

Programme National GRAM

Bilan 2016-2021 et Perspectives

03/06/2021

TABLE DES MATIERES

1.	Présentation du PNGRAM	2
1.1.	Périmètre scientifique	2
1.2.	Organisation et fonctionnement.....	2
2.	Bilan 2016-2021.....	4
2.1.	Vie du PNGRAM.....	4
2.2.	Evénements scientifiques marquants	7
2.3.	Autres faits saillants	8
3.	Perspectives scientifiques	9
3.1.	Grandes questions.....	9
3.2.	Evolutions thématiques.....	10
	ANNEXES.....	12
A.	Moyens au sol et dans l'espace.....	12
B.	Contours de la communauté PNGRAM	12

1. PRESENTATION DU PNGRAM

1.1. PERIMETRE SCIENTIFIQUE

Le Programme National GRAM (Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie) a été créé en 2016, succédant à l'Action Spécifique GRAM qui avait été mise en place en 2010. Le PNGRAM a vocation à coordonner et développer des actions dans 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.

Ces actions peuvent être de nature théorique, procéder de simulations ou d'analyse de données, et inclure le développement d'instrumentation au sol ou embarquée ; elles peuvent aussi viser à animer et fédérer la communauté sur certains sujets. Compte tenu des domaines couverts et de la nature des actions soutenues, le champ d'intervention du PNGRAM rentre dans le périmètre de plusieurs sections du comité national de la recherche scientifique 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 moyens observationnels, le PNGRAM est en prise avec les grands moyens sol/espace sur lesquels s'appuie la recherche dans ces disciplines. Parmi ceux-ci, figurent Gaia, MICROSCOPE ou encore ACES/PHARAO et LISA pour ce qui est des missions spatiales, tandis que côté sol, on trouve l'expérience GBAR, MIGA, le radiotélescope de Nançay, SKA, Virgo/LIGO, le réseau T/F national, la station Méo et potentiellement l'OGFT dans le futur (voir la liste complète à l'annexe A).

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 important car ils fournissent les données sur lesquelles s'appuient certaines actions du PNGRAM.

La taille de la communauté correspondant à ce périmètre scientifique est d'environ 250 personnes (cf. estimation dans la partie 2).

1.2. ORGANISATION ET FONCTIONNEMENT

Le PNGRAM est financé par trois instituts du CNRS (INSU, INP et IN2P3) ainsi que par le CNES. Il reçoit une dotation de l'ordre de 90 k€ par an, dont la plus grande partie est redistribuée via l'appel d'offre annuel, le reste servant à l'animation scientifique et au fonctionnement. Son organisation repose sur un Conseil Scientifique de 16 membres dont l'expertise couvre le périmètre scientifique voulu. Il est dirigé par un binôme constitué d'un président et d'un directeur choisis parmi les membres du Conseil Scientifique et nommés par les tutelles. La liste des membres du Conseil et des responsables pour la période 2016-2021 est donnée dans la table 1 ci-dessous. Le Conseil Scientifique se réunit une ou deux fois par an (au printemps et à l'automne), la réunion d'automne étant principalement consacrée à l'évaluation des réponses à l'appel d'offres annuel et aux attributions correspondantes.

Table 1 : Composition du Conseil Scientifique¹, domaine d'expertise et appartenance de ses membres.

Nom	Domaine d'expertise	Appartenance	Laboratoire	Nomination
Anne Amy-Klein	Instrumentation, métrologie temps-fréquence	INP	LPL	06/2016
Luc Blanchet	Physique fondamentale théorique, ondes gravitationnelles	INP	IAP	06/2016
Phillipe Brax ²	Cosmologie, gravitation, énergie noire	CEA	IPhT	08/2017
Patrick Charlot³ (Directeur)	Systèmes de référence, rotation de la Terre, VLBI, géodésie spatiale	INSU	LAB	06/2016
Clément Courde	Télemétrie laser, géodésie spatiale	INSU	GéoAzur	06/2016
Hubert Halloin	Ondes Gravitationnelles	IN2P3	APC	06/2016
Rodolphe Le Targat	Instrumentation physique fondamentale, horloges à atomes froids,	INP	SYRTE	06/2016
Gilles Métris	Mécanique céleste, géodésie spatiale, mécanique spatiale	INSU	GéoAzur	06/2016
Jérôme Novak	Physique fondamentale théorique	INSU	LUTH	06/2016
Franck Pereira	Instrumentation physique fondamentale, senseurs inertiels à atomes froids	INSIS	SYRTE	06/2016
Nicolas Rambaux ⁴	Dynamique et rotation des planètes, planétologie	INSU	IMCCE	11/2016
Serge Reynaud	Physique fondamentale expérimentale et théorique	INP	LKB	06/2016
Manuel Rodrigues	Instrumentation physique fondamentale, accéléromètres	ONERA	DMPH	06/2016
Philip Tuckey (Président)	Métrologie temps-fréquence, physique fondamentale théorique	INSU	SYRTE	06/2016
Peter Wolf	Physique fondamentale théorique et expérimentale	INSU	SYRTE	06/2016

