

HOGRe

Horloges Optiques pour la Géodésie Relativiste

Mission		Instrument		R&T	
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
<u>Classe de mission</u>					
L	M	Mini	Micro	Nano	Ballon
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Cadre de la mission</u>					
ESA Cosmic Vision		Mission d'Opportunité		Multilatéral	
M4	S2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
Date de lancement envisagé					
<input type="checkbox"/> < 2024					

Objectifs Scientifiques

La proposition HOGRe (Horloges Optiques pour la Géodésie Relativiste) a pour objectifs :

- Test du redshift gravitationnel (effet Einstein) entre une horloge optique embarquée dans un ballon (40 km altitude) et une horloge optique au sol liées par un lien radio ou optique.
- Mesure de différence de potentiel gravitationnel terrestre entre deux points distants de plusieurs centaines de km, en utilisant deux horloges optiques sol transportables et un système de comparaison basé sur deux ballons captifs à 5 km d'altitude (un au dessus de chaque horloge) et un système (radio ou optique) de comparaison de fréquence entre les deux horloges via les ballons. Cela au niveau du cm pour des applications en géodésie/géophysique en particulier en terrain difficilement accessible et/ou non équipé par des liens métrologiques fibrés.

Intérêt du cas scientifique

On vise une performance des horloges et des moyens de comparaison de quelques 10^{-18} en fréquence relative, ce qui permettrait une amélioration dans le test du redshift d'environ 1 ordre de grandeur par rapport à ACES/PHARAO. Par ailleurs cela correspond à un changement du potentiel à la surface de la terre d'environ $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (env. 1 cm en altitude). Cela est comparable aux déterminations du potentiel par méthode satellitaire (GRACE, GOCE) mais qui ont une faible résolution spatiale (qq. 100 km) et des déterminations par nivellement et mesure gravimétrique sur des distances de quelques centaines de km. Dans ce contexte on voit surtout un intérêt de HOGRe pour sonder des lieux particuliers: sur mer, en eau profonde, sur terre, en des points de discontinuités statiques ou dynamiques.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

Ce projet se fera dans un contexte post-ACES/PHARAO avec l'expertise acquise par les équipes scientifiques, industrielles et CNES. Par ailleurs plusieurs projets d'horloges optiques transportables pour les applications en géodésie/géophysique sont en cours de gestation et de développement au niveau européen (D) et international (USA).

Niveau de participation

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*

Les meilleures horloges optiques sol atteignent déjà des incertitudes de quelques 10^{-18} et le développement a été extrêmement rapide ces dernières années (gain de deux ordres de grandeur dans la dernière décennie). Le défi consiste à rendre cette technologie plus compacte pour être transportable et compatible avec un emport ballon. Les laboratoires et l'industrie française sont bien placés pour cela, du fait de leur expérience sur PHARAO/ACES.

- *programmation (coopération, date lancement,...)*

Moyens disponibles

Compétences

- *technique (héritage)*
 - ACES/PHARAO
 - Horloges optiques en laboratoire
 - Liens micro-ondes/optiques (héritage ACES/PHARAO, T2L2, ...)
 - Liens fibrés au sol (EQUIPEX REFIMEVE+)
- *Scientifique*
 - exploitation scientifique ACES/PHARAO
 - Analyse des données ACES/PHARAO et T2L2
 - Liens fibrés au sol (EQUIPEX REFIMEVE+)

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

- *Innovation technologique*

- Développement de nouvelle génération d'horloges optiques transportables et « ballonables ». Première étape vers des versions spatiales pour applications en physique fondamentale, navigation, géodésie, etc...
- Démonstration et mise en place d'un nouvel outil pour la géodésie/géophysique, basé sur la relativité générale (effet Einstein)

Actions d'accompagnement, de coordination

Etude de faisabilité, en particulier :

- Etudier les aspects coût/financement.
- Examiner des participations éventuelles de l'industrie sur les aspects horloges et/ou liens optiques/radio.
- Evaluer la possibilité de détermination fine du géopotential au niveau d'un ballon à 40 km.
- Rechercher le moyen de comparaison de fréquence adapté (partenariats éventuels)
- Evaluer les aspects ballons (masse, volume, énergie, ballon captif, pointage, positionnement)

CryoSCOPE

Test du Principe d'Equivalence à bord d'un laboratoire spatial cryogénique

		Mission <input checked="" type="checkbox"/>	Instrument <input type="checkbox"/>	R&T X		
		<u>Classe de mission</u>				
L <input type="checkbox"/>	M <input checked="" type="checkbox"/>	Mini <input type="checkbox"/>	Micro <input type="checkbox"/>	Nano <input type="checkbox"/>	Ballon <input type="checkbox"/>	
		<u>Cadre de la mission</u>				
ESA Cosmic Vision M4 <input type="checkbox"/>		Mission d'Opportunité <input type="checkbox"/>		Multilatéral <input checked="" type="checkbox"/>		
		S2 <input type="checkbox"/>				
Date de lancement envisagé 						

Objectifs Scientifiques

CryoSCOPE s'inscrit dans la suite de la mission MicroSCOPE (test du principe d'équivalence à 10^{-15}) avec un test beaucoup plus précis au niveau 10^{-17} , grâce à l'apport de la cryogénie et à la technologie des accéléromètres électrostatiques de l'ONERA.

