

# Programme National GRAM

Bilan et prospective

12/07/2024

## BILAN ET PROSPECTIVE PNGRAM

Le Programme National GRAM (Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie) couvre trois grands domaines thématiques :

- La physique fondamentale, notamment en vue de tester les théories de la gravitation, la relativité générale et les théories des interactions fondamentales ;
- La métrologie de l'espace et du temps (astrométrie, géodésie spatiale, horloges), les systèmes de référence célestes et terrestres, les échelles de temps, le géopotential et la rotation de la Terre ;
- La mécanique céleste et la mécanique spatiale (trajectoires des corps du système solaire, des satellites et des sondes interplanétaires), avec sous-jacentes les lois de la dynamique et les propriétés physiques des corps.

Ces domaines relèvent du périmètre de plusieurs sections du CoNRS et instituts du CNRS :

- Section 1 (Interactions, particules, noyaux, du laboratoire au cosmos), relevant de l'IN2P3 ;
- Section 2 (Théories physiques : méthodes, modèles et applications) et Section 4 (Atomes et molécules, optique et lasers, plasmas chauds), relevant de l'INP ;
- Section 8 (Micro- et nanotechnologies, micro- et nanosystèmes, photonique, électronique, électromagnétisme, énergie électrique), relevant de l'INSIS ;
- Section 17 (Système solaire et univers lointain) et Section 18 (Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles), relevant de l'INSU.

S'agissant des infrastructures, la communauté PNGRAM est en prise avec les grands moyens sol et espace avec lesquels sont menés nombre de travaux du domaine. Parmi ceux-ci, figurent Gaia, ACES/PHARAO, GENESIS et LISA pour ce qui est des missions spatiales à forte coloration GRAM, en plus des missions de planétologie BepiColombo et JUICE pour leur aspect de navigation, tandis que côté sol, on trouve l'expérience GBAR, MIGA, le NRT, SKA, Virgo/LIGO, GRAVITY+, le réseau T/F national, REFIMEVE+, la station Méo, JIV-ERIC et, dans un futur proche, l'OG<sup>2</sup>P (Observatoire de Géodésie-Géophysique de Polynésie française).

Les services nationaux d'observation relevant de l'ANO1, notamment ceux qui sont la transcription nationale de services internationaux (IERS, ILRS, IVS), sont également des éléments de synergie importants car ils fournissent les données sur lesquelles s'appuie la recherche dans le domaine.

### 1. FAITS MARQUANTS

#### ***1.1. Adoption du repère Gaia-CRF3 comme repère de référence céleste fondamental pour le domaine optique***

En 2021, l'UAI a adopté le repère de référence céleste Gaia-CRF3 comme réalisation fondamentale du repère céleste extragalactique dans le domaine optique, celui-ci constituant le pendant de l'ICRF3 (International Celestial Reference Frame, 3rd realization), reconnu en 2018 pour le domaine radio. Le repère Gaia-CRF3 comprend les positions de 1,6 million de QSOs avec une précision comparable à celle de l'ICRF3 et pour un nombre d'objets qui le dépasse d'un facteur 300. La comparaison avec l'ICRF3 montre en outre qu'il n'existe pas de déformation significative entre les deux repères, ouvrant par là-même des perspectives intéressantes pour la compréhension de la physique des objets sous-jacents (noyaux actifs de galaxies).

#### ***1.2. Vérification du principe d'équivalence faible à $10^{-15}$ près avec le satellite MICROSCOPE***

Le microsatellite MICROSCOPE, lancé en 2016, avait pour but de vérifier l'universalité de la chute libre par comparaison de la chute libre de deux couples de masse d'épreuve en orbite avec contrôle

et mesure de leur mouvement par des accéléromètres. Les résultats finaux, publiés en 2022, ont confirmé le principe d'équivalence faible avec une exactitude de près de  $10^{-15}$ , ce qui représente une amélioration d'un facteur 50 par rapport aux limites existantes auparavant. Le succès de cette expérience ouvre la voie à une mission de seconde génération qui atteindrait un niveau de précision encore plus grand afin de rechercher et mettre en évidence une violation éventuelle de ce principe.