Représentants des tutelles

Michel Perault (INSU)	Thérèse Huet (INP)	Hubert Halloin (IN2P3)	Isabelle Petitbon (CNES)
-----------------------	--------------------	------------------------	--------------------------

¹ Le Conseil comprenait également Richard Biancale (CNES, domaine d'expertise : géodésie spatiale, champ de gravité, mécanique spatiale), décédé en 2019, et qui doit être remplacé.

² A remplacé Chiara Caprini (APC) en 2017 après que celle-ci a été nommée Directrice du GDR Ondes Gravitationnelles.

³ A succédé à Gilles Métris en tant que Directeur du PNGRAM au 30/05/2017.

⁴ A succédé à Jacques Laskar en novembre 2016.

En termes d’animation scientifique, le PNGRAM organise des journées scientifiques tous les deux ans. Ces journées comprennent à la fois des exposés sollicités (sur la base des projets financés dans le cadre de l’appel d’offre lors des années précédentes) ainsi que des communications libres. En complément, un atelier PNGRAM est aussi généralement organisé lors des journées de la SF2A les années intermédiaires. Occasionnellement, des ateliers sur des sujets spécifiques, éventuellement conjoints avec d’autres PN, peuvent aussi être organisés lors des journées de la SF2A. Le PNGRAM possède une liste de diffusion via laquelle sont disséminées des informations diverses (annonce de colloques, offres de thèses et post-docs,...) qui relèvent de son périmètre scientifique.

Outre l’animation scientifique et le travail d’évaluation des projets soumis à l’appel d’offres annuel, le PNGRAM intervient aussi en réponse aux sollicitations des tutelles, par exemple pour donner des avis ou évaluer des projets soumis dans le cadre d’autres appels d’offres. Ses responsables sont aussi invités aux réunions du groupe de travail « physique fondamentale » du CNES. Par ailleurs, l’un d’eux est également membre du Conseil Scientifique du GDR Ondes Gravitationnelles, au titre du PNGRAM.

2. BILAN 2016-2021

2.1. VIE DU PNGRAM

2.1.1. Dotation des tutelles

Au cours des cinq dernières années, le PNGRAM a bénéficié d’une dotation qui est passée de 93 k€ en 2017 à 88 k€ en 2021, après un maximum à 96 k€ en 2019. La figure 1 montre l’évolution dans le détail de cette dotation avec la contribution des différentes tutelles. Cette évolution se caractérise par une augmentation de l’ordre de 15% de la contribution du CNES à partir de 2019, tandis que la contribution de l’INP, à l’inverse, a été réduite de 50% sur les deux dernières années. La contribution de l’INSU, quant à elle, est restée stable durant toute la période, tout comme celle de l’IN2P3.

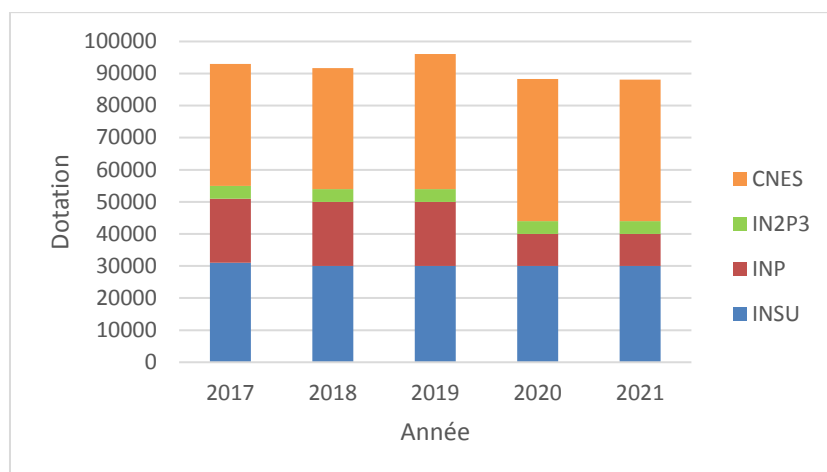


Figure 1: Dotation des tutelles du PNGRAM par année sur la période 2017-2021.

2.1.2. Contours et taille de la communauté

Les contours et la taille de la communauté PNGRAM ont été déterminés à partir de la liste de tous les porteurs de projets et co-proposants ayant répondu aux appels d’offres du PNGRAM de 2017 à 2021, en comptant leur nombre et en identifiant leur institut d’appartenance ainsi que leur laboratoire.

