



Bilan (2020-2024) Projet (2025-2030)

Rédigé par Pierre-Olivier Petrucci (*directeur du PNHE*), David Maurin (*président du CS du PNHE*) et les *membres du CS du PNHE* : Francesca Calore, Mickael Coriat, Stefano Gabici, Diego Götz, Lucas Guillemot, Astrid Lamberts, Martin Lemoine, Jérôme Novak, Régis Terrier, Thierry Pradier, Fabian Schüssler

Document finalisé le 26/06/2024

Remerciements

À différents stades de la rédaction, ce document a bénéficié de l'expertise et d'échanges avec de nombreuses personnes de la communauté HE. Nous remercions ainsi, pour leur aide et suggestions, M. Clavel (section Inclusion/diversité/égalité), D. Turpin (section [Astronomie participative](#)), F. Marion (ancienne membre du PNHE), S. Vergani (ancienne directrice du PNHE) et, pour les aspects besoins instrumentaux pour le suivi au sol, S. Antier, S. Basa, M. Cerruti, F. Cangemi, S. Chaty, S. Corbel, F. Daigne, L. Dessart, T. Foglizzo, Y. Génolini, O. Godet, C. Guépin, S. Guillot, C. Ng, J. Petri, E. Quintin, R. Raynaud, G. Theureau, G. Voisin, N. Webb, A. Zech (nos excuses à celles et ceux qui nous aurions oublié de lister !). Nous remercions aussi la communauté dans son ensemble qui, via ses retours aux questionnaires et ses participations aux discussions des journées du PNHE, a permis de fournir la matière ou d'enrichir notre réflexion sur ce bilan et ce projet.

Liste d'acronymes utilisés dans ce document

- AàP : Appel à Projet
- AGN : « Active Galactic Nuclei »
- AS : Actions Spécifiques
- ASI : Agence Spatiale Italienne
- AT : Actions Transverses
- CS : Conseil Scientifique
- ETP : Équivalents Temps Plein
- FIP : « Feebly Interacting Particles »
- FRB : « Fast Radio Burst »
- GdR : Groupement de Recherche
- GENCI : Grand Équipement National de Calcul Intensif
- GRB : « Gamma-Ray Bursts »
- HE : Hautes Énergies
- HPC : « High-Performance Computing »
- IRN : « International Research Network »
- IRN : « International Research Network »
- ISS « International Space Station »
- LVK : LIGO/VIRGO/KAGRA
- MHD : Magnéto-Hydro-Dynamique
- MSP : « MilliSecond Pulsar »
- OG : Ondes Gravitationnelles
- PN : Programme National
- PNAA : Programme National Astronomie et Astrophysique
- PTA : « Pulsar Timing Array »
- QPE : « Quasi-Periodic Emission »
- RC : Rayonnement Cosmique
- RCG : Rayons Cosmiques Galactiques
- TDE : « Tidal Disruption Events »
- WIMP : « Weakly Interacting Massive Particles »

Résumé

Les quatre grandes questions thématiques (section [1.1](#), et [2.1](#) pour les faits marquants)

- Processus physiques dans l'environnement des objets compacts à travers l'Univers ;
- Origine, production et transport des particules de HE (γ , ν et rayons cosmiques) ;
- Origine, émissions multi-messagers, évolution temporelle des phénomènes transitoires ;
- Physique exotique pouvant être testée par les données astrophysiques.

Forces, Faiblesses, Opportunités, Menaces (section [3.3](#))

- **Forces** : (i) panorama instrumental très large, (ii) thématiques du PNHE multi-instituts et reposant sur des collaborations multi-compétences fortes, (iii) compétences et expertises reconnues au niveau national et international, (iv) certaines thématiques en pleine croissance notamment dans le multi-messager et le transitoire.
- **Faiblesses** : (i) ressources humaines limitées notamment pour la gestion des systèmes d'alertes, (ii) tâches de services actuelles pas très adaptées à la gestion de ces alertes ; (iii) budget PNHE parmi les plus faibles des PN alors que communauté dynamique et en pleine croissance.
- **Opportunités** : (i) nombreux nouveaux instruments prévus/discutés notamment dans le multi-messagers, (ii) échanges inter-thématiques/instituts nombreux pouvant permettre la mise en place de projets/financements importants, (iii) vivier très important.
- **Menaces** : (i) crainte d'une continuité de baisse des crédits (à euros constant) à la fois INSU mais aussi IN2P3 qui priorise GdR (pour l'animation) et financements fléchés (au détriment des PN) et fragilise une approche transverse nécessaire, (ii) difficultés de recrutement pour des profils multi-instituts, (iii) manque de formation académique sur les compétences transverses, (iv) panorama instrumental spatial des 10-15 prochaines années non assuré, (v) adaptation des objectifs scientifiques dans un futur moins carboné.