Intérêt du cas scientifique

Il y a un intérêt fondamental à tester le principe d'équivalence pour explorer la physique au-delà du modèle standard, avec la potentialité de la découverte d'une nouvelle interaction (champ dilatonique, champ vectoriel ...) qui interviendrait dans un mécanisme d'unification de la relativité générale avec les théories quantiques des champs.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

Il s'agit d'une évolution du projet MicroSCOPE, qui va tester le principe d'équivalence, dans sa version universalité de la chute libre (UFF), en orbite terrestre au niveau de 10^{-15} en 2016. En fait, selon les résultats de MicroSCOPE, il y aura deux orientations possibles:

1. Dans le cas d'un signal positif de MicroSCOPE (indication d'une violation du principe d'équivalence) : MicroSCOPE 2, une mission rapide de confirmation et complémentaire avec une incertitude comparable de 10^{-15} mais avec d'autres matériaux testés (Cu, Al, Si ou Be) – lancement en 2023 ;
2. Dans le cas d'une absence de signal positif : CryoSCOPE qui vise donc à un test beaucoup plus précis au niveau 10^{-17} – lancement en 2030 ;

Dans ce second cas, le projet se situerait au même niveau que le projet italien Galileo Galilei, mais avec une maturité technologique sans aucune comparaison (seul la partie cryogénie serait à élever en maturité).

Niveau de participation

Dans un premier temps, le niveau de participation français consisterait à évaluer le concept de la mission CryoSCOPE avec une mise à niveau des bilans de performance vis-à-vis de l'ancienne proposition GeoSTEP présentée à l'ESA.

Ensuite, le niveau de participation de la France concernerait le développement de l'instrument pour augmenter le niveau de TRL dans le cas de la mission CryoSCOPE (aspect cryogénie) et une implication française dans la définition du satellite et du système de compensation de traînée qui dépendra de la coopération trouvée.

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*

Le niveau de TRL de l'accéléromètre (hors cryogénie) est déjà au-delà d'un TRL 6 (MicroSCOPE), bien que des adaptations soient nécessaires (système de blocage, système de décharge, ...). Il s'agit surtout de développer la partie cryogénie, en synergie avec la compensation de traînée du satellite qui devrait utiliser l'hélium du cryostat comme source de poussée.

- *programmétique (coopération, date lancement,...)*

L'instrument et la mission proposés se placent dans l'optique post-MicroSCOPE. Il s'agirait évidemment dans un premier temps d'évaluer les coopérations possibles.

Moyens disponibles

Les accéléromètres sont ceux de l'ONERA. De ce point de vue, les technologies sont matures et il y a une grande expérience française dans le domaine. L'aspect cryogénie doit en revanche être développé.

Compétences

- *technique (héritage)*

Des partenaires nationaux ou internationaux doivent être recherchés, notamment dans le domaine de la cryogénie, pour ce projet, qui pourrait devenir un projet ESA.

- *scientifique*

Avec le projet MICROSCOPE, la France est à la pointe des tests du principe d'équivalence. Le centre de mission scientifique qui sera développé dans ce cadre permettra de réunir les scientifiques susceptibles de participer à une future mission.

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

Le principe d'équivalence est un des piliers de la relativité générale. L'unification des forces fondamentales exige une modification de la relativité générale. Cette mission permettra de valider ou d'invalider les différentes théories actuellement étudiées dans ce cadre.

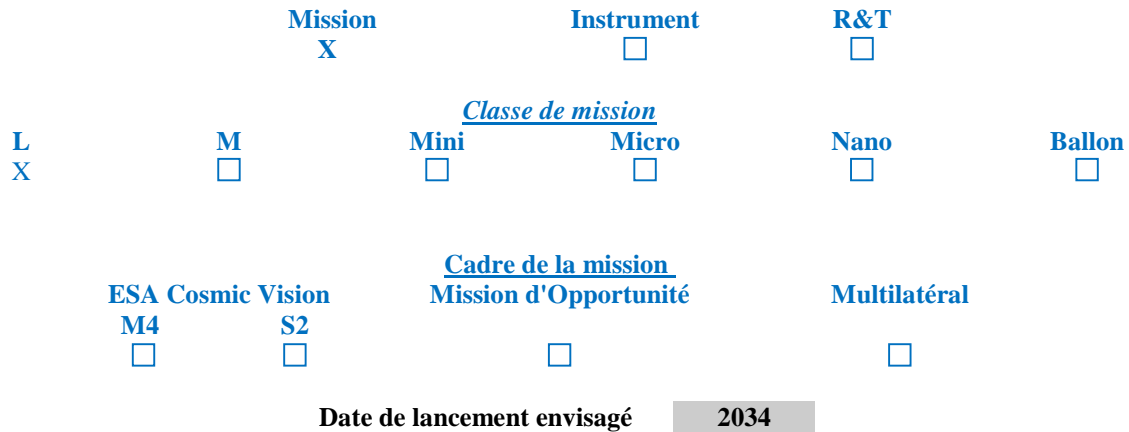
- *Innovation technologique*

La mission CryoSCOPE, avec un objectif de 10^{-17} , reposera sur les meilleurs accéléromètres jamais développés. Au-delà, cette mission nécessite aussi un progrès dans la réalisation des satellites (gestion des micro-vibrations ou compensation de traînée) afin d'atteindre ce niveau de performance.

