus générale, les vols en formation dans l'espace. Le type de métrologie laser envisagé ici pourrait être utilisé sur une gamme de distances entre des cibles allant de quelques mètres jusqu'à des millions de km et voire le milliard de kilomètres pour des projets spatiaux à l'échelle du système solaire.

Finalement, le projet récent Mini-DOLL associant l'OCA et le SYRTE vise à établir des liens laser cohérents (mesure uniquement de la phase de la porteuse) entre une station sol et un satellite en orbite terrestre ou interplanétaire. Ce type de lien servira à la comparaison de fréquence des horloges optiques distantes, la détermination de la trajectoire des satellites par mesure de l'effet Doppler optique, et la transmission de données à haut débit. Un des problèmes principaux sera le bruit de phase dû à la turbulence de l'atmosphère terrestre. La première version de Mini-DOLL a été testée à l'OCA entre le télescope MEO et un réflecteur laser placé au sol à 2,5 km du télescope. Lors de cet essai le lien a démontré un bruit inférieur à 30 nm limité comme on s'y attendait par la turbulence atmosphérique. Ces résultats encourageants ont donné lieu à une poursuite du projet avec le but de réaliser un lien vers un satellite terrestre en orbite basse dans les prochaines années.

Horloges atomiques, laser et applications

Un des points forts de plusieurs laboratoires du GRAM est l'activité autour des horloges atomiques et des lasers stabilisés. Ces activités essentiellement expérimentales représentent une compétence essentielle pour des projets spatiaux, mais ont aussi des implications directes sur les tests de physique fondamentale. Parmi ces activités, on peut citer :

- Etalons primaires (fontaines atomiques Cs) : développement d'un ensemble de fontaines atomiques autour d'un oscillateur cryogénique. Améliorations, comparaisons entre fontaines atomiques. Contributions aux temps atomiques français et international.
- Fontaines de rubidium : Mesure absolue de la fréquence hyperfine du rubidium, première représentation secondaire de la seconde du système international. Comparaisons Rb versus Cs au cours du temps et test de stabilité des constantes fondamentales.
- Stabilisation de lasers sur cavités, molécules ou lignes à retard, pour multiples applications spatiales et terrestres.
- Liens optiques vers des satellites terrestres.
- Lien optiques fibrés
- Détecteurs d'ondes gravitationnelles (VIRGO, travaux sur LISA).
- Tests de l'Invariance de Lorentz utilisant une fontaine de Cs. Tests de l'Invariance de Lorentz utilisant l'oscillateur cryogénique.
- Mesure absolue de la fréquence de l'horloge à réseau optique de Sr et test d'invariance des constantes fondamentales associées.
- Début du développement de l'horloge à réseau optique Hg.
- Mesure absolue de fréquences moléculaires et test d'invariance des constantes fondamentales associées.

Capteurs inertiels et gravimètres, interférométrie atomique, expériences en laboratoire

L'utilisation d'atomes refroidis par laser à quelques μK a permis et permet d'envisager la mise au point d'instruments de mesure de grande précision (horloges, accéléromètres, gyromètres, gravimètres, et gradiomètres notamment).

Les activités de plusieurs laboratoires du GRAM portent sur la réalisation et l'étude de capteurs inertiels (gyromètres, accéléromètre) à atomes froids, dont le principe de fonctionnement repose sur des techniques d'interférométrie atomique. Ces travaux au caractère expérimental sont complétés d'une part par la modélisation métrologique des instruments, et d'autre part par une étude théorique plus prospective de nouvelles configurations (cavité à onde de matière, interféromètre multi-arches ...).

Le SYRTE, le LCFIO et le LKB ont participé au projet spatial européen HYPER pour la mesure de l'effet Lense-Thirring avec des interféromètres à atomes froids. Une étude industrielle a été menée ainsi qu'une estimation théorique de la sensibilité du système. Cependant, ce projet est encore trop ambitieux pour être programmé dans un avenir proche.

En 2002, le SYRTE, le LCFIO et l'ONERA ont donc proposé au CNES un projet commun du nom de ICE (Interféromètre à source Cohérente pour l'Espace). Ce projet de mission consiste à comparer deux accéléromètres reposant sur des concepts différents : l'un électrostatique, l'autre à onde de matière. Les buts de ce projet sont multiples : vérifier le principe d'équivalence, mesurer la constante hyperfine, faire la comparaison technologique de deux systèmes d'accélérométrie, vérifier la faisabilité d'interféromètre à onde de matière en micro-gravité etc. Le projet a débuté par le développement d'un dispositif expérimental « sol » transportable et un dispositif, baptisé « montage ICE 0-g », qui a été testé avec succès en microgravité dans l'airbus 0-g de Novespace.

L'équipe du LCAR à Toulouse développe des interféromètres à grande séparation de bras et étudie finement l'effet des vibrations qui sont un des facteurs limitants dans ce type d'interféromètre. La grande séparation des bras permet en particulier d'étudier des perturbations qui n'induisent des déphasages que sur l'un des deux bras et d'observer des effets visibles uniquement en interférométrie atomique comme l'effet de la propagation non réciproque des atomes en champs électriques et magnétiques croisés ou l'effet de la radiation thermique sur la propagation des atomes. Par ailleurs l'étude fine des vibrations est un soutien important aux autres équipes confrontées à ce problème.

Le SYRTE développe une expérience pour des tests de gravitation à très courte échelle (< 10 microns), l'expérience FORce de Casimir et Gravitation à courte distance (FORCA-G). En effet, de nombreuses théories d'unification prévoient des modifications des lois de la gravitation à portée limitée à quelques microns ou en dessous. Cette expérience est basée sur de l'interférométrie atomique avec les atomes piégés dans un réseau optique proche d'une surface afin d'effectuer des mesures précises à très courte distance. Le LKB contribue activement à cette expérience par l'analyse des effets de l'électrodynamique quantique (effet Casimir-Polder) qui deviennent largement dominants à ces distances.

Une collaboration entre le LCAR, le LNCMI et le LMA (IN2P3) concerne le projet BMV (Biréfringence Magnétique du Vide) qui cherche à mesurer une des prédictions fondamentales de l'électrodynamique quantique (EDQ), à savoir une modification de la vitesse de propagation de la lumière en fonction de sa polarisation en présence d'un champ magnétique intense. L'observation d'un tel effet constituerait la première mise en évidence de la propagation non linéaire de la lumière dans le vide quantique. L'effet est proportionnel à l'intensité du champ magnétique B^2 et à la longueur L sur laquelle il s'applique. A ce jour l'expérience a atteint $B^2L \approx 300 \text{ T}^2\text{m}$, l'objectif final étant $B^2L > 600 \text{ T}^2\text{m}$. En parallèle l'équipe du LCAR a entrepris une étude théorique du vide quantique soumis à des champs magnétiques très intenses (10^8 - 10^9 T) aux environs des étoiles à neutrons. Ils ont démontré l'existence d'un nouveau phénomène de ralentissement de la rotation de ce type d'étoile dû à l'interaction du champ magnétique dipolaire de l'étoile à neutrons avec la magnétisation induite dans le vide quantique (Quantum Vacuum Friction, QVF). Ce nouveau phénomène est l'une des rares manifestations macroscopiques des propriétés magnétiques du vide quantique. A présent l'étude porte sur la preuve de l'existence de la QVF en utilisant les données existantes.

Tests de la gravitation et théories alternatives

Pour déterminer quelles expériences gravitationnelles sont les plus instructives, et pour comprendre quels aspects de la relativité générale sont testés dans chacune d'entre elles, la meilleure méthode consiste à la comparer à un ensemble d'autres théories. De ce point de vue, la classe des théories « tenseur-scalaire » joue un rôle privilégié. En plus du graviton usuel de la relativité générale, elles lui associent un ou plusieurs champs scalaires pour transmettre l'interaction gravitationnelle. Non seulement de tels partenaires scalaires sont prédits dans toutes les théories unifiées ou extra-dimensionnelles, mais ils jouent aussi un rôle crucial en cosmologie, notamment durant les phases d'expansion accélérée de l'univers. L'une des spécialités du GReCO est d'analyser les diverses classes de contraintes expérimentales sur ces théories : système solaire (champs faibles), pulsars binaires (champs forts), détection d'ondes gravitationnelles (effets de champs forts détectés en champs faibles), et cosmologie (évolution temporelle) ; ceci en tenant compte régulièrement des dernières données expérimentales.

Théories alternatives, extensions métriques de la Relativité Générale et matière noire

Les tests de la gravité dans le système solaire sont en accord avec la relativité générale. Ils montrent cependant des défis associés aux observations à plus grande échelle, expliqués par la *matière noire* ou l'*énergie noire*. Certaines mesures dans le système solaire, en particulier l'*anomalie Pioneer*

et l'*anomalie de survol*, pourraient être des indices de petites modifications des lois de la gravité dans le système solaire. Un groupement de laboratoires réunissant le LKB, l'OCA, le SYRTE, l'IOTA et l'ONERA travaille sur la réanalyse des données des sondes Pioneer ainsi que sur les propositions de nouvelles missions interplanétaires telles que les missions Odyssey ou SAGAS ou l'export de l'instrument Gravity Advanced Package sur la mission EJSM/JGO vers Jupiter

Une collaboration entre le LKB et le LPT-ENS a proposé une extension de la théorie d'Einstein qui répond à ces exigences en préservant les bases de la Relativité Générale, tout en rapprochant la gravitation des autres interactions fondamentales. Cette extension préserve le caractère géométrique de la gravitation (principe d'équivalence), mais modifie le couplage de la courbure au tenseur d'énergie-impulsion. Ce nouveau cadre, qui peut être dénommé post-Einsteinien par comparaison avec le cadre PPN permet de faire un lien direct entre les observables caractérisant la métrique dans la théorie et les observations réalisées dans la pratique pour le repérage spatio-temporel et la navigation.