### ***1.3. Détection préliminaire d'un fond d'ondes gravitationnelles de très basse fréquence dans les données des réseaux de chronométrage des pulsars millisecondes***

Au cours de l'année 2023, les réseaux internationaux de chronométrage des pulsars millisecondes, dont le réseau européen, auquel contribue le radiotélescope de Nançay, ont publié simultanément des indices solides indiquant l'existence d'un fond d'ondes gravitationnelles de très basse fréquence, qui proviendrait de couples de trous noirs supermassifs (de plusieurs millions à plusieurs milliards de masses solaires), dans les données de ces pulsars. Cette détection préliminaire ouvre une nouvelle fenêtre fréquentielle pour le domaine des ondes gravitationnelles (gamme du nHz), complémentaire à celle de Virgo-LIGO (gamme du Hz au kHz) et à celle de la future mission LISA (gamme du mHz).

### ***1.4. Mise en évidence d'un océan global de formation récente sous la surface du satellite Mimas de Saturne***

L'analyse fine des librations de la petite lune Mimas et plus spécifiquement de leur rétroaction sur son mouvement orbital, via la comparaison de l'orbite décrite par les modèles numériques avec les observations issues de la sonde Cassini, a permis de découvrir que Mimas possède un océan global, caché sous une coquille de glace d'une épaisseur de 20 à 30 km. La formation de cet océan apparaît très récente, seulement de 5 à 15 millions d'années, ce qui explique l'absence de signes d'activité interne en surface, à la différence des autres lunes où un tel océan a déjà été détecté. Ceci fait de Mimas une cible unique pour étudier les conditions primitives d'apparition de la vie.

### ***1.5. Détermination de la constante de structure fine à mieux que $10^{-10}$ par interférométrie atomique***

Grâce à un interféromètre atomique de grande sensibilité, la valeur de la constante de structure fine, qui caractérise la force de l'interaction entre la lumière et les particules élémentaires chargées, a été déterminée avec une incertitude relative de  $8 \times 10^{-11}$ , améliorant ainsi la précédente détermination de cette constante d'un facteur 3. Ce résultat a été obtenu en mesurant la vitesse de recul d'atomes de rubidium percutés un grand nombre de fois par un laser après que ceux-ci ont été préalablement figés par refroidissement près du zéro absolu. La connaissance de cette constante est cruciale pour tester les calculs de l'électrodynamique quantique et les prédictions du modèle standard.

### ***1.6. Autres tests de physique fondamentale***

- Poursuite du suivi de l'étoile S2 orbitant autour de SgrA\* avec GRAVITY dans le but d'affiner la mesure du rougissement gravitationnel de la lumière émise par cette étoile ainsi que la détermination de la précession de Schwarzschild.
- Nouveau test du principe d'équivalence fort sur le système triple PSR J0337+1715A, avec une amélioration de la limite précédente de 30% (incertitude de  $10^{-6}$ ), grâce aux données de chronométrage acquises avec le radiotélescope de Nançay.
- Amélioration d'un facteur 3 de la limite sur la masse du graviton (établie à  $1,01 \times 10^{-24}$  eV/c<sup>2</sup>), parmi d'autres paramètres, grâce aux évolutions du modèle des éphémérides INPOP.
- Amélioration allant jusqu'à trois ordres de grandeur des limites sur la violation des symétries de Lorentz et CPT dans le contexte du « modèle standard étendu » (SME) via l'analyse de 50 années de mesures de télémétrie laser-lune.
- Amélioration de certaines limites sur la matière noire ultra-légère via des expériences de détection directe exploitant des moyens de laboratoire, des données de systèmes de navigation par satellites...

### **1.7. Infrastructures, missions spatiales**

- Reconnaissance comme infrastructure de recherche nationale du réseau fibré REFIMEVE+, financé par le PIA-1 et le PIA-3, et qui distribue des références de fréquence et de temps de haute stabilité et exactitude au niveau national, avec également des liens européens, pour des applications en métrologie des fréquences, physique fondamentale et géodésie
- Adoption par l'ESA de la mission spatiale LISA qui recherchera et caractérisera les ondes gravitationnelles dans le domaine encore non-exploré des basses fréquences
- Sélection de la mission de géodésie spatiale GENESIS, qui a pour objectif l'amélioration du repère de référence terrestre international, dans le programme FutureNAV de l'ESA
- Financement du projet CARIOQA de démonstration d'accéléromètre quantique spatial dans le programme Horizon Europe de l'Union Européenne