Actions d'accompagnement, de coordination

Cette proposition de mission devra mettre à jour les bilans de performance de l'instrument et du satellite, basée sur les analyses faites dans l'ancienne proposition de mission GeoSTEP. Il s'agira aussi de coordonner les participations au niveau européen. Le point critique à traiter en premier lieu concerne l'identification des laboratoires de cryogénie en France (CEA, CNRS).

eLISA



Objectifs Scientifiques

Ouvrir la fenêtre de fréquence $[10^{-4}, 10^{-1}]$ Hz dans le domaine des ondes gravitationnelles, la fenêtre la plus riche de ce domaine puisqu'elle donne en principe accès à l'ensemble de la science attendue pour l'Univers gravitationnel : coalescence de trous noirs super-massifs au centre des galaxies, trous noirs stellaires capturés par des trous noirs massifs, binaires galactiques, éventuellement transitions de phase dans l'Univers primordial, ainsi que les tests de la relativité générale et du modèle cosmologique.

Intérêt du cas scientifique

Le cas scientifique de la mission a été reconnu « of the greatest importance to astrophysics and physics alike » par le « Senior Committee » de l'ESA. La fenêtre d'observation contient des sources garanties d'ondes gravitationnelles. Elle est complémentaire de celle des détecteurs terrestres qui concerne des sources de masses stellaires.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

L'ESA a identifié l'Univers gravitationnel comme thème scientifique de la mission L3. La mission proposée pour illustrer ce thème était la mission NGO déjà proposée pour L1. La perspective de la mission technologique LISAPathfinder mi 2015 a été un élément important pour la sélection du thème en L3. Le concept de mission sur lequel est basé eLISA est donc pour les années à venir le principal concept envisageable.

Niveau de participation

La France a acquis au sein du consortium eLISA une place importante avec la responsabilité de deux domaines stratégiques: l'intégration de la charge utile, avec des études système associées, et le centre de traitement des données (DPC).

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*

TRL important pour toutes les technologies testées par LISAPathfinder ; le reste des technologies peut être testé au sol ; importance des études système

- *programmation (coopération, date lancement,...)*

Mission technologique en 2015 ; résultats en 2016 ; « Univers gravitationnel » comme thème de L3, avec la mission eLISA proposée dans le « white paper ».

Moyens disponibles

Centre François Arago pour le traitement des données (DPC), maquette de simulation de LISA (LOT), expertise et moyens de test CNES et ONERA dans ce type de mission (cf. Microscope)

Compétences

- *technique (héritage)*

Traitement des données (Centre François Arago comme centre externe de traitement des données de LISAPathfinder, APC, IAP, CNES,...). Phase 0 sur le DPC couronnée de succès.

Aspects système de eLISA avec le banc-test LISA on Table (LOT : R&D CNES) (CNES, APC, ONERA, OCA/Artemis,...)

- *scientifique*

Larges compétences de la communauté française (rassemblées au sein du groupe LISA-France) dans les aspects gravitation, astrophysique et cosmologie

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

Ouverture d'une nouvelle fenêtre sur l'Univers avec les ondes gravitationnelles dans la bande $[10^{-4}, 10^{-1}]$ Hz, la plus riche du point de vue des signaux astrophysiques attendus.

- *Innovation technologique*

Plate-forme LISAPathfinder

Actions d'accompagnement, de coordination

Activités post-phase 0 pour le Data Processing Centre avec un proto-DPC incluant une plate-forme de développement, proposition de phase 0 pour une étude système-intégration de la charge utile (délivrée par le consortium)

Gravity Advanced Package (GAP)

Mission



Instrument



R&T



L



M



Mini



Classe de mission

Micro



Nano



Ballon



ESA Cosmic Vision

M4



S2



Cadre de la mission
Mission d'Opportunité



Multilatéral



Date de lancement envisagé



Objectifs Scientifiques

L'objectif principal est de tester la gravité à l'échelle du système solaire par des mesures des accélérations subies par une sonde, de l'ordre de 10^{-11} m.s⁻².

Une telle performance permettrait d'analyser avec précision les caractéristiques de ces accélérations (amplitude, direction etc...) et ainsi de lever les incertitudes encore présentes dans les restitutions d'orbites actuelles, liées notamment aux propriétés thermiques de la sonde. La détection d'anomalies d'accélération résiduelles au-delà de l'orbite de Jupiter pourrait être alors clairement mise en évidence. Une étude rigoureuse de telles anomalies serait possible et permettrait ainsi de tester des modèles de dépendance d'échelle de la relativité ou d'accélération anormale due à la Galaxie dans le système solaire. Ceci constituerait une avancée majeure en physique fondamentale.