Défis scientifiques (section [3.4](#))

- **Transitoires/multi-messagers**. Optimiser le retour scientifique de l'astrophysique multi-messager et des transitoires à l'ère des instruments à grands relevés, des nouvelles missions sols et spatiales dédiées, des nouvelles campagnes d'observations d'ondes gravitationnelles et des nouvelles générations de télescopes à neutrinos.
- **Univers extrême**. Comprendre l'Univers extrême (environnements d'objets compacts, cycles de vie des AGNs, origine et transport du rayonnement cosmique, binaires X, sondages de l'état de la matière nucléaire) par l'étude de ses messagers électromagnétiques (radio, X, gamma), particulières (cosmiques, neutrinos) et ondes gravitationnelles.
- **Nouvelle physique**. Découvrir une nouvelle physique et comprendre la nature de la matière noire en recherchant les signatures astrophysiques associées.
- **Numérique**. Appréhender les processus complexes de l'astrophysique des HE à l'aide de calculs numériques hautes performances et d'intelligence artificielle.

Priorités (P0) instrumentations (sections [3.1](#) et [3.4](#))

- **Sol** : CTA, SKA, KM3NeT, LSST/FINK, Colibri
- **Espace** : (New)Athena, THESEUS

Perspectives de l'astronomie HE en France (section [3.5](#))

- Une évolution structurelle de l'INSU-AA non souhaitée et contraignante mais dont il faudra savoir tirer partie.
- Soutenir la communauté dans le suivi des transitoires, dans son engagement scientifique dans l'ELT et dans la gestion des données à l'ère du « big data ».
- Visibilité et pérennité de l'astronomie HE :
 - avoir un budget à la hauteur de la demande ;
 - vers la mise en place d'un SNO dédié aux transitoires ;
 - mieux inclure l'astrophysique HE dans les formations académiques ;
 - valoriser les profils multi-instituts pour de meilleurs recrutements.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
1. L'astrophysique des HE : grandes questions et communauté	6
1.1 Les grandes questions	6
Axe 1 : processus physiques en jeu dans l'environnement des objets compacts	6
Axe 2 : origine, production et transport des particules de HE (photons, neutrinos et RC).....	7
Axe 3 : origine, émissions multi-messagers et évolution temporelle des phénomènes transitoires.....	9
Axe 4 : recherche de nouvelle physique dans les données astrophysiques.....	10
1.2 Instantané de la communauté et de ses activités	11
Employeurs et démographie.....	11
Sujets d'étude, longueurs d'onde observées et méthodologies.....	13
Observatoires et instruments utilisés.....	13
Focus sur les études de transitoires.....	15
Origine des financements.....	15
1.3. Le CS du PNHE	16
Membres au 1 ^{er} semestre 2024.....	16
Membres ayant récemment quittés le CS.....	16
De Programme National à Action Thématique.....	16
2. Bilan (2020-2024)	17
2.1 Résultats scientifiques marquants	17
Axe 1 : processus physiques dans l'environnement des objets compacts	17
Pesée d'un trou noir supermassif situé à 11 milliards d'années-lumière.....	17
Première image du trou noir au cœur de notre Galaxie.....	18
Fond d'ondes gravitationnelles au NanoHz.....	18
Premières observations en polarimétrie X d'objets compacts.....	19
Axe 2 : origine, production et transport des particules de HE (γ, ν et RC)	20
Un pulsar émet les rayonnements les plus énergétiques jamais observés.....	20
Émission diffuse au PeV dans le plan galactique	21
Détection de neutrinos astrophysiques galactiques de haute énergie.....	22
L'origine des rayons cosmiques est à chercher dans des superbulles galactiques.....	23
Axe 3 : origine, émission multi-messagers et évolution des phénomènes transitoires	24
Un cataclysme cosmique exceptionnel.....	24
Première détection d'un élément lourd à 52 protons dans une fusion d'étoiles.....	25
Axe 4 : recherche de nouvelle physique dans les données astrophysiques	27
La matière noire pour l'excès au GeV au centre galactique ?.....	27
Matière noire légère : une quête multi-longueur d'onde.....	28
2.2 Interfaces avec les PN, AS et GdR/IRN	28
Interfaces avec les autres PN.....	29
Interfaces avec les AS (Actions Spécifiques).....	30
Interfaces avec les GdR (Groupement de Recherche).....	31
Interfaces avec les IRN (« International Research Network »).....	31
2.3 Budget, appels à projet et animation scientifique du PNHE	32
Budget du PNHE et évolution.....	32
Évaluations des appels à projet.....	33
Types de projets financés dans les AàP.....	35
Actions d'animation menées par le CS (hors AàP).....	36
Autres activités du CS.....	37
2.4 Succès aux appels d'offre (hors PN) et distinctions	37
Autres appels d'offre (France et Europe).....	37