## **2. GRANDES QUESTIONS**

### **2.1. Repousser les limites de la mesure de l'espace et du temps**

Les repères de référence célestes sont construits aujourd'hui à la fois en optique avec la mission *Gaia* et dans le domaine radio par VLBI, l'un et l'autre formant des composantes indépendantes de l'ICRF (International Celestial Reference Frame) qui est le repère reconnu par l'UAI. Par leur stabilité et leur précision extrême (quelques dizaines de microsecondes de degré), ces repères offrent la possibilité d'appréhender la géométrie et donc la physique des noyaux actifs de galaxies via la comparaison des positions mesurées aux différentes longueurs d'onde (radio et optique). Ils ne constituent donc plus seulement une grille de points de référence ultra-précis sur le ciel mais bien de nouveaux outils pour l'astrophysique. L'enjeu des prochaines années sera la production d'un repère multi-longueur d'onde (radio-optique) unifié, présentant une cohérence interne maximale, et dont la première réalisation est prévue pour 2027, une seconde version devant ensuite être produite à partir du catalogue *Gaia* final, au-delà de 2030. La densification massive du repère en radio ne pourra intervenir qu'avec SKA, en le couplant avec des réseaux VLBI afin d'obtenir la résolution angulaire nécessaire. L'infrastructure européenne JIV-ERIC qui se positionne sur ce créneau sera essentielle à cet égard, tout comme elle l'est déjà aujourd'hui pour l'extension de l'ICRF vers les plus hautes fréquences radio (24 et 32 GHz).

Le temps, quant à lui, est mesuré à haute précision grâce aux horloges atomiques, puis distribué aux utilisateurs par divers moyens (réseaux, signaux radio terrestres, satellites). Le temps et la fréquence sont essentiels pour un grand nombre d'applications en astronomie mais aussi en géosciences et en physique fondamentale. Un enjeu majeur de la prochaine décennie sera de continuer à améliorer les horloges basées sur des transitions atomiques dans la gamme optique, en vue de préparer une future redéfinition de la seconde. Ces horloges ont déjà démontré leur capacité à réaliser une unité du temps avec une incertitude d'au moins deux ordres de grandeur meilleure que les fontaines atomiques actuelles. De nombreux tests doivent encore être menés pour appréhender leur précision ultime et pour rendre leurs performances plus accessibles avant de pouvoir remplacer la définition actuelle de la seconde par une définition basée sur une ou plusieurs transitions atomiques dans la gamme optique. Toutes les techniques pour diffuser ces références (et les exploiter) tels que les liens optiques par fibre comme REFIMEVE+ ou en espace libre doivent aussi continuer à être développées. La proposition d'une infrastructure européenne temps-fréquence par fibre dans le cadre de la feuille de route ESFRI est en cours de préparation.

### **2.2. Vers une compréhension fine de la forme, du mouvement et des propriétés gravitationnelles de la Terre et des corps du système solaire**

Grâce à la mise œuvre de nouveaux moyens observationnels au sol ou dans l'espace, la communauté est à l'aube de pouvoir améliorer significativement notre connaissance des propriétés géométriques, dynamiques et gravitationnelles de la Terre et des corps du système solaire.

S'agissant de la Terre, l'ambition est d'atteindre une précision millimétrique en géodésie spatiale via notamment le déploiement du réseau VLBI de nouvelle génération VGOS (VLBI Global Observing System) et l'amélioration des performances des stations de télémétrie laser. L'objectif est de construire un repère de référence terrestre de cette précision, crucial pour l'étude de nombreuses problématiques géophysiques, en particulier le suivi du niveau des mers qui est d'une importance sociétale considérable. Ce repère est matérialisé par l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame) qui est le pendant de l'ICRF au niveau de la Terre. Dans ce contexte, la mission GENESIS combinera et confrontera sur une même plateforme tous les moyens de géodésie spatiale (VLBI, télémétrie laser, GNSS, DORIS), afin d'identifier les biais entre techniques, ce qui est essentiel pour atteindre le mm d'incertitude. Une forte coordination avec les infrastructures sol concernées sera nécessaire pour mener à bien les observations voulues, tandis que l'analyse des données impliquera de disposer de logiciels de géodésie spatiale multi-techniques tels que la chaîne GINS-DYNAMO du CNES. Les autres enjeux de la prochaine décennie concernent la détection du noyau solide interne et la compréhension de l'origine et de la variabilité de la nutation libre du noyau fluide qui passent par le suivi fin et continu de la rotation de la Terre, ce qui est l'un des buts annoncés du réseau VGOS.