Intérêt du cas scientifique

A l'heure actuelle, aucun accéléromètre atteignant des performances proches de GAP n'est embarqué à bord des missions spatiales interplanétaires (au-delà de la Lune) en vol ou programmées. Or, dans le système solaire lointain, la restitution d'orbite se dégrade rapidement du fait de la distance et des incertitudes sur l'origine et la nature des accélérations subies par la sonde qui restent importantes. Quelle qu'en soit la nature, il est important de mieux comprendre ces mécanismes aussi bien dans les phases interplanétaires, qu'orbitales ou au cours des survols lors d'assistances gravitationnelles. En phase orbitale, l'ajout d'un accéléromètre performant permettrait d'améliorer considérablement la description du champ de gravité de la planète ou du satellite, de mieux connaître sa physique interne et ainsi de mieux identifier le scénario de formation du système planétaire. En phase de survol, il permettrait une meilleure étude de la dynamique de la sonde et de la planète survolée notamment pour les éphémérides planétaires. Enfin en phase interplanétaire, la caractérisation précise d'une possible dépendance anormale en distance par rapport à la relativité ou d'anomalies dynamiques constituerait une étape importante pour l'évolution de notre connaissance de la gravité.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

Le contexte international est favorable puisque le but scientifique premier de GAP a été retenu par l'ESA en 2010 dans le cadre de l'appel Cosmic Vision 1 et de la feuille de route « ESA Fundamental Physics Roadmap ». Une proposition GAP a déjà obtenu le soutien du CNES, notamment pour la construction du prototype d'accéléromètre MicroStar suite à l'exercice de prospective de 2009. Une proposition de mission M3 (OSS) vers le système de Neptune a été déposée auprès de l'ESA mais non retenue.

Dans le cadre actuel d'appels d'offre ESA pour les missions M et L ou en mission d'opportunité, GAP apparaît comme une instrumentation mature et à retour scientifique fort pour des missions planétaires vers Uranus ou Neptune.

Niveau de participation

Développement de l'instrumentation, calibration des mesures et utilisation pour l'étude de la dynamique de la sonde lors des trois phases de la mission : en interplanétaire, en orbite autour de satellites ou de planète, en survol de satellites ou de planète.

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*

Sur le plan technologique, un TRL de 3-4 est prévu pour 2015 avec un financement interne de l'ONERA. Des développements supplémentaires sont donc nécessaires mais le projet a déjà une maturité non négligeable basée sur la construction du prototype MicroSTAR.

- *programmation (coopération, date lancement,...)*

L'organisation de projet est à l'heure actuelle principalement orientée vers la construction de l'instrument et son évolution vers un TRL de 5 et est appropriée à ce stade de développement du projet.

Sur le plan scientifique, l'aspect traitement des données est clairement en phase 0 et un renforcement des collaborations notamment au niveau national est à envisager pour cet aspect, de même que pour la valorisation du projet au niveau planétaire et mécanique céleste.

Moyens disponibles

L'ONERA possède les moyens humains et matériels en interne pour obtenir un TRL de 3-4 pour la partie accéléromètre MicroSTAR, mais l'augmentation au TRL 5 nécessite un financement externe. De plus, il s'agit aussi de développer la partie platine rotative afin d'obtenir in fine une mesure d'accélération sans biais.

Enfin, il faut développer la partie restitution d'orbite avec des mesures accélérométriques en se basant sur les compétences développées à GéoAzur et/ou à l'IMCCE.

Compétences

- *technique (héritage)*

Les équipes autour du projet ont montré leurs compétences depuis de nombreuses années dans la construction d'accéléromètres de haute technologie. Ils jouissent d'une grande reconnaissance nationale et internationale notamment du fait de leurs importantes implications dans les missions de géodésie (GRACE, GOCE, ...) et dans la mission de physique fondamentale MICROSCOPE, basées en grande partie sur des compétences proches de celles mises en jeu dans GAP.

- *scientifique*

Les équipes impliquées ont acquis une compétence internationalement reconnue dans l'analyse des données de navigation de sonde en phase interplanétaire par leur implication dans l'analyse des données de la sonde Pioneer. Elles ont aussi acquis une connaissance approfondie dans la modélisation des mesures d'accéléromètres embarqués notamment dans le cadre de la mission MICROSCOPE.

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

Les enjeux sont multiples puisque l'ajout d'un accéléromètre à bord d'une mission d'exploration planétaire permet de mieux connaître l'orbite de la sonde et ainsi de mieux identifier les perturbations liées aux corps perturbateurs (planète, satellites). Des améliorations dans la détermination du champ de gravité de ces objets sont attendues et permettront de mieux appréhender leur physique interne. Des enjeux importants sur les scénarii de formation des systèmes planétaires visités pourront émerger de ces études. En phase interplanétaire, l'apport des mesures d'un accéléromètre embarqué permettra d'étalonner la gravitation à l'échelle du système solaire et de tester de possibles scénarii de déviation de la relativité générale, incluant des tests de présence de matière noire dans le système solaire.

- *Innovation technologique*

L'innovation technologique du projet réside d'une part dans l'association d'un accéléromètre et d'une platine rotative permettant d'obtenir une mesure sans biais et d'autre part dans la miniaturisation de la partie accéléromètre permettant un emport plus facile sur des sondes interplanétaires.