Médailles du CNRS.....	38
3. <i>Projet de renouvellement (2025-2029)</i>	39
3.1 Évolutions thématiques et instrumentales	39
Essor de l'astronomie multi-messagers et du ciel transitoire.....	39
Projets phares des prochaines années.....	40
Grands projets et besoins à plus long terme	43
Une astronomie numérique (stockage, simulations et IA).....	43
3.2 Enjeux sociétaux et positionnement du PNHE	45
Transition carbone et écologie.....	45
Inclusion/diversité/égalité.....	46
Télescopes et territoires.....	47
Astronomie participative.....	47
3.3 Analyse des forces, faiblesses, opportunités et menaces	48
Forces	48
Faiblesses.....	49
Opportunités	49
Menaces	49
3.4 Défis scientifiques et priorités instrumentales	50
Défis scientifiques.....	51
Priorités instrumentales	51
3.5 Perspectives de l'astronomie HE en France	54
Évolutions structurelles de l'INSU-AA : restons vigilants !	54
Réflexion sur les moyens d'observations disponibles et à venir	55
Actions pour la visibilité et la pérennité de la communauté HE	56
<i>Annexe A : Laboratoires des membres de la communauté PNHE</i>	58
<i>Annexe B : Liste ANR et financements Européens depuis 2021</i>	58
Projets ANR acceptés (depuis 2021).....	58
Financements Horizon Europe	59

1. L'astrophysique des HE : grandes questions et communauté

L'astronomie-astrophysique des hautes énergies (HE) est l'astronomie des phénomènes extrêmes de l'Univers. Le terme HE pourrait laisser penser qu'il s'agit seulement d'une astronomie des rayonnements de haute énergie (X et gamma), alors que les thématiques scientifiques abordées sont, par essence, multi-longueur d'onde (de la radio au gamma) et multi-messagers (photons et neutrinos, particules, ondes gravitationnelles). Ces thématiques se déclinent aussi dans un contexte multi-objets (trous noirs, étoiles à neutrons, supernovæ, etc.), multi-échelles (de la turbulence au milieu circumstellaire, interstellaire et même intra-amas), multi-physique (plasma, particules, nucléaire, astro et cosmo) et multi-théories (les candidats matière noire pouvant être testés incluant axions, WIMP, trous noirs primordiaux, etc.), ce qui conduit à un panel très large de travaux sur différentes échelles (tailles et distances) à travers tout l'Univers. On y retrouve la compréhension des processus physiques en jeu dans l'environnement des objets compacts (trous noirs stellaires et supermassifs, étoiles à neutrons, naines blanches), celle de l'origine et du transport des particules de haute énergie (photons, neutrinos et rayons cosmiques), de l'origine des phénomènes transitoires (sursauts gamma, supernovæ, ondes gravitationnelles pour les plus courants, mais aussi les émissions quasi-périodiques, les sursauts radio rapides ou les évènements de rupture par effet de marée) et toute nouvelle physique (en particulier la matière noire) que les données astrophysiques peuvent contraindre.

Toutes ces thématiques sont au cœur des priorités scientifiques mises en avant dans la « Roadmap » de l'astronomie européenne (Astronet, 2022-2035¹), montrant à quel point les HE sont couplées aux autres thématiques de l'astronomie, avec de très fortes rétroactions entre les différents processus physiques et entre les différentes échelles spatiales. Ces interactions permettent, par exemple, et sans être exhaustif, d'étudier le processus de coévolution entre un trou noir supermassif et sa galaxie hôte, de cerner les lois et mécanismes d'échelle entre trou noir stellaire et un trou noir supermassif, de sonder le couplage entre accrétion et éjection pour mieux appréhender l'évolution des systèmes binaires galactiques ou la croissance des galaxies, d'étudier l'impact des rayons cosmiques sur le milieu interstellaire, de comprendre les étapes finales de l'évolution stellaire en étudiant les évènements transitoires extrêmes tels que les supernovæ, les sursauts radio rapides ou les sursauts gamma.

1.1 Les grandes questions

Les grandes questions astrophysiques, auxquelles l'astrophysique des hautes énergies tentent de répondre, peuvent se classer suivant quatre grands axes développés ci-dessous.

Axe 1 : processus physiques en jeu dans l'environnement des objets compacts

Les objets compacts mettent en jeu des énergies considérables, que celles-ci résultent de phénomènes d'origine gravitationnelle (par exemple l'accrétion), de la rotation de l'objet compact (par exemple les pulsars) ou même d'un réservoir d'énergie magnétique (par exemple les magnétars). L'enjeu est de comprendre où et comment cette énergie est transportée (vents, jets, rayonnement) et dissipée (accélération de particules), et de sonder ainsi l'environnement proche et lointain de ces objets, afin de contraindre leur nature et la physique en jeu (relativité, physique nucléaire, physique des plasmas).