La déclinaison au niveau national des moyens de géodésie spatiale globaux est l'implantation de l'Observatoire de Géodésie-Géophysique de Polynésie Française (OG<sup>2</sup>P) qui regroupera sur un même site toutes les techniques de géodésie spatiale. Cette implantation est essentielle en termes de couverture géographique, le Pacifique Sud étant dépourvu d'un tel observatoire fondamental. Le développement de senseurs quantiques (horloges, gravimètres, gradiomètres...) et des réseaux fibrés et espace-libre temps-fréquence continue par ailleurs à enrichir la panoplie des capacités de mesure du domaine, tandis que le projet CARIOQA développe la technologie des accéléromètres et gravimètres quantiques spatiaux et vise à démontrer leur fonctionnement lors d'une mission Pathfinder, en vue de futures missions d'observation de la Terre et de physique fondamentale.

A court terme, dans le contexte de leurs programmes d'exploration, la NASA et l'ESA vont installer des rétro-rélecteurs (coins de cube) de nouvelle génération sur la Lune. Ces réflecteurs permettront de réduire de façon très significative l'incertitude sur la mesure de la distance Terre-Lune, avec de nombreux enjeux scientifiques à la clé. Un autre enjeu à court et moyen terme pour l'exploration lunaire sera la définition et la réalisation de référentiels de temps et de position performants sur la Lune.

Pour ce qui est des corps du système solaire plus généralement, les données Gaia pour des centaines de milliers de petits corps vont avoir un impact considérable sur notre connaissance de la dynamique de ces corps, sans compter que les plaques photographiques anciennes, remesurées grâce au numériseur NAROO, vont pouvoir également être réanalysées, en tirant profit de la qualité du catalogue Gaia pour remonter dans le passé avec une précision équivalente à celle fournie par Gaia, et ainsi étendre la base de temps d'observation de ces corps. Complétée par les données de navigation, notamment obtenues par VLBI, de missions de planétologie comme JUICE, cette masse d'observations nouvelles rejaillira implicitement sur la qualité des éphémérides planétaires INPOP et apportera à terme une nouvelle vision de la dynamique du système solaire et de la structure des objets concernés.

### ***2.3. Tester et contraindre les interactions fondamentales***

Les techniques développées dans la communauté PNRGRAM permettent l'observation très fine de phénomènes gravitationnels, allant de la détection directe d'ondes gravitationnelles à des tests des principes et théories de la gravitation via des expériences de laboratoire et spatiales, la construction d'éphémérides du système solaire, le chronométrage de pulsars millisecondes, l'astrométrie d'objets évoluant dans des champs gravitationnels forts... Des expériences et analyses de nature similaire permettent également de tester le modèle standard de la physique des particules et de rechercher certains types possibles de matière noire.

La mission ACES/PHARAO, dont le lancement est programmé au début 2025, réalisera de nouveaux tests de la relativité générale en mesurant le redshift gravitationnel avec une précision améliorée, et en cherchant à détecter des variations temporelles de la constante de structure fine.

La poursuite de l'observation des ondes gravitationnelles au sol avec les détecteurs VIRGO et LIGO et au-delà potentiellement avec Einstein Telescope, complétée par l'observation depuis l'espace avec la mission LISA, constituera un sujet majeur pour la physique fondamentale au cours des prochaines décennies. Le développement de l'approche multi-messager en sera un aspect essentiel. C'est le cas en particulier des observations VLBI puis ultérieurement avec SKA-VLBI, celles-ci permettant de cartographier et de localiser précisément les sources d'émission, l'ensemble des observations multi-messagers concourant globalement à mieux appréhender les propriétés des objets émetteurs.