La prise en compte des mesures accélérométriques dans la détermination de la trajectoire de la sonde interplanétaire constituera aussi une avancée non négligeable vis-à-vis des méthodes actuellement utilisées.

Actions d'accompagnement, de coordination

Il s'agit de renforcer l'équipe sur les questions liées à l'apport de GAP pour les déterminations des champs de gravité et de caractérisations atmosphériques en phase orbitale par rapport à une détermination basée uniquement sur des données de radio science et pour les phases de survols en terme de précision sur la restitution d'orbites et le positionnement de la sonde par rapport au centre de masse de la planète survolée.

Il faut de plus élargir la communauté concernée par ce projet afin d'y inclure des planétologues intéressés par les mesures de champs de potentiel.

Missions lunaires de type FAR SIDE

Mission



Instrument



R&T



Classe de mission

L



M



Mini



Micro



Nano



Ballon



ESA Cosmic Vision

M4



S2



Cadre de la mission
Mission d'Opportunité



Multilatéral



Date de lancement envisagé



Objectifs Scientifiques

Plusieurs missions en orbite ou à la surface de la Lune ont été proposées. Elles ont pour but principal de déposer, dans des zones éloignées des zones d'alunissage des missions APOLLO, des landers permettant d'étudier des zones plus représentatives de la surface lunaire. La face cachée de la Lune est un choix pertinent puisque peu étudiée et permettant d'associer à la mission des capteurs radio afin d'observer le ciel à l'ombre de la Terre et de ses perturbations radiatives et d'atteindre des fréquences jusqu'alors inaccessibles entre 10 et 20 MHz. Aux objectifs annoncés par les missions, on peut ajouter la nécessité de progresser sur notre connaissance de la physique lunaire afin d'améliorer les tests du principe d'équivalence fort effectués avec le système Terre-Lune. La mise en place de landers supplémentaires à la surface de la Lune permettrait une meilleure modélisation de la libration et ainsi une meilleure modélisation des phénomènes géophysiques lunaires qui sont actuellement le principal facteur de limitation des mesures les plus précises du rapport masse grave sur masse inerte dans le système solaire.

Intérêt du cas scientifique

Depuis une dizaine d'années l'exploration de la Lune par des sondes en orbite est intense. Or malgré toutes ces données orbitales, associées aux tirs laser sur la surface de la Lune opérés depuis plus d'une trentaine d'années, de nombreuses questions restent en suspens notamment sur l'existence d'anomalies magnétiques, la caractérisation précise de son noyau et l'explication du grand bombardement tardif à sa surface.

Par l'installation de capteurs sur la face cachée de la Lune, il serait notamment possible d'observer la raie neutre d'hydrogène à $z > 35$ et d'apporter de nouvelles contraintes cosmologiques.

Le système Terre-Lune fournit actuellement les tests les plus précis du principe d'équivalence fort dans le système solaire. De tels tests sont un enjeu important en physique fondamentale et sont actuellement limités par des lacunes de modélisation dans la physique interne de la Lune. Plusieurs équipes au niveau mondial se sont associées pour repousser ces limites théoriques. L'ajout de nouveaux landers à la surface de la Lune constituerait un pas important car elle permettrait d'acquérir des mesures dans des configurations inédites et aiderait à la décorrélation des signatures gravitationnelles.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

Ce projet fédère des communautés françaises liées à la planétologie, à la géophysique et à la radio-astronomie et se place dans un contexte international où l'intérêt des pays émergents à développer des technologies spatiales pertinentes à l'échelle de la NASA et l'ESA les poussent à proposer des nouvelles missions d'exploration de la surface lunaire incluant des landers. De plus, un projet à l'horizon 2026/2027 est en cours d'étude à la NASA et une proposition M4 sera adressée à l'ESA en 2014.

Des actions aux niveaux de l'ISSI ont été menées depuis plusieurs années dans le sens de l'amélioration du modèle de physique interne de la Lune dans le but de repousser les limites actuelles des tests du principe d'équivalence réalisés dans le système Terre-Lune. Tout projet visant à une meilleure connaissance de la physique lunaire s'inscrit dans cette dynamique internationale.

Niveau de participation

Analyse des données recueillies.

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*

- *programmatische (coopération, date lancement,...)*

La proposition est à un stade très préliminaire.

Moyens disponibles

Compétences

- *technique (héritage)*

Le projet semble principalement basé sur des technologies héritées de précédentes missions.

- *scientifique*

Les participants au projet sont des spécialistes de renommée internationale de la physique lunaire et de radio-astronomie.

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

L'étude de la surface de la lune par les landers devrait permettre des avancées dans la connaissance de la structure interne du satellite en particulier sur l'épaisseur de la croûte et la composition de son noyau et de son manteau. Des mesures de variations thermiques et magnétiques à la surface de la lune seront aussi nécessaires pour mieux contraindre les mécanismes d'évolution thermique du corps et comprendre l'origine de ces fluctuations magnétiques. Des mesures de type ChemCam pourront être réalisées dans des régions éloignées de celles pour lesquelles des échantillons avaient été prélevés par les missions précédentes afin de comprendre la diversité minérale et en gaz (mesures de radon dans l'exosphère) de la surface lunaire.