Les membres du GReCO étudient aussi les possibles modifications de la loi de la gravitation à grande distance. Le modèle phénoménologique MOND (« Modified Newtonian Dynamics ») proposé par Milgrom en 1983 permet notamment d'expliquer les courbes de rotation des galaxies sans faire appel à l'existence de matière noire. Toutefois, la construction d'une théorie des champs relativiste reproduisant cette phénoménologie est très complexe. Ils ont analysé en détail les divers modèles proposés dans la littérature, en soulignant aussi bien leurs difficultés expérimentales que théoriques. À l'heure actuelle, aucun d'entre eux n'est tout à fait satisfaisant.

Au lieu de considérer cette phénoménologie comme une modification de la loi de la gravitation à grande distance, l'équipe du GReCO a aussi proposé de la réinterpréter comme un effet de « polarisation gravitationnelle » d'un type nouveau de matière noire, constituée de moments dipolaires gravitationnels. En s'alignant dans le champ gravitationnel produit par les masses ordinaires, ils ont tendance à l'augmenter, en accord avec MOND. Ils ont analysé les diverses conséquences observables d'un tel modèle, y compris du point de vue de la croissance cosmologique du contraste de densité et de son effet sur le spectre du fond micro-onde cosmologique (CMB).

Un certain nombre d'idées maintenant classiques, développées au LPT-ENS, constituent la base du Modèle Standard Supersymétrique. Selon l'hypothèse des "particules supersymétriques" une bonne moitié des particules fondamentales échapperait à notre observation: gluinos et photinos ou plus généralement neutralinos, squarks et sélectrons, etc. Leur recherche est devenue l'un des enjeux principaux des collisionneurs de particules, et notamment du collisionneur pp de Chicago et du LHC au CERN. Leur existence aurait aussi des conséquences importantes pour la gravitation, en apportant une réponse au problème de la matière noire.

Les activités du GReCO et du SYRTE concernent aussi les modèles théoriques prédisant des variations locales et cosmologiques des constantes fondamentales ainsi que leurs tests expérimentaux. Une longue revue sur ce sujet a été effectuée dans le but de présenter non seulement les multiples modèles prédisant de telles variations, mais également les diverses classes de contraintes expérimentales. De son côté, le SYRTE contribue avec son ensemble d'horloges atomiques de type différent aux meilleures contraintes actuelles sur des telles variations.

Gravitation et univers primordial

Les observations cosmologiques de l'univers à grande échelle constituent un test fondamental des lois de la gravitation. Dans le cadre de la théorie du Big Bang, l'univers se développe à partir d'un état initial à très haute énergie et les caractéristiques de son histoire et de son évolution sont déterminées principalement par les lois de la gravitation. L'étude de l'état initial par la détection du fond cosmologique diffus nous permet de faire le lien entre la gravitation et la théorie quantique des champs à haute énergie ; l'étude des grandes structures par les catalogues de galaxies nous permet de tester les lois de la gravitation au cours de l'évolution de l'univers. Au CEA-Saclay, la recherche dans le cadre de la cosmologie théorique et de la physique des hautes énergies se déroule sur trois sujets principaux : le fond stochastique d'ondes gravitationnelles d'origine primordiale, l'étude théorique de modèles d'énergie sombre et leurs tests observationnels.

La détection directe des ondes gravitationnelles représenterait une confirmation très importante de la gravitation Einsteinienne. A coté des sources astrophysiques telles que par exemple la coalescence des trous noirs massifs, il existe des sources d'ondes gravitationnelles issues directement de l'univers primordial. Elles donnent lieu à un fond stochastique d'ondes gravitationnelles tout à fait analogue au fond cosmologique microonde, et représentent une fenêtre sur la physique de l'univers à très haute énergie. Une fois produites, les ondes gravitationnelles se propagent librement dans l'espace-temps : leur détection nous permettra donc de comprendre directement les caractéristiques du processus qui les a générées. Les sources primordiales d'ondes gravitationnelles prometteuses pour la

détection sont essentiellement les transitions de phase de premier ordre, et la turbulence et les champs magnétiques qui se développent après la transition de phase. La transition de phase électrofaible peut générer un signal visible par l'interféromètre LISA, et la transition de phase QCD par les pulsars. La détection de ce signal pourrait fournir des informations sur la physique à l'échelle du TeV, complémentaires à l'LHC.

Pour expliquer l'expansion accélérée de l'univers il faut faire appel à l'énergie sombre. Tout simplement, elle pourrait être sous forme d'énergie du vide, ou constante cosmologique. Toutefois, les observations futures nous permettront de mettre des fortes contraintes sur d'autres modèles alternatifs motivées par la physique des hautes énergies. Pour cette raison, il est important de considérer aussi la possibilité que l'énergie sombre soit une nouvelle composante dominant l'univers ou une modification des lois de la gravitation à grande échelle. Dans la plupart des cas, ces deux faces de l'énergie sombre sont très liées.

Des différents modèles et leurs conséquences phénoménologiques ont été étudiés. Un de ces modèles est le caméléon qui permet de concilier l'accélération de l'univers et les tests de la gravité dans le système solaire et en laboratoire. Ces modèles ont aussi des conséquences sur l'effet Casimir et la propagation d'un rayonnement polarisé dans une cavité optique soumise à un champ magnétique. Les modèles caméléon sont aussi équivalents à des théories de gravité modifiée dite $f(R)$ qui sont très étudiées en ce moment.

Il y a de très fortes motivations théoriques pour considérer la possibilité que l'énergie sombre puisse s'effondrer gravitationnellement sur elle-même, participant à la formation et virialisation des structures à grande échelle. Dans ce contexte, les effets d'une telle énergie sombre sur le collapse gravitationnel de la matière noire et la formation des grandes structures est étudiée. Ceci permet de distinguer différents modèles en utilisant les catalogues de galaxies ou de cisaillement gravitationnel de lentille faible.

Sources d'ondes gravitationnelles

Les sources d'ondes gravitationnelles les plus prometteuses pour les interféromètres LIGO et VIRGO sont les systèmes binaires très rapides, peu de temps avant leur coalescence. Comme des milliers d'orbites seront observées dans la bande passante de ces détecteurs, il est nécessaire de décrire avec une grande précision le mouvement spiralant des deux corps et le champ d'ondes gravitationnelles émises en incluant les corrections relativistes générales d'ordre $1/c^7$ au-delà des prédictions newtoniennes. Les effets dus aux rotations intrinsèques des corps (spins) doivent également être inclus jusqu'à l'ordre $1/c^5$. Des membres du GReCO ont récemment achevé ces travaux. Ils ont également étendu l'étude aux effets dus aux excentricités des orbites.

Au sein du groupe Cosmologie et Gravitation Relativiste du LUTH, l'activité de relativité numérique vise à simuler les sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles et, en particulier, les trous noirs, qui sont l'une des sources principales de LISA. Dans ce but, de nombreux travaux ont été réalisés afin d'obtenir une formulation stable des équations d'Einstein, dans laquelle il n'y a pas de violation des contraintes, ainsi qu'une description géométrique très précise des notions d'horizon des trous noirs. Parallèlement, ces travaux théoriques ont été intégrés à la bibliothèque numérique Lorene, notamment pour ce qui est des horizons, ces conditions d'onde sortante pour les ondes gravitationnelles et des systèmes en rotation. Enfin, les données initiales numériques modélisant une étoile à neutrons tournant autour d'un trou noir ont été obtenues. Ces travaux sont effectués dans le cadre de LISA-France.

Fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles

Les fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles sont des fluctuations de l'espace-temps qui induisent un mécanisme universel de décohérence. Une équipe du LKB associée au LPT-ENS étudie ce mécanisme qui se manifeste comme une perte de contraste des interférences quantiques. Après avoir travaillé sur les interféromètres à ondes de matière utilisant des molécules de plus en plus grosses, les efforts se portent sur les corrélations non-locales de type EPR ainsi que sur la synchronisation d'horloges distantes.

Une étude détaillée du cas des interféromètres atomiques (en particulier de HYPER) a permis d'évaluer les paramètres physiques déterminant la décohérence quantique gravitationnelle, et de donner ainsi une caractérisation de la transition microscopique/macrosopique.

La plupart des modèles cosmologiques de l'Univers primordial impliquent un fond d'ondes gravitationnelles reliques qui peut être important aux fréquences basses. Comme pour la décohérence quantique, ce fond induit des effets qui pourraient être directement observés à l'aide d'interféromètres de grande précision, comme ceux utilisés pour la détection des ondes gravitationnelles ou pour les tests d'isotropie de l'espace.

Préparation de la mission LISA et des futurs détecteurs d'ondes gravitationnelles

Depuis 2007, une équipe du SYRTE coordonne une nouvelle collaboration avec les Laboratoires APC (Université Paris VII & Observatoire de Paris) et ARTEMIS (Observatoire de la Côte d'Azur) autour du projet LISA en proposant une approche nouvelle et originale, pour le développement d'un laser stabilisé pour les besoins de l'expérience LISA.

Par ailleurs les équipes de APC et ARTEMIS sont fortement impliquées dans l'analyse des données de LISA et LISA-Pathfinder, ainsi que dans le développement des instruments de test et de modélisation de LISA.

Une équipe du LKB s'intéresse aux bruits dans les mesures optiques ultrasensibles, et en particulier aux bruits quantiques dans les détecteurs interférométriques des ondes gravitationnelles. Leur but est d'étudier différentes possibilités de réduction de ces bruits quantiques, et ainsi disposer d'un système modèle capable de servir de test pour les futures générations d'antennes gravitationnelles.

Une équipe de théoriciens du SYRTE a étudié la possibilité de détecter des ondes gravitationnelles à l'aide d'interféromètres ou de cavités à ondes de matière.

Observation des pulsars : détection d'un fond d'ondes gravitationnelles et tests des théories de la Gravitation

La détection directe des ondes gravitationnelles est en soi un challenge. Leur interaction avec des masses sur Terre est pratiquement non-mesurable, avec un effet relatif attendu (en taille ou en séparation) de 1 pour 10^{20} . La limite en sensibilité de la génération actuelle de détecteurs au sol (VIRGO-LIGO, domaine du Hz au kHz) n'a pas encore permis de les mesurer, en particulier à cause du bruit sismique auquel sont soumises les masses en laboratoire. En attendant la sonde spatiale LISA (domaine du mHz), elle ne sera probablement pas en opération avant 2020. Dans ce contexte, la chronométrie radio d'un ensemble de pulsars millisecondes (domaine du nHz) est une alternative très intéressante à relativement court terme.