Notre compréhension des objets compacts a connu des évolutions majeures ces dernières années. Tout d'abord par la détection des ondes gravitationnelles (OG). Les observatoires

¹ https://www.astronet-eu.org/?page_id=521

LIGO-VIRGO-KAGRA (LVK) ont débuté leur 4^e campagne d'observations en mai 2023 avec une meilleure sensibilité des instruments et donc un volume d'exploration plus important. Afin d'améliorer au mieux sa sensibilité, VIRGO a prolongé sa phase de mise en service et rejoindra la quatrième série d'observations courant 2024. LVK est conçu pour détecter les OG provenant de la coalescence d'objets compacts comme des trous noirs stellaires ou des étoiles à neutrons. Le nombre de détections est de plusieurs dizaines maintenant, avec seulement deux coalescences trou noir-étoile à neutrons et une seule avec la détection de contreparties électromagnétiques (GW170817 en 2017), ouvrant néanmoins l'étude de ces objets d'un point de vue multi-messagers. Récemment, grâce aux expériences de « Pulsar Timing Array » à travers le monde — PTA-France à l'échelle nationale, EPTA à l'échelle européenne, qui, avec les consortia Nord-Américain (NANOGrav), Australien (PPTA), Indien (InPTA), Chinois (CPTA) et Sud-Africain (MeerKAT), forment l'IPTA (« International Pulsar Timing Array ») — il a été possible de détecter un fond stochastique d'OG dans la bande de fréquence des nano-Hz. Plusieurs origines de ces oscillations de basse fréquence de l'espace-temps sont possibles, mais la plus prometteuse serait l'existence de binaires de trous noirs supermassifs, de masse comprise entre des millions et des milliards de masses solaires et réparties dans tout l'Univers, qui produiraient ce signal durant leur déplacement l'un autour de l'autre.

Un autre résultat important sur cette thématique est l'imagerie, par l'EHT (« Event Horizon Telescope »), qui combine les observations de plusieurs observatoires radio autour du monde), des régions extrêmement proches de deux trous noirs supermassifs : celui au cœur de M87 et celui au centre de notre Voie Lactée (voir page 15). Ces images montrent l'émission radio produite dans l'environnement immédiat du trou noir et déformée par les effets de gravité. L'EHT a observé d'autres AGN, pour lesquels la taille projetée du trou noir était trop petite pour être imagée. Néanmoins, les observations ont pu détailler les jets de matière produits dans l'environnement proche.

La mission NICER (« Neutron Star Interior Composition ExploreR ») de la NASA, installée sur l'ISS permet de mesurer avec des précisions inégalées la masse et la taille d'étoile à neutrons, par l'étude de la déformation des points chauds présents à la surface de l'étoile et dont l'émission est fortement déformée par les effets de forte gravité à la surface de l'astre. Ces informations sur la masse et la taille permettent de mieux connaître l'équation d'état des pulsars de ce type, c'est-à-dire les lois physiques qui régissent la structure interne de ces astres extrêmes (pression, température, densité,...).

Le lancement du satellite de polarimétrie X, IXPE (« Imaging X-ray Polarimetry Explorer »), né d'une collaboration entre la NASA et l'ASI (Agence Spatiale Italienne), a également apporté de nouvelles contraintes sur les régions d'émission X dans les objets compacts comme les AGN, les binaires X ou les pulsars. L'avènement de microcalorimètres sensibles au rayonnement X, qui permettent d'obtenir une résolution spectrale de quelques eV (notamment entre 2 et 10 keV), soit un facteur au moins 20-40 fois meilleure que les CCD utilisés sur Chandra et XMM, va révolutionner notre connaissance des objets compacts. L'instrument Resolve à bord du satellite XRISM (« X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission »), lancé en 2023, a par exemple une résolution de ~7 eV et va fournir de nombreux nouveaux résultats, notamment sur la composante en réflexion ou sur les signatures de vents dans les AGN. (New)Athena, prévue pour fin 2030, sera une des missions majeures dans ce domaine.

Axe 2 : origine, production et transport des particules de HE (photons, neutrinos et RC)

Plus d'un siècle après sa découverte, l'origine du RC (au niveau galactique ou extragalactique) reste en partie mystérieuse. Des avancées significatives et de nouveaux questionnements ont néanmoins émergé, grâce à une couverture expérimentale qui n'a jamais été aussi grande et diversifiée. En effet, les instruments ACE-CRIS (« Cosmic Ray Isotope Spectrometer » sur

l'« Advanced Composition Explorer »), AMS-02 (« Alpha Magnetic Spectrometer »), ANTARES (« Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research »), CALET (« CALorimetric Electron Telescope »), DAMPE (« DARK Matter Particle Explorer »), Fermi-LAT (« Large Area Telescope »), HAWC (« High Altitude Water Cherenkov Experiment »), H.E.S.S. (« High Energy Stereoscopic System »), IceCube, ISS-CREAM (« Cosmic Ray Energetics and Mass » sur l'ISS), KM3NeT (« Cubic Kilometer Neutrino Telescope »), LHAASO (« Large High Altitude Air Shower Observatory »), l'Observatoire Pierre Auger, le « Telescope Array », Tibet ASy et Voyager couvrent une gamme d'énergie d'environ quatorze ordres de grandeur, avec des détecteurs gamma, neutrinos et particules chargées, au sol et dans l'espace. Nous pouvons aussi ajouter les ouvertures récentes de la fenêtre OG qui, par le biais de suivis optiques, a conduit à la surprenante découverte que la fusion d'étoiles à neutrons constituait l'un des canaux principaux de la synthèse des noyaux lourds ($Z > 30$).