Enfin l'utilisation d'une sonde localisée au point L2 du système Terre-Lune permettra non seulement de faire le lien de communication nécessaire entre la Terre et les landers sur la face cachée de la Lune mais aussi d'enregistrer les impacts de météorites à sa surface. Ces données alimenteront les statistiques de risques d'impact majeur pour la Terre. Les résultats attendus permettront de mieux comprendre les mécanismes d'évolution thermique et magnétique de la Lune ainsi que la structure fine de l'intérieur du satellite. De nouvelles contraintes sur les scénarii de sa formation pourront ainsi être établies.

L'amélioration du modèle physique de la Lune permettra de repousser les limites des mesures du test du principe d'équivalence fort dans le système Terre-Lune. Ces résultats seront complémentaires des résultats obtenues par les missions GAIA pour la mesure du paramètre PPN de déflexion gamma, MICROSCOPE pour la mesure du principe d'équivalence faible dans l'espace, BEPI-COLOMBO et la mesure des paramètres PPN beta et gamma et eta dans le cadre de théories métriques. A l'issue de ces missions, un tableau précis des violations possibles de la relativité générale sera dressé et de plus grandes contraintes aux modèles théoriques de matière et d'énergie noires pourront être établies.

- *Innovation technologique*

Actions d'accompagnement, de coordination

L'amélioration des modèles internes de la Lune aura un impact important sur la modélisation de son orbite et de sa rotation. De telles améliorations auront un impact très positif sur les tests de physique fondamentale pratiqués dans le système Terre-Lune et notamment le principe d'équivalence à grande échelle. Il serait important que les équipes proposant de telles missions lunaires incluent ces éléments dans les propositions afin d'élargir la communauté impliquée et le support apporté.

NOM DU PROJET : PREPAJUICE

Mission



Instrument



R&T



L



M



Classe de mission

Mini



Micro



Nano



Ballon



Cadre de la mission

ESA Cosmic Vision

M4



S2



Mission d'Opportunité



Multilatéral



Date de lancement envisagé

2022

Objectifs Scientifiques

La mission JUICE a pour but l'exploration du système jovien et en particulier du satellite Ganymède. Cette mission ESA, sélectionnée en L1, a un lancement prévu en 2022. Elle combine de nombreux survols de Jupiter et des satellites galiléens pendant 2 ans et demi puis 6 mois d'orbites autour de Ganymède.

La sonde embarque notamment une instrumentation de radio-science, 3GM, qui permet des mesures Doppler (0.002 mm/s à 1000 s de temps d'intégration) et range (environ 20 cm pendant la phase orbitale autour de Ganymède). Avec une telle précision, des estimations très précises des champs de gravité des satellites joviens et de Jupiter seront possibles de même que des caractérisations détaillées de leurs atmosphères.

Cette précision est également très intéressante du point de vue de la mécanique céleste et de la physique fondamentale, et elle appelle une exploitation scientifique spécifique des données de navigation.

Le PI de l'instrument, Luciano Iess de l'Université de Rome, a accepté d'intégrer des scientifiques français dans l'équipe scientifique (Agnès Fienga comme « *Co-PI* », Jacques Laskar comme « *team member* », Nicolas Rambaux, et Christophe Le Poncin-Lafitte comme « *guest scientists* ») avec l'objectif de coupler le calcul des éphémérides et l'analyse des données de radio-science. Ceci permettra de réajuster les positions héliocentriques de Jupiter et de ses lunes en tenant compte des mesures de radio-science et, ainsi, de ne pas dégrader leur utilisation pour les mesures locales dans le système jovien.

Intérêt du cas scientifique

L'utilisation des données de radio-science présente un grand intérêt pour la mécanique céleste et la physique fondamentale. Les données de navigation des sondes interplanétaires sont indisponibles dans la plupart des cas (ou disponibles après des traitements ne permettant pas leur utilisation pour les éphémérides et les tests de la loi de gravitation), alors qu'elles constituent une ressource cruciale.

L'exploitation des données de la mission JUICE par les meilleurs experts scientifiques du domaine va accroître le retour scientifique de la mission pour des surcoûts tout à fait modiques.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

Niveau de participation

Co-PI, analyse des données

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*
- *programmation (coopération, date lancement,...)*
mission de l'ESA, coopération avec l'Italie

Moyens disponibles

logiciels, éphémérides planétaires INPOP (ajustement global de haute précision des positions des planètes et satellites dans le système solaire) ...

Compétences

- *technique (héritage)*
- *scientifique*

Analyse des données de navigation des sondes spatiales comme CASSINI et MESSENGER réalisée par les équipes françaises. Meilleure détermination des paramètres post-newtoniens des théories métriques de la gravitation (gamma taux de courbure, beta montant de non-linéarité)...