Un réseau de pulsars millisecondes ultra-stables agit en effet comme un détecteur d'ondes gravitationnelles qui utilise la Terre comme masse test. Le principe est que le passage d'une onde gravitationnelle au niveau de la Terre perturbe la métrique de l'espace temps localement et produit un signal corrélé dans les résidus de temps d'arrivée mesurés de l'ensemble des pulsars, avec une signature quadrupolaire bien caractéristique. Un tel réseau de pulsars (Pulsar Timing Array, PTA) est sensible à des perturbations sur des échelles de temps allant de quelques jours à quelques dizaines d'années et peut être utilisé pour sonder le fond d'ondes gravitationnelles de très basse fréquence, dans le domaine du nano-Hertz.

Le fond d'ondes gravitationnelles stochastique quant à lui peut être, soit produit par l'effondrement ou à la coalescence de trous noirs massifs, soit d'origine cosmologique, par exemple comme relique de l'inflation ou émis par des boucles dans un réseau de cordes cosmiques.

Le premier résultat quantitatif issu de la chronométrie des pulsars a été récemment amélioré d'un facteur 5 en utilisant les observations "PTA" de sept pulsars millisecondes obtenues au télescope Parkes, soit $\Omega_{\text{gw}} h^2 < 1.9 \cdot 10^{-8}$. Un résultat équivalent a été obtenu en 2009 au moyen de six pulsars millisecondes sur la base des données du consortium Européen EPTA, qui regroupe et coordonne les observations pulsars des cinq grands radiotélescopes du vieux continent (Nançay, Effelsberg, Westerbork, Jodrell Bank, et Cagliari). Par comparaison, le signal le plus fort attendu est celui produit par un ensemble de trous noirs supermassifs distribués sur des échelles cosmologiques. Ce signal, qui dépend en outre du taux de coalescence des galaxies, serait de l'ordre de $\Omega_{\text{gw}} h^2 \sim 2 \times 10^{-10}$.

Les simulations suggèrent que la chronométrie de 20 pulsars avec une précision de 100 ns sur une période de 5 ans permettrait d'atteindre une sensibilité de $\Omega_{\text{gw}} h^2 < 6.6 \cdot 10^{-11}$ et donc de détecter ce signal. Au sein de l'EPTA, une équipe de USN travaille aujourd'hui activement sur le projet LEAP (Large European Array for Pulsars), financé par l'ERC, qui consiste en la combinaison des cinq grandes antennes européennes en un réseau phasé, pour constituer un télescope unique d'un diamètre équivalent à 194 m, soit l'équivalent d'un Arecibo voyant 80% du ciel ! En combinant : plus grande surface collectrice, extension de la bande d'analyse, suivi dense d'un plus grand nombre de pulsars stables, et traque des systématismes, le but affiché est d'améliorer la sensibilité d'un facteur 300 d'ici 5 ans, un facteur suffisant pour permettre une détection directe.

A une autre échelle, les systèmes de double étoiles à neutrons (NS-NS) sont connus comme sources d'ondes gravitationnelles. Plus généralement, ces systèmes, ainsi que les couples étoile à neutrons – naine blanche (NS-WD), sont suivis par mesure de chronométrie radio, parce qu'ils offrent un laboratoire naturel pour tester et contraindre la Relativité Générale ou les autres théories de la

Gravitation en régime de champ fort. Dans le cadre du formalisme post-képlérien, outre la mesure des masses des deux composantes, l'analyse des temps d'arrivée des pulsations permet en effet d'ajuster un nombre croissant de paramètres (délai Shapiro, délai gravitationnel, décroissance de l'orbite, avance du périastre) à mesure que la précision augmente et que la période d'observation s'allonge. Certains systèmes permettent en particulier de fixer une limite supérieure au rayonnement dipolaire, ou de mesurer une variations temporelle de la constante de Gravitation. Les cas de binaires très asymétriques en terme de masse et avec une excentricité importante sont bien sûr particulièrement intéressants pour ces applications. Une dizaine de ces systèmes sont suivis régulièrement depuis plusieurs années au radiotélescope de Nançay.

3.2. Mécanique céleste et mécanique spatiale

Plusieurs outils de recherche sont développés dans les laboratoires proposant de GRAM, pour analyser le mouvement des corps naturels (planètes, astéroïdes) ou artificiels (sondes spatiales) dans le système solaire. Ces outils peuvent bien entendu calculer les trajectoires des corps considérés, ce qui a une application importante pour des applications pratiques (navigation, rendez-vous...). Mais ils peuvent aussi utiliser des observations (mesures de distances, de vitesses, de directions) pour restituer des informations telles que les masses des corps (et plus généralement les champs de gravité), des paramètres de connection entre systèmes de référence ou encore faire des tests de gravitation.

Le logiciel GINS développé au GRGS Toulouse avec des contributions de nombreux laboratoires est d'abord destiné à l'analyse du mouvement de satellites en orbite autour de corps naturels (Terre, Lune, Mars, Venus...) et permet de caractériser leur champ de gravité et éventuellement leur atmosphère.

Le logiciel ODYSSEY a été développé par l'OCA en collaboration avec l'ONERA et le LKB pour analyser le mouvement de sondes spatiales à l'intérieur et à l'extérieur du système solaire.

Des modèles numériques de haute précision pour les satellites naturels sont développés dans le cadre du projet NOE à l'IMCCE en collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique et permettent par analyse de données spatiales de caractériser et sonder les champs de gravité de ces objets. Le cas spécifique des objets de l'environnement dynamique de la Terre (objets géocroiseurs, essais météoritiques) nécessite, lui, de coupler les approches gravitationnelle et non gravitationnelle et est l'objet du projet PODET (pôle sur la dynamique de l'environnement terrestre) à l'IMCCE en partenariat avec l'OCA et le LESIA.

Les éphémérides planétaires et lunaire INPOP sont les premières éphémérides numériques européennes de très haute précision indépendantes des éphémérides américaines (DE405, DE421) et ajustées aux observations sol (LLR) et spatiales (MGS, MEX, VEX, Cassini etc...) les plus précises. INPOP est utilisée par l'ESA comme éphémérides planétaires pour la navigation de la mission GAIA et le traitement des données obtenues au cours de la mission. 2 versions d'INPOP ont été livrées aux utilisateurs depuis 2003, début du projet. En plus des utilisations diverses d'INPOP (préparation de missions spatiales, traitement de données obtenues au cours des missions, prédiction d'occultations stellaires, analyses d'observations sol, analyse des données de timing de pulsars etc...), INPOP est un outil permettant d'une part d'apporter des éléments de compréhension de la formation du système solaire par le biais de détermination de masses d'asteroïdes (93 pour la dernière version d'INPOP) et d'autre part de tester la relativité générale et des modèles alternatifs de la gravitation.

L'équipe INPOP a été mise en place dès 2003 pour travailler aux développements des éphémérides planétaires. Cette équipe est une collaboration entre l'observatoire de Besançon et l'IMCCE: les développements liés à la dynamique des objets du système solaire étant menés sous la direction de J. Laskar à l'IMCCE et ceux liés aux traitements des observations, aux ajustements du modèle dynamique ainsi que les tests de physique fondamentale étant menés à l'observatoire de Besançon.

Utilisation d'observations spatiales pour des tests de gravitation

Les éphémérides planétaires actuelles utilisées pour la préparation des missions interplanétaires et pour l'analyse des données de suivis des sondes, telles que INPOP, sont construites avec une précision telle que la modélisation relativiste en est un facteur important. Inversement, la physique fondamentale trouve dans les éphémérides planétaires et les données de suivis de sondes spatiales telles que MGS, MEX et VEX un outil de tests idéal. Ces tests constitueront une part importante des futures missions spatiales.

C'est pourquoi l'équipe INPOP a mis en place une activité de recherche ciblant d'une part l'utilisation des données spatiales actuelles et d'autre part des simulations d'observations à venir afin d'étudier des paramètres tels que l'aplatissement du soleil, J_2 , les paramètres PPN β et γ , la

confrontation de modèles alternatifs de la gravité aux observations ainsi que les possibilités de détection de la perte de masse solaire.

A l'heure actuelle, des déterminations du J_2 solaire, et du paramètre PPN β issues des éphémérides planétaires sont obtenues avec une précision de l'ordre de 10^{-5} pour β et de 15% pour le J_2 .

Les futures missions spatiales telles que Gaia et Bepi-Colombo prévoient la détermination de paramètres PPN et du J_2 du soleil. Des simulations des observations issues de ces futures missions sont prévues en tenant compte des spécificités de chacune de ces missions. Il sera alors possible, sur la base d'ajustements d'INPOP sur ces données simulées, d'estimer les précisions avec lesquelles pourront être estimés les paramètres considérés. Ces simulations permettront également d'estimer la sensibilité de ces déterminations et de définir une optimisation dans les choix des observables (période couverte par les observations, précision nécessaire, cohérence entre les données, etc...).

De même, les observations par Gaia des astéroïdes permettront la détermination du paramètre PPN β du moment quadrupolaire J_2 et l'estimation d'une variation de la constante de gravitation dG/dt .

Des théories alternatives de la gravitation, comme celles développées par le LKB, le LPT-ENS ou le GReCO pourraient être introduites dans le modèle dynamique planétaire. Des comparaisons aux observations spatiales pourront être effectuées afin d'essayer de discriminer certaines d'entre elles.

De même, l'introduction des données LLR de nouvelle génération (Apollo, nouvelle station MEO) pourrait permettre d'améliorer les contraintes sur les paramètres gravitationnels.

La perte de masse du soleil résulte d'une prédiction théorique mais n'a jamais été observée directement. Le taux prédit est faible mais peut être introduit dans les équations dynamiques des éphémérides planétaires. Un axe de recherche est donc la mise en place de simulations permettant de déterminer la possibilité de détection d'une perte de masse du soleil dans le cadre des prochaines missions spatiales, et en particulier pour la mission Bepi-Colombo en orbite autour de Mercure.