La moisson de données sur le RC galactique chargé, qui se poursuit depuis une décennie du MeV ou PeV, a permis de mettre au jour de nombreuses brisures spectrales et de mesurer avec une précision inégalée les abondances des différentes espèces dans le RCG. Ces découvertes ont donné lieu à de nombreux travaux pour identifier les sources du RCG, mais aussi pour comprendre l'origine du transport diffusif (dans la Galaxie), possiblement connecté à des processus intermittents (récemment étudiés) au sein de la turbulence magnétique. Ces dernières années, des simulations numériques MHD toujours plus évoluées ont vu le jour, visant la modélisation de ces effets microscopiques pour étudier et quantifier, en particulier, l'impact du RC de basse énergie (MeV-GeV) sur la dynamique physico-chimique du gaz à diverses échelles (incluant la formation planétaire, stellaire, et galactique). Vers les plus hautes énergies, des évolutions spectrales autour de 1-10 TeV ont été mesurées par CALET et DAMPE, alors que les observatoires gamma ont découvert des halos autour des pulsars au TeV (associés à des poches de diffusion lente). Ces mesures mettent potentiellement en évidence des mécanismes de rétroaction entre le RC et la turbulence magnétique. De nombreuses sources ont d'ailleurs été observées au TeV dans le plan galactique par LHAASO, sources pouvant contribuer à tout ou partie de l'émission diffuse observée par Tibet ASy au-dessus de 100 TeV. Les neutrinos observés par IceCube ont été mis à profit pour comprendre si l'origine de l'émission diffuse était plutôt hadronique ou leptonique, puisqu'une forte corrélation est attendue entre les deux signaux dans le premier cas, et l'origine galactique a été étudiée par ANTARES. La recherche de sources du RC dans des Pévatrons (accélérateurs au PeV) est un autre challenge. Ces accélérateurs sont cherchés via les photons de HE produits dans les nuages moléculaires environnants. Si plusieurs candidats ont été mis au jour par H.E.S.S. et LHAASO, de nombreuses études multi-longueur-d'onde sont menées pour confirmer leur statut.

À plus haute énergie encore, la transition entre le RC d'origine galactique et extra-galactique reste toujours mal connue et mal caractérisée. L'évolution de la composition lors de cette transition est difficile à mesurer, avec toutefois un alourdissement au-delà de l'EeV. Les publications récentes des collaborations HAWC, ICE-Top, LHAASO et l'Observatoire Pierre Auger complètent aussi la couverture en énergie des mesures d'anisotropie, dont la complexité pourrait refléter des effets locaux liés aux champs et turbulence magnétique. In fine, les sources de ces particules extragalactiques restent elles-aussi mystérieuses, même si l'observation d'événements simultanés gamma/neutrinos (en provenance d'un blazar) ouvre de nouvelles perspectives.

Pour conclure sur cette thématique, les questions de l'origine, de l'accélération et du transport des RC sont intrinsèquement des questions d'astrophysique multi-longueur d'onde (de la radio aux gamma, via les émissions secondaires et interactions des électrons et noyaux avec leur milieu), multi-messagers (chargés, gamma et neutrino, voire OG, émis ou produits de manière plus ou moins corrélée), multi-échelle (microphysique de la turbulence, chocs et rétroaction avec le gaz, RC et rayonnement, champs magnétiques jusqu'aux échelles extra-galactiques),

multi-physique (plasma, physique des particules, nucléaire et astrophysique) et multi-objets (rémanents de supernovæ, pulsars, super-bulles, AGN, etc.). Cette thématique est extrêmement dynamique, avec de nombreux résultats expérimentaux stimulant un encore plus grand nombre d'études phénoménologiques et de simulations numériques. Cette dynamique n'est pas près de s'arrêter, avec la mise à niveau de l'observatoire Pierre Auger et le développement de GRAND (« Giant Radio Array for Neutrino Detection »), des missions JEM-EUSO (« Joint Exploratory Missions towards an Extreme Universe Space Observatory ») pour les plus hautes énergies, la mise en service progressive de CTA (« Cherenkov Telescope Array ») et le développement de SWGO (« Southern Wide-field Gamma-ray Observatory ») en gamma, et finalement le développement de IceCube-Gen2 et KM3NeT (qui dispose déjà d'environ 15% de ses lignes) pour les neutrinos.