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

L'amélioration de l'exploitation des données de radio-science et d'ajustement des éphémérides planétaires et de satellites est un objectif stratégique permettant d'asseoir définitivement l'autonomie des éphémérides INPOP européennes. A terme il ouvre la voie à des tests de gravité aussi bien au niveau de la dynamique des objets naturels du système solaire (planètes et leurs satellites) qu'au niveau de la navigation de la sonde.

- *Innovation technologique*

Actions d'accompagnement, de coordination

Le CNES doit soutenir très fortement cette activité sous des formes à définir au mieux.

NOM DU PROJET : **Station laser pour futurs liens optiques sol-espace**

Mission <input type="checkbox"/>	Instrument <input type="checkbox"/>	R&T <input checked="" type="checkbox"/>			
<u>Classe de mission</u>					
L <input type="checkbox"/>	M <input type="checkbox"/>	Mini <input type="checkbox"/>	Micro <input type="checkbox"/>	Nano <input type="checkbox"/>	Ballon <input type="checkbox"/>
<u>Cadre de la mission</u>					
ESA Cosmic Vision M4 <input type="checkbox"/>	S2 <input type="checkbox"/>	Mission d'Opportunité <input type="checkbox"/>	Multilatéral <input type="checkbox"/>		
Date de lancement envisagé 					

Objectifs Scientifiques

Il s'agit d'une étude technique permettant de synthétiser les besoins pour une station laser expérimentale de télémétrie, sur les liens optiques sol-espace de future génération cohérents ultra-stables et leurs applications à différents domaines (physique fondamentale, sciences de la Terre, télécommunications, positionnement, exploration planétaire).

Intérêt du cas scientifique

Diverses études sont déjà lancées dans le but de comparer des horloges atomiques au sol et dans l'espace, ou au sol sur des distances intercontinentales. Les horloges optiques font des progrès rapides et atteignent aujourd'hui des valeurs de stabilité de l'ordre de $10^{-16}/\tau^{-1/2}$ et d'exactitude meilleures que 10^{-17} pour les plus performantes. L'utilisation optimale de ces horloges nécessitera des moyens de comparaison à des distances intercontinentales et sol-espace qui ne dégradent pas leurs performances, d'où l'intérêt des nouveaux liens optiques sol-espace.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

Les méthodes actuelles développées en physique fondamentale (transfert de temps par lien laser T2L2 en orbite sur Jason-2, lien micro-onde MWL de la mission ACES/Pharao lancée mi 2016) atteignent les performances des meilleures horloges au bout d'une durée de « moyennage » qu'il faudrait encore réduire pour élargir les domaines d'application. Au sol, des liens par fibre optique permettent d'améliorer les résultats de plusieurs ordres de grandeur mais ne peuvent pas dépasser l'échelle continentale et sont inutiles pour les comparaisons d'horloges sol-espace. De nouvelles approches par lien optique sol-espace et détection hétérodyne ont donc été proposées.

Niveau de participation

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*
- *programmative (coopération, date lancement,...)*

Moyens disponibles

moyens des laboratoires (OCA, Observatoire de Paris, Onera...); horloges, liens, stations de télémétrie laser, optique adaptative...

Compétences

- *technique (héritage)*
 - T2L2, stations laser OCA
 - Liens micro-ondes/optiques (héritage ACES/PHARAO, T2L2, ...)
 - Liens fibrés au sol (EQUIPEX REFIMEVE+)
- *Scientifique*
 - exploitation scientifique ACES/PHARAO
 - Analyse des données ACES/PHARAO et T2L2
 - Liens fibrés au sol (EQUIPEX REFIMEVE+)

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*
- *Innovation technologique*

Actions d'accompagnement, de coordination

R&T, étude technique pour synthétiser les besoins

STE QUEST

Space-Time Explorer and Quantum Equivalence Principle
Space Test

	Mission <input checked="" type="checkbox"/>	Instrument <input checked="" type="checkbox"/>	R&T		
		<u>Classe de mission</u>			
L <input type="checkbox"/>	M <input checked="" type="checkbox"/>	Mini <input type="checkbox"/>	Micro <input type="checkbox"/>	Nano <input type="checkbox"/>	Ballon <input type="checkbox"/>
		<u>Cadre de la mission</u>			
	ESA Cosmic Vision M4 <input checked="" type="checkbox"/>	Mission d'Opportunité S2 <input type="checkbox"/>		Multilatéral <input type="checkbox"/>	
Date de lancement envisagé					2024

Objectifs Scientifiques

La mission STE-QUEST propose un test du principe d'Equivalence d'Einstein utilisant un interféromètre atomique, des comparaisons à distance et éventuellement une horloge à atomes froids. Plus précisément, cette mission doit permettre de tester l'universalité de la chute libre au niveau quantique, ainsi que le décalage gravitationnel de la fréquence d'horloge (redshift) dû aux champs terrestre, solaire et lunaire.