Quelques membres des équipes du SYRTE ont été impliqués lors de la phase de définition des tests en physique fondamentale avec Gaia. Ils continuent actuellement à contribuer à leur préparation et leur réalisation pratique.

L'analyse des données VLBI (Very Long Baseline Interferometry) et Laser Lune (LLR) permet de déduire des contraintes observationnelles de la relativité et des théories alternatives parmi les meilleures à l'heure actuelle, en particulier en ce qui concerne les tests du principe d'équivalence ou les tests PPN. Le centre d'analyse VLBI du SYRTE, se consacre à l'analyse des observations régulières d'interférométrie radio à très longue base, technique de pointe basée sur l'observation depuis le sol de radiosources extragalactiques distantes de plusieurs milliards d'années-lumière. Il est envisageable d'étendre ce type d'analyse pour des tests des cadres alternatifs mentionnés ci-dessus, au-delà des tests PPN classiques (mesures du paramètre γ). Par ailleurs, le SYRTE utilise depuis une dizaine d'années les données LLR pour améliorer la connaissance du système Terre-Lune. La récente mise en service d'une nouvelle station Laser aux USA et la modernisation récente de la station de l'OCA en France va prolonger la période d'observation et permettre d'envisager une amélioration notable de la précision des observations (de quelques centimètres actuellement au millimètre dans un avenir proche). Ces progrès vont fixer de nouvelles contraintes aux théories de la gravitation.

Un nouvel axe de recherche consistera à rechercher des contraintes sur les modèles gravitationnels par l'étude de leurs implications sur la stabilité à long terme du Système solaire. En effet, la stabilité du système Solaire dépend fortement de la valeur des paramètres gravitationnels post newtoniens.

Ephémérides planétaires et systèmes de référence

Les éphémérides INPOP pour les planètes sont en libre service sur le site internet www.imcce.fr/inpop. Des versions utilisables par les logiciels du JPL sont disponibles de même que des versions plus complètes incluant les différences (TT-TDB).

Par l'utilisation de données de timing de pulsars millisecondes il est possible d'estimer avec quelles précisions les différentes éphémérides planétaires sont liées à l'ICRF. De plus, des observations VLBI de pulsars peuvent être combinées aux données de timing il est alors possible d'effectuer directement le lien entre les éphémérides planétaires et l'ICRF. Par ce biais, les éphémérides acquièrent une autonomie nouvelle vis-à-vis des observations VLBI de sondes spatiales, seules observations jusqu'à présent permettant le lien entre éphémérides planétaires et l'ICRF. Dans cet optique, des travaux sont menés pour lancer des campagnes d'observations VLBI de pulsars afin d'augmenter le nombre encore faible (moins de dix) de pulsars suivis en VLBI.

Des demandes de temps d'observations à l'EVN (European VLBI Network) seront encore déposées et notre participation à l'EPTA (European Pulsar Timing Array) s'intensifiera. Nous augmenterons le nombre de pulsars utilisés dans les tests de raccordement entre INPOP et l'ICRF.

Des études vont être menées sur l'utilisation des données de timing de pulsars millisecondes dans le cadre de l'ajustement d'INPOP aux observations. Ces données présentent un fort intérêt pour la détermination de masses de planètes ou de contraintes sur les orbites des planètes extérieures et notamment Jupiter.

3.3. Systèmes de Références, Métrologie de l'Espace-Temps

Astronomie relativiste : Gaia ou l'astrométrie de haute précision

Gaia réalise des observations astrométriques globales d'environ 10^9 sources sur l'ensemble de la sphère céleste et produit une solution donnant la position, la parallaxe et les deux composantes du mouvement propre. Au sein de ces sources il se trouvera de l'ordre de 500000 sources extragalactiques dont l'ensemble constituera une sphère de référence rigide de précision meilleure que la μas (micro-seconde de degré, soit 10^{-11} radians). En prenant pour hypothèse que ces sources distantes n'ont pas de rotation globale par rapport au fond cosmique, il est possible de créer une version optique de l'ICRF (c'est-à-dire une nouvelle réalisation, indépendante de la solution radio) répondant à l'ensemble des principes posés pour l'ICRS. De plus, compte tenu de la précision astrométrique de chaque source (entre 20 et 150 μas selon la magnitude), on pourra également tester l'existence de mouvements tangents plus ou moins systématiques à grande longueur d'onde ne se réduisant pas à une rotation.

Par exemple l'accélération du système solaire provenant de la rotation galactique va se traduire par un courant systématique dont l'amplitude sera mesurable avec les mesures de Gaia sur les quasars avec une précision de 10%. Cet effet n'a pu être détecté jusqu'à aujourd'hui et sa mise en évidence serait le point de départ de nouvelles réflexions visant à définir les futurs systèmes de référence de haute précision avec une origine au centre galactique

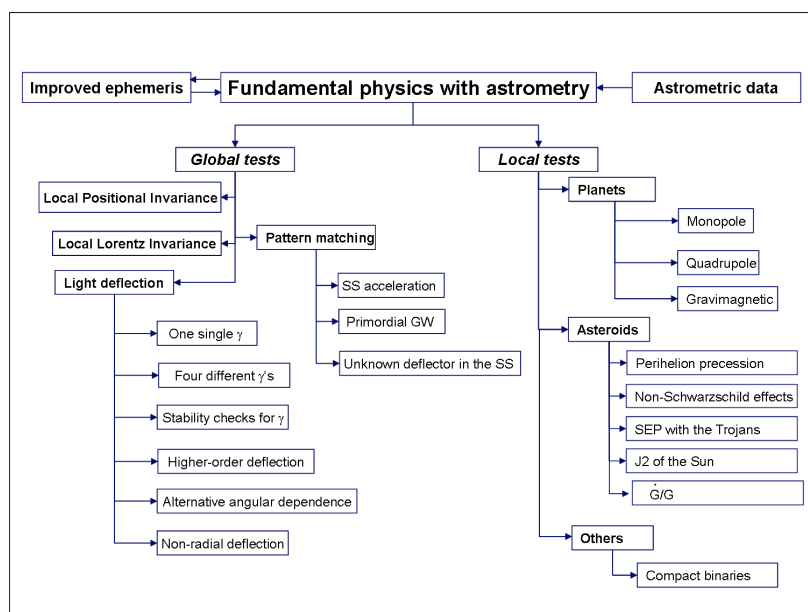
Les activités sur ce thème sont incorporées dans un *work-package* du traitement général des données, dont les membres sont en majorité dans des laboratoires français :

- Cassiopée : Responsabilité et organisation de l'activité et interface avec l'ensemble du projet Gaia au sein du DPAC et modélisation des mouvements tangents.
- SYRTE : Catalogue de référence pour les QSOs, visant à produire une liste de sources extragalactiques confirmées comprenant également les informations astrométriques et physiques connues par les relevés au sol.
- Cassiopée : Simulation astrométrique et photométrique d'un ensemble réaliste de QSOs tel qu'il pourrait être vu par Gaia. Cette simulation comprend la distribution spectrale des quasars en fonction de leur décalage spectral. Elle est incorporée au modèle d'univers général du simulateur Gaia
- LAB (Bordeaux) : Préparation de l'alignement du repère Gaia sur l'ICRF actuel, impliquant une sélection des meilleures sources de l'ICRF et une densification par de nouvelles observations VLBI/VLBA de sources radio observables par Gaia.
- SYRTE et LAB : variabilité des sources et stabilité du photocentre. Relation entre la position des centres d'émission radio et optique.

Les activités de simulation seront achevées en 2009 ; la préparation de la liste initiale avec les données sol, devrait l'être au moment des premières observations (2012), alors que la construction de l'ICRF Gaia et l'alignement vont s'étendre jusqu'à la fin du traitement, avec une solution intermédiaire autour de 2015. La densification des sources pour l'alignement du repère sur l'ICRF radio est en cours et devra se poursuivre même après le lancement pour s'assurer de la stabilité des sources.

Du fait de la précision des observations et des soins apportés aux aspects métrologiques de la mission, l'impact scientifique de Gaia dépasse le domaine purement astronomique et touche également à la physique fondamentale. Si ce point a été reconnu dès le début de la proposition avec les estimations des deux paramètres PPN principaux (γ et β), il s'est précisé et élargi avec des études plus approfondies et plus réalistes. La figure ci-dessous présente un diagramme illustrant les différentes catégories de tests planifiés avec Gaia. Les tests globaux tirent avantages de l'ensemble des observations couvrant toute la sphère céleste ('tests grand-champ') alors que les tests locaux sélectionnent des observations particulières autour des planètes d'une part, ou des observations d'astéroïdes d'autre part. Les travaux comportent en premier lieu des études sur les modèles

relativistes et la faisabilité des tests, des simulations pour qualifier les principes et plus tard la réalisation sur les données réelles. L'échelle de temps s'étend donc jusqu'à la fin de la mission et du traitement autour de 2020.



Tests de la relativité qui seront entrepris avec Gaia.

Tout ce qui concerne les études et développement touchant (i) la modélisation relativiste de l'astrométrie et du signal, (ii) les tests de relativité restreinte et générale, s'effectue au sein d'un groupe spécialisé du Consortium DPAC (REMAT : Relativity Model and Testing), animé par S. Klioner de l'Université de Dresde. Ce groupe comprend des membres d'instituts allemands, espagnols, français, italiens, suédois. Concernant l'implication française on retrouve les laboratoires suivants avec les activités spécifiques :

- Cassiopée : Préparation et optimisation des tests petit-champs autour des planètes géantes, visant en particulier à détecter la déflexion non-radiale des rayons lumineux provenant du moment quadrupolaire de Jupiter ou de Saturne et également de fournir une estimation de γ totalement indépendante du Soleil.
- SYRTE : Echelles de temps relativistes pour la mission Gaia et plus particulièrement la corrélation du temps propre réalisé par l'horloge à bord de Gaia avec une échelle terrestre.
- LKB : modélisation dans des théories alternatives de la déflexion des rayons lumineux et définition de tests à grand champ pour la dépendance de cette déflexion avec la distance angulaire au Soleil.
- Obs. Besançon et IMCCE : Fourniture d'éphémérides du système solaire de haute précision, paramétrée en TCB. Utilisation des observations Gaia des satellites naturels pour le positionnement des planètes et l'amélioration des éphémérides.
- IMCCE et Cassiopée : Ajustement des paramètres généraux sur les modèles dynamiques des astéroïdes, comprenant les variations séculaires de la constante de la gravitation (G) et le paramètre PPN de la non linéarité de la gravitation (β) et le rattachement du système de référence dynamique.