Axe 3 : origine, émissions multi-messagers et évolution temporelle des phénomènes transitoires

Les phénomènes transitoires sont nombreux dans l'astrophysique des HE. Cette thématique est appelée à prendre de plus en plus d'ampleur avec le déploiement d'instruments dédiés à leurs détections. C'est notamment le cas de « Einstein Probe », mission Chinoise, lancée début 2024 et qui sera suivie par SVOM (« Space Variable Objects Monitor »), mission Franco-Chinoise, courant 2024. Cela concerne aussi le LSST (« Large Survey of Space and Time ») qui produira plusieurs millions d'alertes par nuit, nécessitant la mise en place de gestionnaires d'alertes (« brokers », comme le broker FINK développé en France) essentiels pour tirer le meilleur parti de cet instrument unique en son genre.

Les phénomènes transitoires les plus connus incluent les sursauts gamma (GRB) et les supernovæ. Les sursauts gamma sont connus depuis plus de 50 ans. On sait maintenant que les GRB se forment soit après l'effondrement d'une étoile massive (à l'origine des GRB longs, d'une durée supérieure à deux secondes) ou la fusion de deux objets compacts (GRB courts, normalement < 2 sec), mais plusieurs modèles existent sur les processus physiques exacts les produisant. Le destin explosif des étoiles est aussi un enjeu majeur pour la formation des objets compacts, pour les signatures de la première génération d'étoiles, l'enrichissement du milieu environnant, la physique de l'éjecta, et de nombreux autres aspects. L'étude de l'ensemble de ces phénomènes transitoires est donc cruciale.

Par ailleurs, plusieurs autres phénomènes transitoires ont été détectés ces dernières années. Les FRB (« Fast Radio Burst ») ont été découverts au milieu de la décennie 2000. Ce sont des signaux radio très courts (millisecondes) et très lumineux qui peuvent provenir des confins de l'Univers, et dont l'origine n'est encore pas connue. Plus de 4000 ont été détectés à ce jour, grâce notamment au radiotélescope canadien CHIME (« Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment »), avec plusieurs milliers de FRB se produisant quotidiennement sur l'ensemble du ciel. Certains FRB, dits « repeater », se sont reproduits à plusieurs reprises, suggérant des origines diverses et ouvrant la voie à des campagnes d'observations multi-longueur d'ondes. Plus récemment encore (première publication en 2019), ce sont des phénomènes de QPE (« Quasi-Periodic Emission ») qui ont été découverts, cette fois-ci en X. Ces sursauts durent environ une heure, et les éruptions individuelles sont espacées de quelques heures à quelques jours, de manière irrégulière. Ces signaux semblent provenir des régions proches du trou noir supermassif présent au centre des galaxies observées. La cause des QPE n'est pas encore connue, mais les principaux modèles impliquent une étoile partiellement déchirée par un trou noir supermassif, entrant en contact avec le disque d'accrétion alentour. Ce processus suggère qu'il existe un lien entre QPE et un autre type de phénomène transitoire, les TDE (« Tidal Disruption Events »), connus depuis les années 90 et détectés initialement également en X. Les TDE sont la signature de la dislocation d'une étoile par effet de marée lorsqu'elle passe dans le voisinage d'un trou noir supermassif. De récents TDE ont également montré des signatures de jets impliquant donc des processus

complexes d'accrétion-éjections, ainsi que de probables émissions neutrinos de HE qui pourront être étudiées avec KM3NeT.

Il est à noter que ces nouveaux phénomènes (FRB, QPE, TDE) ont été détectés initialement par hasard dans des données d'archives. Ce dernier aspect illustre toute la richesse de ces données et l'importance de la mise en place d'infrastructure comme l'Observatoire Virtuel² pour leur exploitation optimale. Notre compréhension des phénomènes transitoires passe aussi par des observations multi-longueur d'ondes mais aussi via d'autres messagers comme les OG ou la détection de particules comme les neutrinos : ces messagers fournissent en effet des signatures différentes des processus physiques et apportent ainsi de nouvelles informations, complémentaires à celles déduites des photons.