Au cours de la période, un total de 50 porteurs de projets différents ont ainsi répondu aux appels d’offres, auxquels s’ajoutent 166 co-proposants, soit un total de 216 personnes impliquées. Par ailleurs, 23 autres personnes ont élargé aux demandes CSAA relevant du domaine au cours de la même période, d’où un total de 239 personnes. Sur la base de ce chiffre, qui constitue sans doute une borne inférieure, on peut estimer que la taille de la communauté est d’environ 250 personnes.

L'analyse de l'institut d'appartenance des porteurs de projets (Figure 2, gauche) montre que celui-ci est l'INSU dans 65% des cas (avec environ 10% en Terre Solide), l'INP dans 30% des cas et l'IN2P3 dans 5% des cas. Si l'on considère tous les proposant (porteurs et co-proposants), on constate une proportion accrue de co-proposants émanant de l'INSU-TS et de l'IN2P3, avec également quelques-uns appartenant à l'INSIS et l'INSMI (Figure 2, droite). S'agissant des laboratoires desquels émanent les 50 porteurs de projets, ceux-ci sont au nombre de 21, dont 13 qui ont l'INSU comme institut principal de rattachement et 8 qui sont rattachés à l'INP, l'IN2P3 ou l'INSIS. Les laboratoires desquels émanent le plus de porteurs de projets sont le SYRTE, l'IMCCE et Géoazur côté INSU et le LKB côté INP. Si l'on étend cette analyse à tous les co-proposants (voir graphiques à l'annexe B), le total des laboratoires impliqués grimpe à 40, dont 21 ayant l'INSU pour rattachement principal.

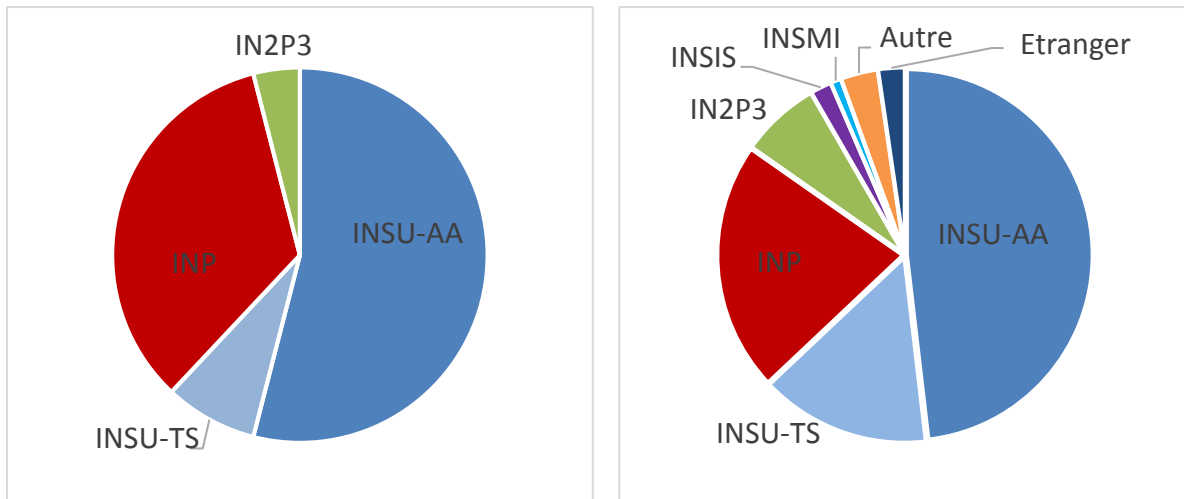


Figure 2 : Répartition par institut des porteurs de projets et co-proposants ayant émergé à l'appel d'offres du PNGRAM entre 2017 et 2021. A gauche, seuls les porteurs de projets sont considérés, tandis qu'à droite tous les proposant (porteurs et co-proposants) sont inclus. Pour l'INSU, une distinction est également faite entre les domaines AA et TS. Appartenance déterminée d'après la section du comité national d'appartenance. Le secteur « Autre » concerne des personnels qui ne sont pas dans des UMR (CNES, ONERA, CEA, BIPM,...).