Laser-Satellite et Laser-Lune

La Télémétrie Laser s'appuie sur la mesure du temps de vol d'impulsions laser courtes (modulation d'amplitude incohérente à très faible cadence) entre une station laser au sol et une cible spatiale. Elle utilise des rétro réflecteurs (sur satellites artificiels ou déposés sur la Lune entre 1969 et 1973) d'un coût modeste et d'une durée de vie quasi infinie. Actuellement, les stations les plus performantes obtiennent une exactitude de quelques millimètres.

En tant que lien métrologique quasi-exact entre stations au sol et cibles spatiales, elle a été et est toujours très fortement associée à l'exploration durable de l'environnement de la Terre globale et à l'étude du Système Solaire (la Lune actuellement mais des cibles bien plus lointaines sont envisagées).

Le rôle de la télémétrie laser sur satellites a évolué par suite des immenses progrès accomplis aussi dans des techniques proches ayant des objectifs apparemment similaires comme GPS et DORIS.

Son rôle et ses applications se sont focalisés sur des points spécifiques plus limités que par le passé, mais où elle a acquis un rôle irremplaçable notamment grâce à son exactitude :

- Détermination du repère de référence terrestre (ITRF),
- Détermination d'un modèle de champ de gravité (dont la constante géocentrique de la gravitation GM_{Terre}) et des variations temporelles du champ de gravité à large échelle.
- Etalonnage d'autres techniques : altimétrie satellitaire (ERS, TOPEX/Poséidon, EnviSAT, Jason), GNSS (GPS et GLONASS et bientôt Galileo), trajectoire des satellites gravimétriques.

Pour accomplir ces objectifs, il faut disposer d'un réseau mondial et pérenne de stations.

La télémétrie laser sur la Lune permet d'observer le mouvement orbital et la rotation de la Lune avec une grande exactitude. L'étude du mouvement orbital permet de tester l'effet Nordvedt (une forme du principe d'équivalence fort), certains paramètres PPN, l'invariance temporelle de la constante de la gravitation et de quantifier la dissipation d'énergie à l'intérieur de la Lune. Il est également possible de quantifier l'élasticité de la Lune à partir de l'observation des déformations de la surface Lunaire par les effets de marée. L'étude de la rotation permet de caractériser l'intérieur de la Lune (existence d'un noyau solide).

Les laboratoires français sont très présents dans l'analyse des mesures puisque l'OCA/GeoAzur est centre d'analyse pour le laser satellite et l'OP/SYRTE est centre d'analyse pour le laser Lune. D'autre part l'analyse de la télémétrie laser Lune est incluse dans le calcul des éphémérides INPOP.

La France dispose de deux stations de télémétrie laser qui jouent des rôles complémentaires :

- La station mobile (FLTRS) avec un télescope de 13 cm est la station la plus facilement transportable au monde ; l'ensemble de ses composantes pèse environ 300 kg et elle peut être installée en un jour. Elle permet d'atteindre des cibles de basse et moyenne altitude (jusqu'à 6000 km) avec une précision sub-centimétrique. Véritablement opérationnelle depuis 2002, elle a déjà participé à 4 campagnes en Corse, 1 en Crête, 1 en Espagne, 1 en Bretagne et 1 en Australie (entre 3 et 6 mois pour chaque mission). Elle joue un rôle clé pour l'étalonnage des altimètres spatiaux et pour la validation de l'expérience T2L2. Une évolution technologique est à l'étude, en particulier pour la poursuite des satellites des constellations GNSS, aux applications diverses dont celles de physique fondamentale.
- La station fixe (MeO) avec un télescope de 154 cm permet de poursuivre les cibles d'altitude basse et haute avec une exactitude sub-centimétrique. C'est la station qui a fourni le plus grand nombre de mesures de distances entre la Terre et la Lune. Elle vient de subir une profonde rénovation qui va en particulier lui permettre d'accueillir des instruments focaux supplémentaires et de tester des nouvelles techniques.

Géodésie spatiale

La géodésie spatiale a pour but d'étudier, avec des moyens spatiaux, les dimensions, les formes (géométrique et gravifique) et le mouvement de rotation de la Terre. Ces études sont étendues aux autres planètes en utilisant des techniques similaires.

Une sonde spatiale peut avoir plusieurs fonctions :

- Une sonde est une cible géodésique : la sonde joue alors le rôle de point de référence externe ; c'est le domaine historique de la géodésie spatiale et il reste de première importance aujourd'hui pour sa contribution aux systèmes de référence terrestre et céleste, fondamentale pour l'ensemble de l'astronomie.
- Une sonde est un senseur de force : la comparaison de la dynamique modélisée et des observations permet d'explorer l'environnement dans lequel la sonde évolue (par exemple l'atmosphère, le champ de gravité, l'effet Lense-Thirring...)
- Une sonde est un vecteur d'instrument : l'espace permet d'obtenir un environnement d'observation plus favorable (absence d'atmosphère et nombreuses perturbations atténuées), de faire des observations plus globales (survol systématique d'une planète) ou encore de se rapprocher des objets célestes.

Dans la plupart des cas, ces fonctions sont simultanées, complémentaires et indissociables. Il est indispensable pour les deux premières fonctions (et très souvent au moins utile pour la troisième fonction) de disposer d'observations régulières permettant de relier le mouvement de la cible au repère terrestre. Les moyens les plus utilisés sont la télémétrie laser, le système DORIS et les systèmes GNSS (GPS, GLONASS et bientôt Galileo). Pour ces techniques, les instruments à embarquer sur le satellite sont respectivement des réflecteurs laser, des récepteurs GPS, des émetteurs DORIS. Il peut également être très utile d'embarquer un ou plusieurs accéléromètres qui permettent de mesurer, selon la configuration choisie, les forces non gravitationnelles ou le gradient de gravité.

- Contribution aux systèmes de référence

Les techniques de géodésie spatiale permettent d'établir un système de référence terrestre globale avec une précision sub-centimétrique. Plus précisément les produits issus de la géodésie spatiale sont : (i) un ensemble cohérent de coordonnées de stations de référence, et (ii) les coordonnées de l'axe des pôles dans ce même système. La densité des observations et l'amélioration des techniques de traitement permettent de fournir ces données à une fréquence hebdomadaire et on s'oriente même vers des solutions quotidiennes. Cette fréquence élevée permet de prendre en compte au mieux les variations temporelles des coordonnées. Ceci permet d'une part d'obtenir des données plus exactes pour des utilisations pratiques (calcul d'éphémérides...) et d'autre part de disposer de séries temporelles denses pour relier ces variations à des sources liées à l'environnement.

Les laboratoires français jouent un rôle de premier plan à plusieurs niveaux :

- Pour la production de données d'observation avec les trois techniques citées plus haut : nous avons des stations GPS de référence ; la technique DORIS a été développée et est contrôlée par la France (CNES et IGN) ; la station fixe de l'OCA est l'une des plus productives du réseau mondial (parmi une trentaine pour la télémétrie sur lasers satellites et parmi 2 pour la télémétrie laser sur la Lune).
- Les équipes françaises abritent des centres de données et d'analyse agréés par les services scientifiques internationaux relatifs aux techniques laser-satellites, laser-Lune, VLBI, GPS, DORIS, ainsi qu'un centre de coordination dans le cas de la technique DORIS et les Centres de produits ICRS, ITRS et Orientation terrestre de l'IERS.
- Pour la combinaison des différentes techniques pour obtenir des résultats plus robustes. Par exemple l'IGN est le centre qui produit, au niveau mondial, l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

Les techniques de géodésie spatiale contribuent également à déterminer les paramètres d'orientation de la Terre.

- Détermination du champ de gravité

Le mouvement d'un satellite de la Terre est sensible au champ de gravité ; des observations très précises de ce mouvement permettent d'inverser le problème et de déterminer des modèles de champ de gravité. Il faut pour cela des observations sur de nombreux satellites et durant de longues durées (plusieurs années), pour mettre en évidence les variabilités annuelles et interannuelles, ainsi que des phénomènes d'origine géologique, produisant sur les orbites des effets extrêmement faibles mais cumulatifs dans le temps). Les équipes françaises regroupées au sein du GRGS ont toujours joué un rôle de premier plan dans la production de modèles de champ de gravité. Cela s'est confirmé au début des années 2000 avec un progrès important grâce à l'utilisation d'un accéléromètre (développé par l'ONERA) sur le satellite CHAMP : l'accéléromètre mesure les forces de surface dont la modélisation est le facteur limitant à basse altitude. Pour le présent et le proche avenir, les équipes françaises, après avoir réalisé les accéléromètres de la mission GRACE, coopération NASA/DLR, sont fortement impliquées dans la mission gradiométrique GOCE de l'ESA, lancée en Mars 2009 et emportant six accéléromètres de l'ONERA . De plus, ces équipes sont chargées par l'ESA de calculer, pour la communauté, le modèle issu des mesures de GOCE. Ce modèle va apporter des progrès spectaculaires avec la production d'un géoïde avec une résolution meilleure que 100 km et une précision meilleure que le cm. En particulier le terme principal des modèles de champ de gravité est la constante géocentrique de la gravitation GM_{Terre} . Il faut noter que les modèles de champ de gravité incluent une partie statique et une partie variable due aux transferts de masses (effets périodiques de marée, transferts de masses saisonniers ou à long terme...).