Intérêt du cas scientifique

Les objectifs scientifiques de STE-QUEST se situent à la frontière entre gravitation et mécanique quantique. Sa principale originalité est de tester le principe d'équivalence pour des ondes quantiques, en comparant par interférométrie atomique la chute libre de deux espèces atomiques différentes (deux isotopes du Rb). Les tests du principe d'équivalence au sol pour des ondes quantiques ont débuté avec les neutrons en 1975 au niveau 10^{-3} et se sont poursuivis à partir des années 1990 avec les expériences d'interférométrie atomique. Le niveau de précision des expériences d'interférométrie atomique atteint 10^{-7} entre deux atomes différents (K et Rb pour l'expérience ICE et deux isotopes du Rb dans une expérience de l'ONERA) et 10^{-9} entre le Cs et la chute libre d'un corps macroscopique (en pratique, un coin cube). La précision visée par STE-QUEST est de 10^{-15} , soit 6 ordres de grandeur de mieux que les meilleurs tests du principe d'équivalence réalisés au sol par interférométrie atomique.

Contexte de réalisation (positionnement vis-à-vis d'initiatives similaires aux niveaux national et international)

La proposition STE-QUEST a été étudiée en compétition avec quatre autres candidates présélectionnées par l'ESA dans le cadre de la mission M3 du programme « Cosmic Vision », mais elle a été retirée de la sélection finale pour des raisons de financement et de maturité technologique. Elle a en effet été reconfigurée tardivement pour ne garder que l'interféromètre atomique et les liens de comparaison d'horloges bord-sol afin d'être compatible avec le budget des états membres de l'ESA alloué à la charge utile, tout en conservant la plus grande partie de ses objectifs scientifiques. Le CNES a réalisé l'étude de faisabilité de l'horloge qui reste une option possible compte tenu du scénario de mission retenu et une étude de phase A sur une partie du système laser.

Niveau de participation

Depuis la reconfiguration de la mission, les équipes françaises se sont fortement impliquées à la fois du côté mission et dans le développement de l'instrument « interféromètre atomique », pour lequel elles pourraient avoir la responsabilité complète d'un sous-ensemble (a priori le système laser de refroidissement et de manipulation des ondes de matière).

Risques

- *crédibilité technologique (TRL)*

Le niveau de TRL de l'instrument "interféromètre atomique" a été le sujet de discussion entre les responsables scientifiques de la mission, les états membres et l'ESA. Le niveau de TRL actuel peut être estimé à 4, avec une forte progression, en particulier grâce aux efforts de R&T CNES (ICE) et DLR (QUANTUS). Les liens bord-sol proposés ont un niveau de TRL supérieur, car déjà mis en œuvre dans des missions spatiales.

- *programmation (coopération, date lancement,...)*

Date de lancement prévue en 2024. Coopération étroite souhaitée avec la DLR dès 2014, en particulier pour réaliser un démonstrateur sol permettant de consolider le niveau TRL de l'interféromètre atomique. Des discussions vont être lancées rapidement avec les partenaires européens pour redéfinir la participation précise de chaque participant aux différentes parties de l'équipement « interféromètre atomique ». Enfin des discussions avec d'autres partenaires viendront éventuellement compléter le scénario de la mission avec une horloge.

Moyens disponibles

Plusieurs laboratoires sont impliqués dans les études de la mission (SYRTE, LKB, LP2N), à la fois sur les parties mission et comparaison d'horloges à distance, sur la partie théorique du test du principe d'équivalence et de l'instrument

« interféromètre atomique ». Le CNES dispose d'un cadre R&T avec le projet ICE de test du principe d'équivalence dans l'airbus 0-g et le projet collaboratif sur le développement d'une source d'atomes froids sur puce hybride. L'ONERA possède aussi des moyens de tests.

Compétences

- *scientifique et technique (héritage)*

Héritage technique de l'interféromètre atomique ICE (prototype en vol parabolique), du modèle de vol de l'horloge PHARAO (source laser, système à vide..).

La France est PI de PHARAO/ACES et développe des compétences uniques sur le traitement de comparaisons d'horloges distantes par lien micro-onde et est avec l'Allemagne un leader dans le développement des interféromètres atomiques.

La communauté française a fourni un gros effort théorique sur l'analyse des objectifs scientifiques.

Enjeux

- *Impact pour la communauté (avancée scientifique)*

Amélioration de plusieurs ordres de grandeur des tests du redshift. Test du principe d'équivalence à 10^{-15} avec des objets quantiques.

- *Innovation technologique*

Comparaison longue distance en vue commune d'horloges optiques sol, vol d'un premier senseur inertielle à atomes froids dans l'espace, offrant ensuite la possibilité d'utiliser ces senseurs pour d'autres missions (navigation inertielle, géodésie ...)

Actions d'accompagnement, de coordination

Il est nécessaire d'envisager, en coopération étroite avec l'Allemagne, le développement d'un "breadboard" afin de démontrer la maturité technologique de l'interféromètre atomique et préfigurer le partage des tâches et des coûts entre les partenaires. Une action de coordination doit être aussi menée pour chercher de nouveaux partenaires qui pourraient permettre l'embarquement d'une horloge. Enfin, en cas de succès, il faudra prévoir une étude de phase A sur la contribution française à l'instrument. Cette étude pourra sans aucun doute bénéficier à la fois de l'étude déjà réalisée pour la proposition M3 (en optimisant la répartition des tâches et des responsabilités des différents partenaires) et du savoir faire issu de la réalisation des modèles d'ingénierie et de vol de PHARAO.