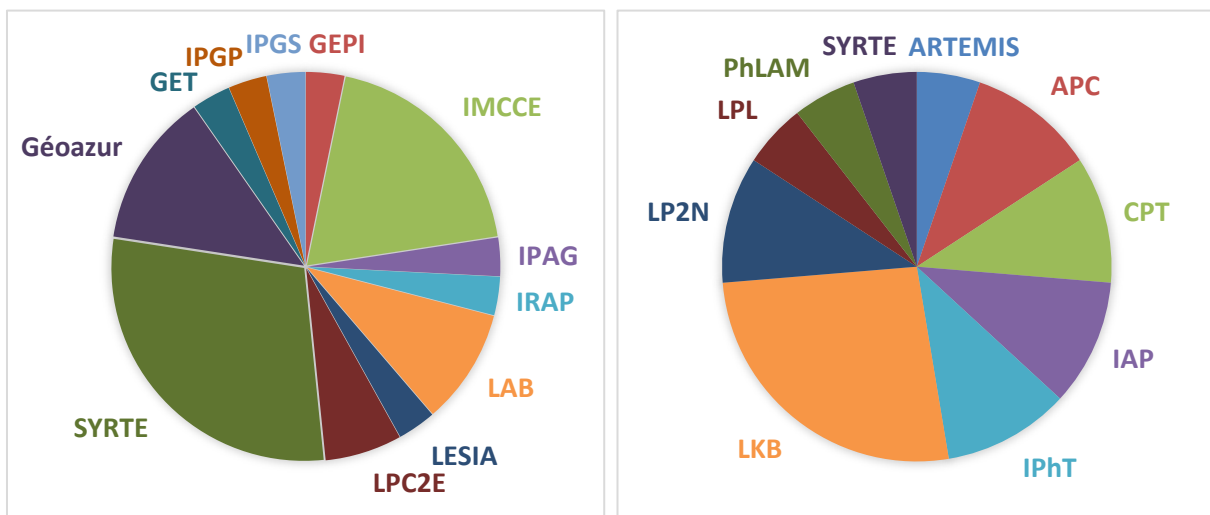


Figure 3 : Répartition par laboratoire des porteurs de projets ayant émergé à l'appel d'offres du PNGRAM entre 2017 et 2021. A gauche figure la répartition pour les porteurs de projets appartenant à l'INSU et à droite celle pour les porteurs de projets appartenant à l'IN2P3 et l'INP. Appartenance déterminée d'après la section du comité national d'appartenance.

2.1.3. Appel d'offres annuel

Au cours des cinq dernières années, un total de 92 demandes de financement ont été soumises via l'appel d'offres annuel du PNGRAM. Le bilan chiffré par an pour cet appel d'offres est indiqué dans la table 2 ci-dessous. Si l'on excepte la dernière année, il y a eu 20 demandes par an en moyenne, parmi lesquelles 80 à 90% ont été financées, les attributions allant de 1500 € à 15000 €, avec une moyenne de 4500 €. Le taux de pression moyen sur la période est d'environ 1,5.

Table 2 : Bilan chiffré de l'appel d'offres annuel du PNGRAM entre 2017 et 2021.

Année	2017	2018	2019	2020	2021
Nombre de demandes	19	22	21	19	11
% demandes financées	90%	77%	86%	95%	91%
Taux de pression	1,55	1,78	1,50	1,24	1,18
Attribution minimum (€)	2500	2500	1500	2000	3000
Attribution maximum (€)	12000	8000	15000	14000	10000
Attribution moyenne (€)	4676	4782	4600	4378	6324

L'analyse de ces attributions en fonction de l'institut ou du laboratoire d'appartenance du porteur de projet (Figure 4) révèle une typologie similaire à celle observée lorsqu'on examine la répartition des porteurs de projets (Figs 2 et 3). Ainsi les laboratoires qui sont le plus dotés sont ceux qui ont le plus de porteurs de projet, en l'occurrence le SYRTE, l'IMCCE et Géoazur côté INSU, et le LKB côté INP.