Par ailleurs, plusieurs programmes d'observation de longue durée vont permettre de continuer à améliorer les limites sur les possibles violations des théories de la gravitation et des interactions fondamentales. Y figurent le programme de chronométrage de pulsars millisecondes binaires ou triples mené avec le NRT et le programme de suivi astrométrique des étoiles au voisinage du centre galactique avec GRAVITY+ qui testent la relativité en champ fort.

Suite au succès de MICROSCOPE, la préparation d'une mission de seconde génération dont l'objectif serait de tester le principe d'équivalence au niveau de  $10^{-17}$  serait également d'un grand intérêt. Cette expérience pourrait s'appuyer sur des senseurs classiques comme pour MICROSCOPE ou sur l'interférométrie atomique.

### 3. ACTIVITES AUX INTERFACES

De par le périmètre scientifique très large qu'englobe le PNGRAM, il existe de nombreuses activités aux interfaces, à la fois avec les autres programmes nationaux au sein de l'INSU-AA, mais aussi avec les autres domaines de l'INSU (TS et OA) et les autres instituts du CNRS.

Au sein de l'INSU-AA, le PNGRAM a des activités à l'interface avec le PNCG et le PNHE pour ce qui est de la gravité en champ fort, l'énergie et la matière noire et les ondes gravitationnelles, le PNP pour ce qui concerne l'apport des éphémérides pour la connaissance physique des planètes, et l'AS SKA-LOFAR s'agissant des tests de la gravitation conduits avec les pulsars et des systèmes de référence.

Les activités aux interfaces avec l'INSU-TS et l'INSU-OA concernent le repère de référence terrestre (établissement et maintenance de l'ITRF), les références verticales (mesure et suivi du niveau de la mer par altimétrie satellitaire), le champ de gravité terrestre (déterminé et suivi dans le temps via des missions spatiales spécifiques) ainsi que l'étude et le suivi de la rotation de la Terre.

Les autres instituts du CNRS concernés par les activités du PNGRAM sont principalement l'INP (physique quantique et atomique, physique fondamentale) et l'IN2P3 (ondes gravitationnelles). Il existe également dans une moindre mesure des activités à l'interface avec l'INSIS (technologies temps-fréquence) et l'INSMI (mécanique céleste et spatiale, construction des éphémérides).

### 4. ATOUTS, POINTS DE VIGILANCE ET OPPORTUNITES

La communauté PNGRAM est en position de leader dans de nombreux domaines (systèmes de référence, éphémérides, temps-fréquence, physique fondamentale dans l'espace) et possède une grande visibilité internationale, notamment à travers sa présence dans les services ou organismes internationaux qui structurent ces domaines, avec souvent des aspects sociétaux importants à la clé. Une autre force de la communauté PNGRAM est sa maîtrise des technologies de pointe pour le développement d'instrumentation au sol et dans l'espace, ainsi que son savoir-faire pour l'analyse des données. L'interdisciplinarité est également un élément d'importance. Est à souligner enfin le très fort soutien du CNES, qui est un atout essentiel et souvent central pour de nombreuses activités.

En termes RH, un point de vigilance concerne la thématique des systèmes de référence qui a vu très peu de recrutements au cours des quinze dernières années. Avec plusieurs départs à la retraite prévus dans les cinq ans à venir, il y a un risque réel d'affaiblissement de cette communauté, voire de disparition de certains sujets phares, s'il n'est pas suppléé à ces départs. Un autre point de vigilance concerne le positionnement ambigu pour une partie de la géodésie spatiale qui est transverse aux domaines AA, OA et TS et n'a pas la visibilité souhaitable au sein de l'INSU.

Parmi les opportunités figurent les grands projets au sol ou dans l'espace à venir (ACES/PHARAO, GENESIS, LISA, OG<sup>2</sup>P) autour desquels les communautés concernées sont rassemblées.

## 5. RECOMMANDATIONS

Deux recommandations, en lien avec les points de vigilance notés ci-dessus, sont mises en avant :

- Prioriser des recrutements sur la thématique des systèmes de référence afin de maintenir le potentiel de cette communauté et sa place à l'international
- Renforcer la coordination intra-INSU (AA, OA, TS) pour le soutien aux moyens de géodésie spatiale