Par extension ces techniques de détermination s'appliquent à la géodésie planétaire. La détermination du champ de gravité par un orbiter est également utilisée pour d'autres corps célestes que la Terre, en particulier la Lune, Mars, les systèmes de satellites naturels (missions EJSM vers Jupiter, Cassini vers Saturne) voire même des astéroïdes. Le groupe de Toulouse joue un rôle important dans l'exploitation des données obtenues autour de Mars. Le modèle NOE de l'IMCCE pour les satellites naturels s'inscrit aussi dans ce cadre.

- Autres effets dynamiques

La comparaison des modèles dynamiques aux observations permet d'accroître nos connaissances sur de nombreux effets d'amplitude supérieure à environ 10^{-11} ms^{-2} (donc jusqu'à 10^{12} fois plus faibles que le terme principal de gravité). Cela concerne par exemple le freinage par l'atmosphère, des forces radiatives, ou encore des tests de la gravitation (effet Lense-Thirring, repère préférentiel...). Les laboratoires français (OCA et GRGS/Toulouse) ont de nombreuses contributions dans ces domaines.

En géodésie spatiale l'un des enjeux scientifiques majeurs pour la décennie à venir est de mettre en place un système mondial d'observation de la Terre avec une précision de niveau millimétrique. Il ne s'agit pas seulement de réaliser une pure performance métrologique, mais surtout d'avoir accès à un ensemble global d'observations des déformations géométriques et dynamiques du système « Terre ». Déjà, l'obtention de dix chiffres significatifs sur les paramètres du champ de gravité de la Terre permettent de mettre en évidence les variations temporelles liées aux transferts de masse à grande échelle spatiale, par l'étude des trajectoires des satellites artificiels. Avec un tel niveau de précision, il sera possible d'associer, avec des méthodes d'astronomie, les conséquences dynamiques (dans le champ de gravité), et géométriques (dans la position des stations d'observations) des défauts ou des excès de masse à l'intérieur ou à la surface de la Terre. Tout cela passera nécessairement par une utilisation combinée de toutes les techniques de géodésie spatiale, et en particulier les techniques GNSS et laser.

VLBI

La technique VLBI (radio-interférométrie à très longue base) est basée sur l'observation depuis le sol de radiosources extragalactiques distantes de plusieurs milliards d'années lumières, avec un réseau de radiotélescopes situés sur différents continents, constituant ainsi un interféromètre de la taille de la Terre permettant d'atteindre une résolution angulaire inégalée par toute autre technique astronomique. Les données acquises par cette technique sont fondamentales pour l'établissement de repères de référence terrestre et céleste ainsi que pour le suivi de la rotation de la Terre. De telles observations nécessitent par essence des coopérations internationales, puisqu'elles doivent être conduites simultanément avec des radiotélescopes situés sur différents continents. L'organisation en service international en 1999, date de création de l'IVS (international VLBI Service for geodesy and astrometry, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>), a permis de fédérer la communauté travaillant dans ce domaine, tout en pérennisant les programmes d'observations VLBI et en mutualisant les développements techniques. Au niveau national, deux laboratoires sont partie prenante dans l'IVS : le SYRTE et le LAB (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux). Les travaux menés par ces équipes concernent le suivi de la rotation de la Terre, la réalisation du repère céleste, la cartographie VLBI des sources de référence, ainsi que la combinaison des données VLBI avec d'autres techniques de géodésie spatiale (SLR, GPS, DORIS), pour la réalisation de systèmes de référence unifiés. A noter en particulier que les équipes du LAB et du SYRTE ont eu une contribution majeure dans la réalisation de l'ICRF2, le nouveau repère de référence céleste récemment adopté par l'IAU (août 2009), en étant à l'origine du choix des 295 sources de définition de ce repère. Par ailleurs, la précision astrométrique du VLBI qui dépasse les 100 μ as aujourd'hui, est un point clef permettant de tester les théories de la gravitation, notamment par la mesure du paramètre post-Newtonien γ . Une équipe du SYRTE a ainsi récemment réestimé ce paramètre avec l'ensemble des données VLBI actuellement disponibles, et il est apparu une nette amélioration par rapport aux précédentes estimations de 2004.

Rotation de la Terre

Ce thème de recherches porte sur la modélisation de très haute précision du mouvement de rotation de la Terre. Cette modélisation exige une résolution rigoureuse des équations de la rotation utilisant les développements les plus complets du couple extérieur luni-solaire et planétaire agissant sur un modèle de Terre « non-rigide ». La formulation des équations doit se baser sur des définitions et réalisations les plus exactes possibles (i) du système de référence céleste et des systèmes de référence céleste et terrestre « intermédiaires » liés à l'équateur intermédiaire (de la date) et une origine « non-tournante » sur cet équateur et (ii) des échelles de temps les plus adaptées à la formulation des équations (Temps Terrestre, TT ; Temps Coordonné Barycentrique, TCB, etc.).

Le but est d'obtenir une modélisation à une précision de l'ordre de la microarcseconde du mouvement de précession-nutation de la Terre et de sa rotation autour de son axe dont la comparaison aux observations VLBI (interférométrie à très longue base) et LLR (téléométrie laser sur la Lune) de très haute précision permet d'améliorer la connaissance de nombreux paramètres auxquels la formulation des solutions est la plus sensible. Ces paramètres comprennent d'une part, des paramètres dynamiques du modèle de Terre (ellipticité dynamique de la Terre et de son noyau fluide, coefficients de couplage noyau-manteau et de dissipation de marées) et d'autre part, des paramètres de physique fondamentale tels que le rapport de la masse de la Lune à la masse de la Terre et l'amplitude de la rotation relativiste (i.e. précession et nutation « géodésiques ») du repère de référence géocentrique par rapport au repère de référence centré au barycentre du Système solaire.

De plus, la rotation de la Terre est perturbée par de nombreux effets géophysiques, tels que les déplacements des masses fluides (atmosphère, océans) et les couplages entre ces différentes

composantes (manteau, noyau fluide), qui sont difficilement prévisibles. L'amélioration constante des techniques de géodésie spatiale et de VLBI permet d'identifier avec une précision croissante ces perturbations d'origine géophysique. Les équipes du SYRTE contribuent, dans le cadre d'une collaboration internationale très active, à la détermination des irrégularités de la rotation terrestre par réduction des observations astro-géodésiques. Le SYRTE comprend en particulier deux composantes du Service scientifique international IERS (International Earth Rotation and Reference systems Service). Le Centre de l'Orientation Terrestre, responsable de l'évaluation des paramètres de l'orientation terrestre et le centre ICRS, responsable de la maintenance de l'ICRS et l'ICRF.

Échelles de temps

La réalisation de l'unité de temps, la seconde, est équivalente à la réalisation d'une référence de fréquence. En effet la fonction des « étalons primaires de fréquence » est de fournir une référence de fréquence qui est reliée le plus exactement possible à la fréquence de la transition hyperfine de césium qui définit la seconde. Les meilleurs étalons primaires sont aujourd'hui les fontaines atomiques à césium ; la France a joué un rôle de pionnier dans leur développement et est leader mondial dans ce domaine. Le projet spatial PHARAO/ACES est une suite de ces travaux.

Pour préparer l'avenir et une future redéfinition de la seconde, potentiellement dans la décennie à venir, de nombreux laboratoires développent des étalons basés sur des transitions atomiques dans la gamme optique. Des laboratoires français travaillent sur deux approches à ces « horloges optiques » : à ion unique et à atomes neutres piégés en réseau optique.

Les oscillateurs sont un composant essentiel des étalons de fréquence et ont de très nombreuses autres applications. Des laboratoires français sont aussi très actifs dans ce domaine, avec des développements d'oscillateurs piézoélectriques, oscillateurs cryogéniques à cristal de saphir et lasers ultrastables. De nombreuses autres techniques sont nécessaires pour exploiter les signaux d'oscillateurs et d'étalons, dont l'électronique hyperfréquence, des chaînes de synthèse et de mesure de fréquences optiques à base de lasers femtosecondes. Les méthodes physiques et les technologies développées sont également exploitées dans un but de transfert industriel, notamment concernant des horloges atomiques compactes.

Pour réaliser une horloge proprement dite ou une échelle de temps, il faut adjoindre à un étalon de fréquence la notion d'une origine temporelle, ainsi qu'un compteur, qui ne doit jamais s'arrêter sous peine de perdre la continuité de l'échelle. Pour des raisons de fiabilité et de performance il est essentiel de comparer plusieurs étalons de fréquences ou horloges entre elles et, par une modélisation physique et statistique, de construire une échelle moyenne, que l'on appelle « horloge composite ». Cette horloge composite peut être représentée uniquement par les résultats numériques de la modélisation, dans quel cas on parle « d'horloge papier », ou peut être matérialisée par un signal physique.

Il est essentiel de pouvoir comparer des étalons de fréquence et des échelles de temps entre eux ainsi que de transmettre des références de fréquence et de temps à des utilisateurs. Si les transmissions de signaux et les comparaisons entre horloges sur un même lieu géographique sont bien maîtrisées, elles représentent un problème fondamental entre horloges distantes. Les deux méthodes les plus répandues sont basées d'une part sur la réception simultanée de signaux issus des systèmes de navigation par satellites, les « GNSS », dont le GPS est un exemple, d'autre part sur l'échange de signaux via des satellites de télécommunications, le « TWSTFT ». Les performances de ces méthodes constituent actuellement une limitation à la comparaison des horloges optiques entre elles et donc à l'établissement d'une nouvelle définition de la seconde.

Divers améliorations de ces méthodes sont en cours : le développement et l'exploitation de nouveaux systèmes de navigation tels que Galileo ; l'exploitation de la phase de la porteuse dans le TWSTFT, méthode utilisée par le lien micro-onde de la mission ACES. Le lien laser T2L2, en orbite sur Jason 2, est une approche alternative qui offre déjà des performances significativement meilleures que les systèmes actuels. En parallèle à ces méthodes spatiales, l'utilisation de réseaux de fibres optiques est expérimentée avec beaucoup de succès et un projet en cours de montage propose de relier les principaux laboratoires de métrologie européens entre eux. Nous jetons peut-être en ce moment les bases d'un réseau mondial hybride, avec des réseaux fibrés sur les continents et des liens intercontinentaux par satellites. Les laboratoires français sont moteurs dans nombre de ces sujets. Ils sont également actifs dans le développement de méthodes destinées à transmettre les références de temps-fréquence vers de larges communautés d'utilisateurs.