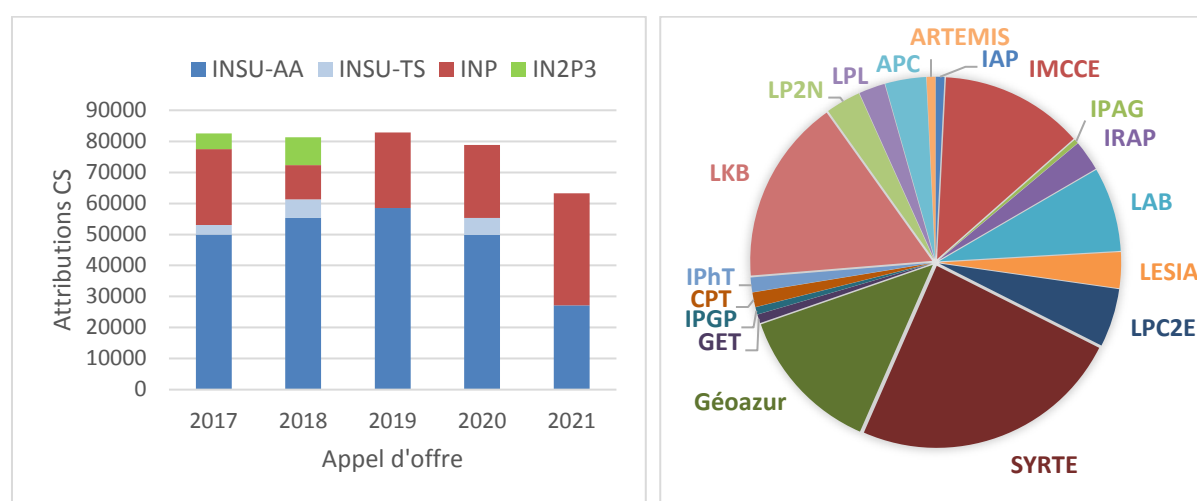


Figure 4 : Répartition des attributions selon l'institut d'appartenance des porteurs de projets et par laboratoire. L'histogramme de gauche indique la répartition par institut par année alors que le graphique de droite totalise les attributions par laboratoire sur l'ensemble de la période 2017-2021.

2.1.4. Animation scientifique

La liste des manifestations organisées ou co-organisées par le PNGRAM depuis 2016 est indiquée dans la table 2 ci-dessous. A cela s'ajoutent les rencontres de Moriond, dont l'un des thèmes, tous les deux ans, est axé sur la gravitation, avec plusieurs membres du Conseil Scientifique du PNGRAM dans le comité d'organisation, et que le PNGRAM soutient financièrement.

Table 3 : manifestations scientifiques organisées ou co-organisées par le PNGRAM

Année	Manifestation	Lieu	Dates
2016	Journées scientifiques GRAM 2016	Paris (APC)	2-3 juin
	Atelier conjoint PNGRAM-PNHE sur les ondes gravitationnelles lors des Journées de la SF2A	Lyon	14 juin
2017	Atelier sur la physique fondamentale avec les données spatiales lors des Journées de la SF2A	Paris	4 juillet
	Atelier conjoint PNGRAM, PCMI, PNCG, PNP et PNPS sur l'impact multidisciplinaire de la mission Gaia lors des Journées de la SF2A	Paris	5-6 juillet
2018	Journées scientifiques du PNGRAM	Besançon	14-15 juin
2019	Atelier général PNGRAM lors des journées de la SF2A	Nice	14 mai

Du fait de la pandémie, les journées scientifiques 2020 ne se sont pas tenues. Les prochaines seront organisées lorsque la situation sanitaire le permettra, fin 2021 ou en 2022.

2.2. EVENEMENTS SCIENTIFIQUES MARQUANTS

2.2.1. Un repère de référence céleste pour la première fois en optique grâce à Gaia

Avec la diffusion de la seconde version des résultats de la mission *Gaia* en avril 2018, le domaine des systèmes de référence a franchi un pas de géant. Pour la première fois, une réalisation autonome d'un repère de référence céleste a en effet été obtenue dans le domaine visible. Le repère produit (*Gaia* CRF2) comprend les positions de 550 000 QSO avec une précision uniforme sur tout le ciel qui approche celle de l'ICRF3 (dans le domaine radio) et pour un nombre d'objets qui le dépasse de deux ordres de grandeur. La comparaison avec l'ICRF3 montre en outre qu'il n'existe pas de déformation plus grande que 30 μ as entre les deux repères, ouvrant par là-même des perspectives intéressantes pour ce qui est de la compréhension de la physique des objets sous-jacents.

2.2.2. La détection directe des ondes gravitationnelles avec LIGO et VIRGO

La détection en septembre 2015 du signal gravitationnel émis par la coalescence d'un système binaire de trous noirs a marqué la transition entre un travail expérimental long et acharné et la phase d'étude des phénomènes naturels concernés. Ce signal ainsi que ceux détectés par la suite ont confirmé les prédictions de la relativité générale, depuis la phase spiralante jusqu'aux champs forts de la phase de fusion et « ring-down », tout en fournissant l'opportunité de tester les théories alternatives de la gravitation. Ils ont apporté des informations sur la population de trous noirs stellaires massifs et des signaux attendus dans la gamme de fréquences de LISA. Enfin la détection d'une kilonova en août 2017 a ouvert la voie de l'astronomie multi-messagère.

2.3. AUTRES FAITS SAILLANTS

2.3.1. La réalisation du repère de référence céleste ICRF3 et son adoption par l'UAI

En août 2018, l'ICRF3 est devenu la nouvelle référence internationale en matière de repère d'espace suite à son adoption par l'UAI. Ce repère, construit aux fréquences radio en intégrant toutes les mesures acquises par VLBI depuis 40 ans, est le fruit d'une collaboration internationale organisée sous l'égide de l'UAI et dans laquelle les équipes françaises ont joué un rôle de premier plan. Les quelques 4500 sources qui constituent l'ICRF3 ont une précision en position atteignant 30 μs pour les meilleures d'entre-elles, avec pour certaines des positions à trois fréquences (8, 24 et 32 GHz). Ce niveau de précision a pu être atteint notamment grâce à la prise en compte, pour la première fois, de l'effet de l'accélération galactocentrique (estimée à 5.8 $\mu\text{s}/\text{an}$) lors du traitement.