Axe 4 : recherche de nouvelle physique dans les données astrophysiques

Le modèle cosmologique standard nécessite la présence de matière noire pour environ un quart du contenu de l'Univers. Si cette matière noire est présente à toutes les échelles (locale, galaxies, amas de galaxie, Univers), sa nature reste évasive. Depuis plus de vingt ans, les WIMPs (« Weakly Interacting Massive Particles ») ont été l'un des candidats les plus étudiés, motivés par des extensions du modèle standard de physique des particules à l'échelle électrofaible. En effet, certains candidats ont la propriété de s'annihiler ou de se désintégrer, phénomènes s'accompagnant d'émissions spécifiques (RC, gamma, neutrinos). Cette recherche indirecte a obtenu récemment les meilleures contraintes sur ce type de candidats (i) via l'étude de possibles anomalies dans les flux de positrons (Voyager et CALET) et d'antiprotons (AMS-02) du RCG, ou (ii) via la mesure de flux gamma ou neutrino dans des cibles à fort contenu en matière noire (avec ANTARES, KM3NeT, IceCUBE, Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S., MAGIC et bientôt CTA), comme les galaxies naines sphéroïdes. Des limites plus que compétitives ont aussi été mises sur ces dernières cibles grâce à des observations radio (via l'émission synchrotron secondaire attendue des leptons issus de l'annihilation de matière noire). Le mystère reste néanmoins entier sur l'origine de l'excès au GeV observé par Fermi-LAT vers le centre galactique, qui reste très discuté : des programmes d'observation multi-longueur d'onde visant à identifier de potentielles sources astrophysiques sont mis en place pour répondre à cette question.

D'autres candidats/anomalies continuent d'être activement étudiés, comme la matière noire légère (sous le GeV) pour le signal à 511 keV vers le centre galactique mesuré par INTEGRAL/SPI (« INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory »), ou comme les neutrinos stériles pour la raie à 3.5 keV vue dans des données Chandra et XMM (« X-ray Multi-Mirror Mission ») — raie potentiellement reliée à une mauvaise modélisation du fond instrumental. Cependant, devant le manque de succès des recherches de WIMPs, conjugué aux contraintes toujours plus fortes mises sur ces modèles par les données du LHC (« Large Hadron Collider »), de nouveaux horizons sont explorés. En effet, les candidats matière noire couvrent potentiellement plus de cinquante ordres de grandeur en masse, allant des WIMP aux neutrinos stériles (pour ce qui est des candidats particules), des candidats de type axion (plus légers) ayant un comportement de type onde, sans oublier les trous noirs primordiaux. Presque tous les candidats peuvent être explorés par des voies en lien avec les thématiques du PNHE. Les axions peuvent être créés par conversion de photons thermiques dans les étoiles ou de photons HE issus des grands accélérateurs cosmiques. Les trous noirs primordiaux peuvent, quant à eux, laisser des traces dans le RC, dans les photons à différentes longueurs d'onde et/ou dans les événements OG. L'étude des phénomènes cosmiques de HE reste ainsi une voie majeure pour l'identification de la matière noire.

² <https://www.euro-vo.org/>

En résumé, ces dernières années ont vu la continuation des recherches de candidats WIMPs, pour profiter pleinement de la dernière génération d'instruments, mais de nouvelles voies ont été ouvertes, impliquant par exemple l'impact ou les signatures de la matière noire dans les environnements d'objets compacts. La recherche de nouvelle physique, incluant des tests de physique fondamentale, s'est aussi invitée ces dernières années dans les thématiques du PNHE, via l'étude des images de trous noirs avec l'EHT, les coalescences d'objets compacts avec LVK et via les études du fond diffus OG avec le PTA.

1.2 Instantané de la communauté et de ses activités

Cette section se base en grande partie sur les résultats d'un sondage auprès de la communauté PNHE, réalisé par le CS au printemps 2023 (en vue des journées du PNHE qui ont eu lieu à l'automne 2023). Ce sondage a permis en particulier d'avoir un *instantané* de la composition et intérêts scientifiques de la communauté, ainsi que de son évolution future. Notons qu'environ une centaine de personnes a répondu à ce sondage, comparé aux 250 personnes recensées dans la communauté PNHE (chiffre basé sur la liste de diffusion du PNHE mise à jour en avril 2024). Il est utile de garder en tête que les faibles fractions montrées dans certains graphiques qui suivent sont associées à des petits nombres, donc non forcément représentatifs (fortes fluctuations attendues d'une année sur l'autre).

Employeurs et démographie

La communauté HE regroupe des chercheur.e.s (et quelques ingénieur.e.s) réparti.e.s sur plusieurs instituts du CNRS (INSU, IN2P3, INP) ainsi que des chercheur.e.s du CEA. La Figure 1 à gauche montre qu'en grande majorité (~85%), la communauté se divise à part à peu près égale entre INSU et IN2P3, les ~15% restants venant du CEA (~13%) et de l'INP (~3%). La figure de droite, quant à elle, montre la répartition entre CNRS et universitaires plus finement : ainsi, la communauté PNHE est composée d'environ 1/3 d'enseignant.e.s-chercheur.e.s et de 2/3 de chercheur.e.s CNRS.