La réalisation des références françaises de la seconde et du temps et leur mise à disposition auprès de tous les utilisateurs sont depuis longtemps des missions de la communauté astronomie-astrophysique. Dans ce but ses laboratoires collaborent étroitement avec des laboratoires de la physique et des INST2I ainsi qu'avec des grands organismes publics et des groupes industriels. Ce

réseau français travaille dans un contexte de forte coordination (et compétition !) mondiale, et fait notamment une contribution importante à l'échelle de temps de référence internationale, le « temps universel coordonné » UTC, une échelle de temps papier réalisé par le Bureau International des Poids et Mesures. Cela permet aussi d'assurer la traçabilité internationale des références françaises, ce qui est essentielle pour leurs utilisateurs.

Parmi les laboratoires français investis dans ce domaine on peut identifier : SYRTE, LKB, LPL, APC (Paris), UTINAM et FEMTO-ST (Besançon), Géosciences Azur et ARTEMIS (Côte d'Azur), PIIM (Marseille). Parmi les organismes français concernés, en plus du CNRS (dont 3 instituts), des observatoires et universités, on peut citer LNE, CNES, DGA.

4. Structuration

La présente démarche de création du GRAM regroupe 22 laboratoires de 15 Etablissements. Le nombre de personnes concernées est estimé entre 250 et 300, un comptage plus précis étant en cours. Le tableau 2. ci-dessous donne la composition actuelle du GRAM de façon plus détaillée. Le GRAM inclut dans son intégralité le GPhyS (groupement « Gravitation et Physique Fondamentale dans l'Espace » crée au sein de l'observatoire de Paris). Cependant, il va bien au-delà, en y joignant des participants des autres domaines concernés à savoir de la métrologie de l'espace temps/systèmes de référence et de la mécanique céleste et spatiale. Le but du GRAM est de créer un cadre qui permet à ces communautés d'échanger et de travailler ensemble sur les thématiques d'intérêt commun, ce qui est essentiel pour réussir certains des objectifs scientifiques mentionnés dans ce document. Un tel cadre servira aussi à mieux coordonner le travail scientifique des différents groupes, d'accompagner scientifiquement les grands projets en cours et de permettre les échanges nécessaires à l'élaboration de propositions de futurs projets. Une coordination scientifique des projets est essentielle dans la perspective de futurs appels d'offres des agences spatiales (notamment de l'ESA) et des autres acteurs nationaux et internationaux (CNRS, ERC, etc...). En particulier, il est clair que cela nécessite une interface avec les collègues européens, interface pour laquelle le GRAM pourrait jouer le rôle d'interlocuteur national. Il apparaît naturel qu'une telle structure soit portée par l'INSU car la plupart des activités s'inscrivent dans ses thématiques. Cependant d'autres instituts et organismes sont concernés et ont pour certains d'entre eux déjà affirmé leur intérêt (INP, INST2I, CNES, ONERA, IN2P3, CEA, IGN, LNE). Nous proposons donc la création d'une Action Spécifique ou bien d'un Programme National au sein de l'INSU avec la participation d'autres instituts et organismes si ils le souhaitent, avec les objectifs suivants :

- Fédération d'équipes autour de thèmes communs dans le but de favoriser des échanges et travaux communs. Ceci contribuera sans aucun doute à des effets de synergie qui devraient d'une part profiter aux projets existants, d'autre part stimuler des projets nouveaux utilisant les expertises différentes des équipes.
- Soutenir la synergie entre les travaux théoriques et les développements technologiques. La mise en place d'interactions suivies et fructueuses entre théoriciens et expérimentateurs est un moyen privilégié de propositions de nouvelles idées qui aboutissent à la mise en place de nouveaux projets expérimentaux.
- Se concerter pour optimiser les choix de propositions de nouveaux grands projets. Suivi de l'évolution des projets du point de vue scientifique et technologique.
- Relayer les résultats des travaux auprès d'équipes extérieures et auprès des autres organismes nationaux et internationaux. Favoriser l'échange avec les autres acteurs du domaine et des domaines liés et assurer une visibilité accrue des travaux.
- Soutenir et favoriser la recherche sur les technologies et l'instrumentation ainsi que la mise en place d'activités complémentaires (calcul intensif, analyse de données, etc...).

Pour atteindre ces objectifs le GRAM organisera des réunions régulières de ses membres pour interagir et faire le point sur les différents projets et de favoriser des collaborations plus étroites entre les participants. En cas de besoin, des groupes de travail spécifiques pourront être créés pour étudier une problématique ou un projet particulier. Par ailleurs le GRAM soutiendra d'une manière continue des projets de recherche de ses membres, avec un accent particulier sur les projets qui présentent un caractère interdisciplinaire en couvrant plusieurs domaines et thématiques du GRAM. Mises à part ces actions continues, il est prévu deux types d'actions ponctuelles :

- L'organisation d'un colloque annuel qui regroupe les membres du GRAM ainsi que les autres acteurs du domaine. Ce colloque servira à présenter les travaux des membres du GRAM, mais

aussi à inviter et à interagir avec les autres groupes européennes et internationaux qui travaillent dans les domaines concernés. Ce colloque sera l'occasion de faire le point sur les derniers développements théoriques et technologiques en sessions de présentations « classiques » et en discussions plus générales (tables rondes). Les programmes et les présentations de ces colloques seront accessibles publiquement via le site web du GRAM.

- Des appels d'offre lancés par le GRAM pour l'attribution des fonds aux laboratoires participants, dans le but d'inciter et soutenir des actions de développement technologique ou des activités de calcul intensif. Ces appels pourront être généraux concernant toutes les thématiques du GRAM avec, là aussi, un accent sur l'interdisciplinarité des propositions, ou a contrario limités à certaines thématiques avec des besoins ponctuels et spécifiques.

Bien évidemment différentes structures (GPhyS, GRGS, PCHE, AS-Gaia, IFRAF, ...) recouvrant partiellement les domaines du GRAM existent déjà à l'INSU et ailleurs. La figure 1. donne un aperçu de l'intersection du GRAM avec ces structures existantes. Cependant aucune de ces structures ne semble adaptée aux besoins spécifiques d'interdisciplinarité et de pérennité naissant d'une part de l'intersection des trois grands domaines qu'on retrouve dans nombreux grands projets (T2L2, Microscope, Gaia, ACES, ...) et d'autre part dans les échelles de temps importantes sur lesquelles ces mêmes projets ainsi que des projets futurs évoluent.

Le GRAM sera animé par un/deux responsable(s) (fonction remplie à présent conjointement par Peter Wolf et Gilles Métris) épaulé par un comité scientifique dont la constitution devrait refléter l'ensemble des thématiques concernées. Le rôle du conseil scientifique sera l'organisation des réunions, rencontres, et colloques, l'incitation des projets et collaborations, et le suivi critique des projets en cours, en particulier ceux soutenus par le GRAM. Il se réunira environ deux fois par an (et plus si nécessaire), les réunions donnant lieu à des comptes rendus disponibles aux membres du GRAM sur le site internet. Par ailleurs il lancera les appels d'offres et décidera des attributions des fonds. Il évaluera l'utilisation de ces fonds sur la base de rapports d'étapes et finaux soumis par les équipes titulaires. Le conseil scientifique gardera le contact avec les laboratoires participants via une personne de contact par laboratoire (voir le tableau 2). Il sera responsable du fonctionnement du GRAM vis à vis de l'INSU. Dans le cas d'une participation d'organismes autres que l'INSU (INP, INST2I, ONERA, CNES, ...) il serait souhaitable de former un haut conseil constitué des représentants des différents instituts et organismes. Dans ce cas le conseil scientifique du GRAM sera responsable vis à vis du haut conseil.

Domaine	Thématiques fédératrices	Projets	Laboratoires
Gravitation, Physique Fondamentale	<ul style="list-style-type: none"> - Tests des lois fondamentales de la physique (relativité, lois de gravitation) - Développements technologiques au sol et pour instrumentation embarquée - Théories des interactions fondamentales 	T2L2, PHARAO/ACES, MICROSCOPE, LISA PF, LISA, GAP, ODYSSEY, SAGAS, VIRGO, ICE, Tests en laboratoire, FORCA-G, Test avec Laser Lune, VLBI	APC, LKB, LCFIO, GéoAzur, CASSIOPEE, ARTEMIS, SYRTE, IMCCE, LUTH, USN, LPT-ENS, DMPH, LCAR, LPC2E, LPL, CEA, LNCMI, IAP, LATT
Métrologie de l'espace-temps/fréquence et Systèmes de référence	<ul style="list-style-type: none"> - Construction & raccordement des systèmes de références - Astrométrie - Géodésie spatiale - Échelles de temps - Rotation de la Terre - Géopotential - Contrainte des modèles d'étude des environnements planétaires 	Gaia, LQAC, LLR, VLBI, SLR, DORIS, GNSS, GEOSTAR, Galileo, pulsars, IERS, satellites géodésiques, VLBI	Obs. Besançon, LAB, SYRTE, IMCCE, Géoazur, CASSIOPEE, USN, DTP, LAREG, DMPH
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, missions non-dédiées (EJSM, ...)	IMCCE, Géoazur, CASSIOPEE, SYRTE, Obs. de Besançon, DTP