2.3.2. Principe d'équivalence : l'universalité de la chute libre vérifiée à 10^{-14} près avec MICROSCOPE

Le microsatellite MICROSCOPE, lancé le 26 avril 2016, dont le but est de vérifier l'universalité de la chute libre, possède des performances très supérieures à celles prévues nominalement, notamment pour le système de contrôle d'attitude et d'accélération du satellite qui est d'excellente qualité. Les premiers résultats, basés sur moins de 10% des données de la mission complète, ont confirmé le principe d'équivalence avec une exactitude de 2.10^{-14} , une amélioration d'un facteur 10 par rapport aux limites existantes jusqu'alors. Cette valeur devrait encore être abaissée lorsque l'ensemble des données de la mission auront été prises en compte dans le traitement.

2.3.3. Principe d'équivalence : le redshift gravitationnel vérifié à 10^{-5} avec les satellites Galileo 5 et 6

Le 22 août 2014, les satellites Galileo 5 et 6 ont été placés accidentellement sur une orbite excentrique, au lieu de l'orbite circulaire attendue, en raison d'une défaillance du lanceur. Cette défaillance a toutefois fourni une opportunité inattendue et unique de mesurer très finement le décalage temporel, d'origine gravitationnelle, des horloges embarquées au cours de leur mouvement orbital (par comparaison avec leurs homologues terrestres) et de tester les limites de la théorie de la gravitation. Après un suivi de trois années, les mesures réalisées ont permis de confirmer les prédictions de la relativité générale avec une incertitude relative de $2.5.10^{-5}$, soit une amélioration d'un facteur presque 6 par rapport aux résultats de la sonde Gravity Probe A en 1976.

2.3.4. Première détection du rougissement gravitationnel au voisinage d'un trou noir avec GRAVITY

Grâce à l'instrument GRAVITY, la trajectoire de l'étoile S2 qui orbite autour du trou noir super-massif situé au centre de la Galaxie, a pu être suivie avec une très grande précision astrométrique (50 μs) lors de son passage au péricentre en mai 2018. Couplée avec des mesures de vitesse radiale réalisées avec l'instrument SINFONI, les observations ont révélé un effet de rougissement de la lumière émise par l'étoile lors de son déplacement dans le champ gravitationnel intense généré par le trou noir. Ce rougissement, pour la première fois détecté dans l'environnement extrême d'un trou noir super-massif, apparaît en plein accord avec les prédictions de la théorie de la relativité générale qui a ainsi pu être testée en champ fort grâce aux observations réalisées.

2.3.5. La valeur de la constante de structure fine déterminée 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 8×10^{-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.

2.3.6. Le concept de détection des ondes gravitationnelles dans l'espace validé par LISA Pathfinder

LISA Pathfinder, lancé le 3 décembre 2015, était un démonstrateur technologique pour la future mission LISA. Les résultats qui en ont découlé ont fourni une démonstration éclatante de la capacité de mesure d'accélération fine entre masses de référence et de contrôle « drag-free » du satellite, avec des performances qui ont surpassé les attentes sur la totalité de la bande de mesure de l'instrument et montré que la technologie requise pour LISA fonctionnait déjà de manière optimale. Cette validation du concept de détection des ondes gravitationnelles dans l'espace, qui a donc pleinement réussi via le démonstrateur LISA Pathfinder, était le point de passage obligé pour poursuivre les développements techniques et ouvrir la voie à la mission LISA.

2.3.7. La comparaison d'horloges optiques à l'échelle européenne à 5×10^{-17} à l'aide de liens fibrés

En 2015, deux horloges optiques basées sur l'atome de Sr ont été comparées via un lien à fibre optique d'une longueur inédite de 1400 km entre Paris et Braunschweig (Allemagne). Beaucoup plus performant que les comparaisons par satellites utilisées couramment, ce type de lien n'ajoute qu'une part négligeable à l'incertitude de la mesure, ce qui permet dès lors de tester les caractéristiques des horloges elles-mêmes. L'accord de fréquence relative à 5×10^{-17} qui a été mesuré lors de cette expérience traduit l'avancée des performances des horloges optiques et démontre leur capacité à aller vers un niveau de précision jamais atteint.

3. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

3.1. GRANDES QUESTIONS

3.1.1. 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. Côté optique, l'enjeu des prochaines années est l'obtention du catalogue *Gaia* final qui déterminera la précision ultime du repère et ses propriétés, qui demeureront ensuite valides pour très longtemps. Dans le domaine radio, l'objectif est le renforcement des repères aux hautes fréquences (24 et 32 GHz) et de la couverture du ciel dans l'hémisphère sud, et bien sûr toujours le gain en précision en allant notamment vers la prise en compte de la structure physique des objets de référence. La densification massive du repère ne pourra intervenir qu'avec le futur interféromètre SKA, en le couplant avec des réseaux VLBI afin d'obtenir la résolution nécessaire. L'infrastructure européenne JIV-ERIC qui se positionne sur ce créneau sera essentielle à cet égard. 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 de nombreuses applications en astronomie mais aussi en géosciences et 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.

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

Grâce aux moyens observationnels qui viennent d'être mis en œuvre ou vont être mis en œuvre, la communauté est à l'aube de pouvoir améliorer clairement notre connaissance des propriétés

géométriques, dynamiques et gravitationnelles de la Terre et des corps du système solaire. S'agissant de la Terre, les enjeux à venir majeurs concernent la détection du noyau solide interne et la compréhension de l'origine et de la variabilité de la nutation libre du noyau fluide. De tels objectifs passent par le suivi fin et continu de la rotation de la Terre, qui est l'un des buts du réseau VGOS, en cours de mise en œuvre au sein de la communauté VLBI géodésique internationale. Sa déclinaison au niveau national est l'implantation d'un Observatoire Géodésique Fondamental (incluant toutes les techniques de géodésie spatiale) sur le site de Tahiti, le Pacifique Sud étant dépourvu d'un tel observatoire. Le développement des senseurs quantiques (gravimètres atomiques, gradiomètres,...) continue par ailleurs à enrichir les capacités de mesure dans ces domaines. Pour ce qui est des corps du système solaire, les observations *Gaia* vont avoir un impact considérable sur notre connaissance de ces corps, sans compter que les plaques photographiques anciennes vont pouvoir également être réanalysées, en tirant profit de la qualité du catalogue *Gaia* pour remonter dans le passé (projet NAROO). Cette masse d'observations nouvelles rejaillira implicitement sur la qualité des éphémérides planétaires INPOP.

3.1.3. Jusqu'où les lois fondamentales de la gravitation sont-elles valables ?

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,... Les années à venir vont demander un travail considérable pour exploiter les moyens observationnels existants ou disponibles prochainement, comme la mission ACES/PHARAO qui vise à mesurer le redshift gravitationnel avec une précision améliorée et à détecter les variations temporelles de la constante de structure fine. Mais il s'agira aussi de préparer les missions futures, dont notamment des concepts post-MICROSCOPE, à partir de senseurs « classiques », ou bien encore en utilisant l'interférométrie atomique.

3.2. EVOLUTIONS THEMATIQUES

3.2.1. Des repères célestes multi-longueurs d'ondes et ultra-précis pour l'astrophysique

Alors que le repère céleste, depuis sa construction initiale il y a 20 ans, a toujours été le fait d'observations à une seule longueur d'onde, l'arrivée du repère optique *Gaia* concomitamment à l'extension du repère radio (ICRF3) à trois longueurs d'onde, ouvre de nouvelles perspectives. Par leur stabilité et leur précision extrême, ces repères offrent en effet 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 sur le ciel mais bien de nouveaux outils pour l'astrophysique.

3.2.2. L'univers gravitationnel dévoilé avec les observations multi-messagers et la mission LISA

La poursuite de l'observation des ondes gravitationnelles avec les détecteurs VIRGO et LIGO sera un sujet majeur pour la physique fondamentale et l'astrophysique au cours des années à venir. Le développement de l'approche multi-messager, qui permet de mieux appréhender les propriétés des objets émetteurs, en sera un aspect essentiel. En parallèle, la France doit consolider sa participation à la future mission LISA et mobiliser l'ensemble des communautés scientifiques concernées pour se préparer à son exploitation, afin que le retour scientifique soit à la hauteur de l'investissement consenti pour la préparation et la mise en œuvre de la mission.

3.2.3. De nouveaux tests du principe d'équivalence

Plusieurs instruments actuels et 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. Dans le domaine du spatial, il est nécessaire de préparer une mission de la génération d'après MICROSCOPE, qui viserait un test du principe d'équivalence au niveau de 10^{-17} . Cette expérience pourrait être à base de masses macroscopiques ou d'ondes de matière.

3.2.4. La Terre et le système solaire au peigne fin grâce à la géodésie spatiale et aux données Gaia

L'ambition annoncée d'atteindre une précision millimétrique en géodésie spatiale, notamment via le réseau VLBI de nouvelle génération, va permettre des avancées significatives dans notre compréhension de la forme et de la dynamique de la Terre. Cette précision est aussi indispensable à l'étude des changements globaux qui est une question sociétale d'importance. Par ailleurs, la publication des données Gaia pour des centaines de milliers de petits corps du système solaire, complétée par l'accès aux données de navigation de missions de planétologie, va apporter une nouvelle vision de la dynamique du système solaire et de la structure des objets concernés.