Tab. 1 : Structure scientifique du GRAM

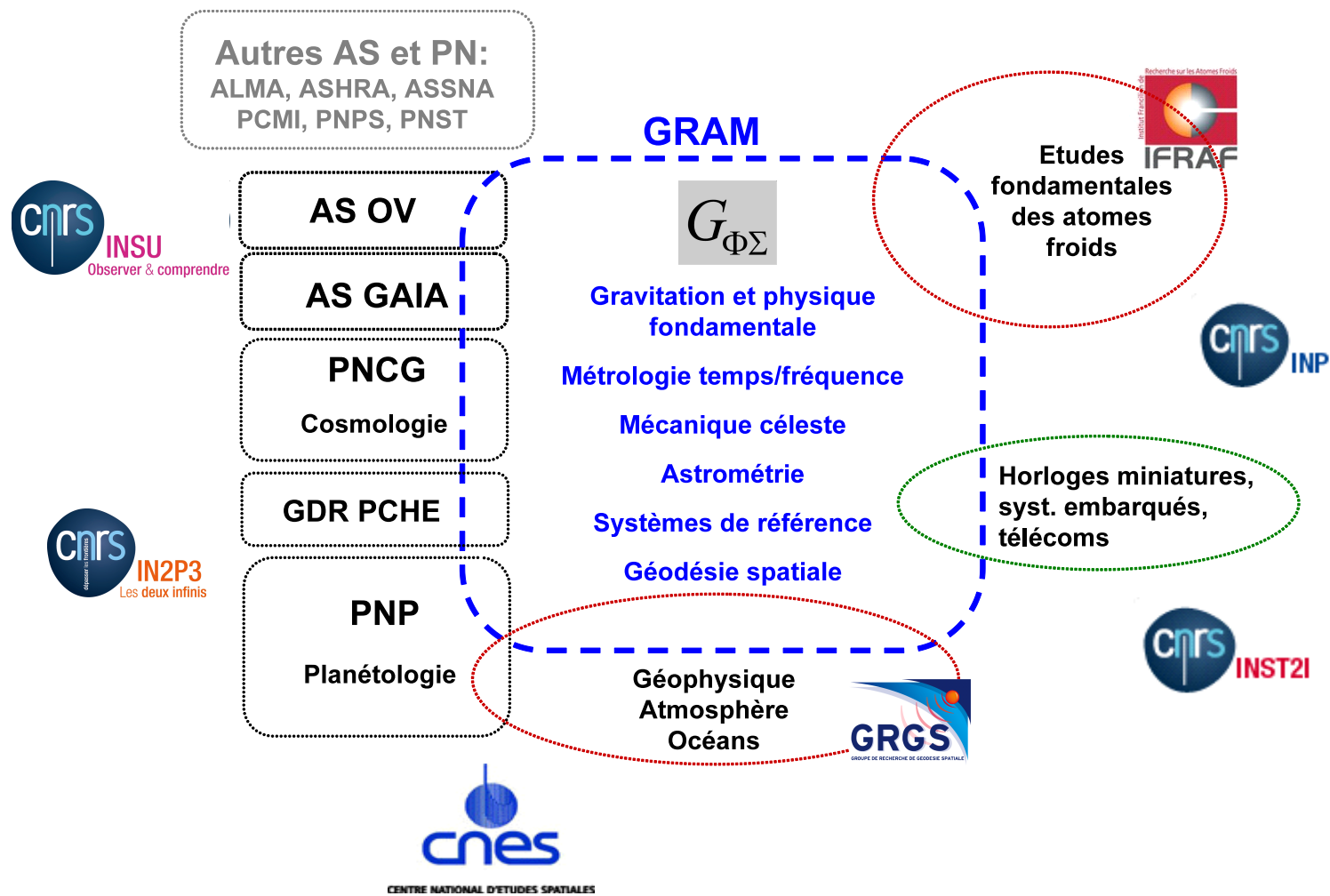


Fig. 1 : Représentation schématique des contours du GRAM et de son intersection avec les structures existantes.

Laboratoire	Contacts	Equipes concernées	Thématiques concernées	ETP concernés
Obs. Besançon (Univ. Besançon, CNRS)	A. Fienga	ARTE	Tests de phys. fond. – missions non-dédiées Ephémérides planétaires Horloges - métrologie temps/fréquences	2 Ch. 10 IT Total : 12
LAB (Univ. Bordeaux 1, CNRS)	P. Charlot	M2A	VLBI Rotation de la Terre	1 Ch. 2 IT 2 post-doc Total : 5
Geo-Azur (Univ. Nice, CNRS, OCA, IRD)	F. Deleflie, P. Exertier, G. Métris	AstroGeo	Horloges - Métrologie temps/fréquences T2L2 – liens optiques Microscope Laser satellite – Laser lune Géodésie spatiale Tests de physique fondamentale	6 Ch (+2 émérites) 15 IT Total : 23
ARTEMIS (Univ. Nice, CNRS, OCA)	N. Man		Lasers stabilisés – liens optiques DéTECTEURS OG au sol Préparation de la mission LISA Fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles Tests de la gravitation et théories alternatives	10 Ch. & EC 7 IT 6 doc/post-doc Total : 23
CASSIOPEE (Univ. Nice, CNRS, OCA)	F. Mignard		Gaia – Astrométrie spatiale Mécanique céleste	3 Ch. Total : 3
IMCCE (Obs. Paris, CNRS, Univ. Paris 6, Univ. Lille 1)	J. Laskar, W. Thuillot, A. Vienne	2 équipes (sur 2) : - Groupe astrométrie et planétologie - Astronomie et systèmes dynamiques	Mécanique céleste Astrométrie spatiale et sol Tests de phys. fond. – missions non-dédiées Ephémérides planétaires	16 Ch & EC 7 IT 9 docs Total : 32
LUTH (Obs. Paris, CNRS, Univ. Paris 7)	E.ourgoulhon		Sources d'ondes gravitationnelles Préparation de la mission LISA	
SYRTE (Obs. Paris, CNRS, Univ. Paris 6)	N. Capitaine, N. Dimarcq, P. Tuckey, P. Wolf	7 équipes (sur 8) : Métrologie fréq. micro-ondes Métrologie fréq. optiques Métrologie temps Interféro. Atomique / capt. Inertiels Syst. référence célestes Rotation de la Terre/géodésie spatiale Théorie et métrologie	PHARAO/ACES Horloges – métrologie temps/fréquences Lasers stabilisés, capteurs inertiels Préparation LISA VLBI Laser lune Gaia Rotation de la Terre Tests de physique fondamentale	40 Ch. & EC 16 IT 27 docs/post-docs Total : 83
USN (Obs. Paris, CNRS, Univ. Paris 6)	G. Theureau		Observation pulsars Tests de la gravitation Fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles	2 Ch. & EC Total : 2

APC (Obs. Paris, CNRS, Univ. Paris 7, CEA)	P. Binetruy		Préparation de la mission LISA	
IAP (Univ. Paris 6, CNRS)	G. Esposito-Farese		Tests de la gravitation et théories alternatives Sources d'ondes gravitationnelles	4 Ch. & EC 2 doc/post-doc Total : 6
LCFIO (Univ. P 11, CNRS)	P. Bouyer	1 équipe	Interférométrie atomique - capteurs inertiels	1 Ch. 3 doc/post-doc Total : 4
LKB (ENS, Univ. Paris 6, CNRS)	S. Reynaud	7 équipes (sur 13) sont concernées (pour une partie de leur activité) : Métrologie des systèmes simples et tests fondamentaux Optique Quantique Fluctuations quantiques et relativité Mesure et bruits fondamentaux Métrologie de l'ion H ²⁺ Gaz de Fermi ultrafroids Microcircuits à Atomes	PHARAO/ACES Horloges atomiques, laser et applications Capteurs inertiels et gravimètres Tests de physique fondamentale Tests de la gravitation et théories alternatives Fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles Préparation de la mission LISA Astrométrie relativiste (Gaia)	20 Ch. & EC 9 docs/post-docs Total : 29
LPT (ENS, Univ. Paris 6, CNRS)	M.T. Jaekel	1 équipe (sur 2) : Interactions fondamentales	Tests de physique fondamentale Tests de la gravitation et théories alternatives Gravitation et Univers primordial Ondes gravitationnelles	9 Ch. & EC (+1 émérite) Total : 10
IPhT (CEA, CNRS)	P. Brax, C. Caprini, F. Vernizzi	2 équipes : Cosmologie et Astroparticules Physique au delà du modèle standard	Tests de la gravitation et théories alternatives Gravitation et univers primordial	4 Ch. & 1 post-doc Total : 5
LCAR (Univ. Toulouse, CNRS)	J. Vigué, C. Rizzo		Tests de physique fondamentale Interférométrie atomique	4 Ch. & EC Total : 4
LNCMI (Univ. Toulouse, CNRS)	G. Rikken, R. Battesti		Tests de physique fondamentale	2 Ch. & EC Total : 2
DMPH (ONERA)	P. Touboul	3 Unités de recherche du département DMPH : Instrumentation et Equipements Spatiaux (IEA) Capteurs et Micro Technologie (CMT) Sources Laser et Métrologie (SLM)	MICROSCOPE, GOCE, Preparation GRACE II, GRACE Follow-on, Préparation ODYSSEY, GAP Senseurs gravitationnels, inertiels et accéléromètres linéaires/angulaires, Interférométrie et gravimétrie atomique sol & espace, Tests de physique fondamentale Laser et applications	15 Ingénieurs de recherche, 6 Tech. 4 docs/post docs

LAL (Univ. Paris 11, CNRS)	F. Cavalier		Détecteurs OG au sol	
LAREG (IGN)	Z. Altamimi		Géodesie spatiale Laser satellite	
DTP (Obs. Midi-Pyrénées, Univ. Toulouse 3, CNRS)	R. Biancale	2 équipes	Géodesie spatiale Mécanique céleste Planétologie	10 CH. & EC Total : 10
LPL (Univ. Paris 13, CNRS)	C. Chardonnet, A. Amy-Klein	1 équipe (sur 7)	Horloges moléculaires, laser et applications Tests de physique fondamentale	7 Ch. & EC 4 docs/post-docs Total : 11
LPC2E	A. Spallicci	Equipe ASTRO du LPC2E + Coopération avec les Laboratoires MAPMO Orléans et LMPT Tours	Self-force (réaction de la radiation EMRI/LISA) Observation pulsars (Nançay) Théories et tests de la gravitation et des photons Ondes gravitationnelles et sources (LISA/Virgo)	2 CNAP 1 CNRS 3 EC + 2 docs Total : 8

Tab. 2 : Participants du GRAM