3.2.5. Vers une définition optique de l'unité du temps

Les horloges optiques ont déjà démontré leur capacité à réaliser une unité du temps avec une incertitude au moins deux ordres de grandeur meilleure que les fontaines atomiques actuelles. Il reste beaucoup de travail pour tester les limites ultimes des horloges optiques et pour rendre leurs performances 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 méthodes pour exploiter ces références doivent aussi continuer à être développées, tels les liens optiques par fibre ou en espace libre pour leur diffusion.

ANNEXES

A. MOYENS AU SOL ET DANS L'ESPACE

Le tableau ci-dessous détaille les moyens sol/espace d'intérêt pour la communauté PNGRAM, avec leur niveau de priorité et en distinguant ceux qui en opération ou financés et ceux qui sont en projet.

Moyens	En exploitation ou financé		En projet	
	P0	P1, P2	P0	P1, P2
Espace	ACES/PHARAO, Gaia , GNSS , LISA, MICROSCOPE	BepiColombo, Euclid, JUICE, JUNO	MARVEL, MICROSCOPE suite, STE-QUEST	GAP
Sol	GBAR, GRAVITY , JIV-ERIC (VLBI) , MéO (LLR/SLR) , MIGA, NRT , REFIMEVE+, Réseau TF , SKA, VIRGO/LIGO		Observatoire Géodésique Fondamental de Tahiti (OGFT)	Einstein Telescope

Note : les moyens en exploitation sont indiqués en caractères gras.

B. CONTOURS DE LA COMMUNAUTE PNGRAM

Les diagrammes circulaires fournis ci-dessous (Figure 5) détaillent la répartition par laboratoire des porteurs de projets et co-proposants ayant émergé aux appels d'offres du PNGRAM entre 2017 et 2021, en distinguant ceux dont l'institut d'appartenance est l'INSU (diagramme de gauche) et ceux dont l'institut d'appartenance est un autre institut du CNRS (diagramme de droite).

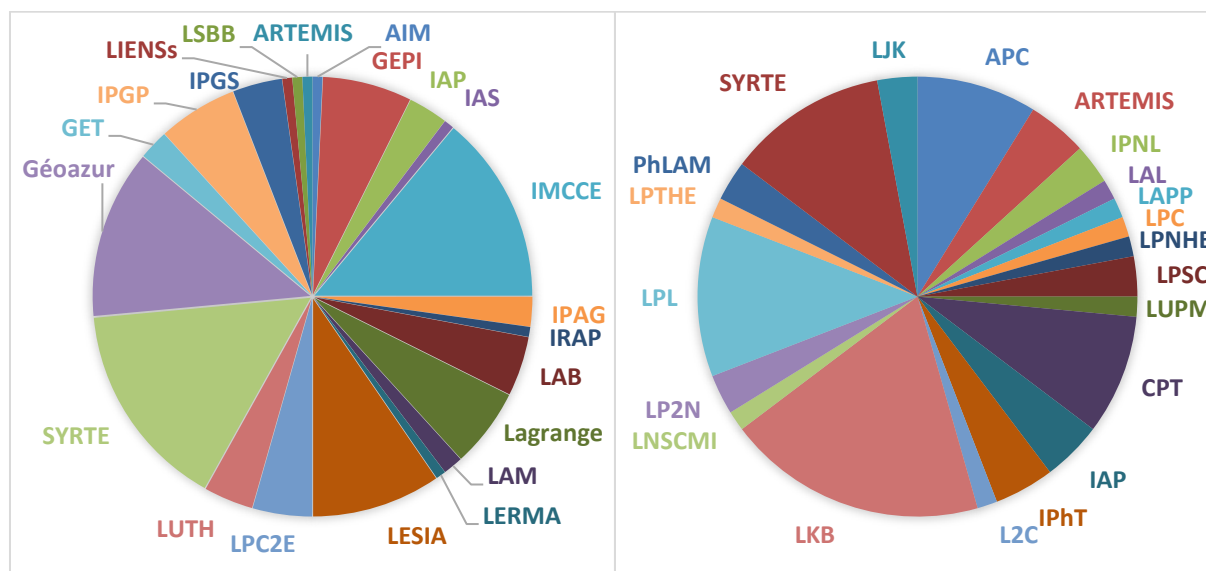


Figure 5 : Répartition par laboratoire des porteurs de projets et co-proposants ayant émergé à l'appel d'offres du PNGRAM entre 2017 et 2021. A gauche figure la répartition pour les proposants appartenant à l'INSU et à droite celle pour les proposants appartenant aux autres instituts (INP2P3, INSU, INSIS, INSMI).