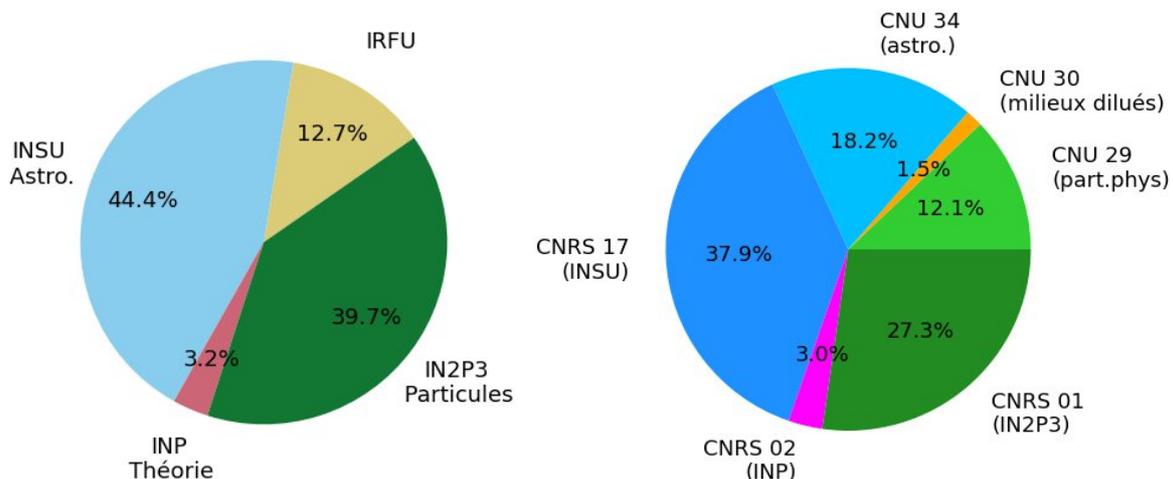


Figure 1. Institut d'origine de la communauté (à gauche) et découpage par section (CNRS et CNU) à droite.

La Figure 2 (à gauche) détaille la répartition des grades occupés au CNAP, CNRS et Université. Cette figure nous éclaire ainsi sur la démographie de la communauté, constituée de 12% de non-permanent.e.s, 26% de permanent.e.s en début/milieu de carrière (Astronomes adjoint.e.s, CR et MCF), 40% de permanent.e.s seniors (Astronomes, DR et Profs), ainsi que quelques émérités. Cette répartition est à mettre en regard de celle de la communauté HE dans son ensemble (non montrée sur le graphique). Nous avons ainsi, pour les doctorant.e.s, 11% dans la communauté vs 8% ayant répondu au questionnaire, 11% vs

5% pour les post-docs, 3% vs 1% pour les ingénieur.e.s, 9% vs 4% pour les émérites, et 66% vs 82% pour les permanent.e.s. Cette sous-représentation des non-permanent.e.s et émérites dans les réponses au questionnaire du PNHE trouve probablement son explication dans le fait que ces deux catégories pourraient se sentir moins légitimes (pour les premiers) ou moins concernées (pour les secondes) par cet exercice. La Figure 2 (à droite), quant à elle, donne une indication sur l'évolution future de la communauté : une grande majorité de la communauté continuera à travailler sur les thématiques HE, et son implication (en termes de FTE) devrait même augmenter, puisque deux fois plus de personnes déclarent vouloir augmenter leurs activités HE par rapport à celles qui veulent la diminuer.

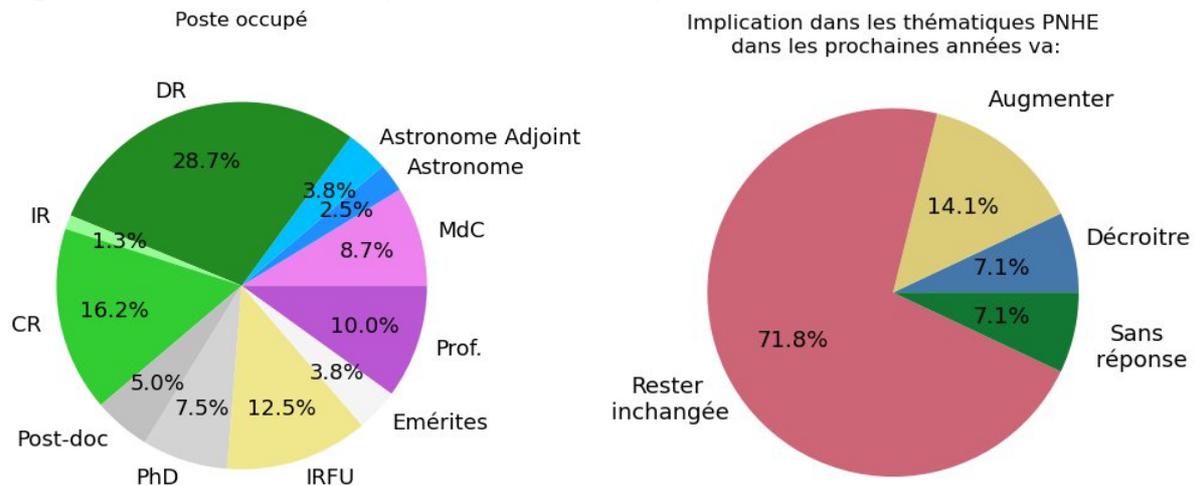
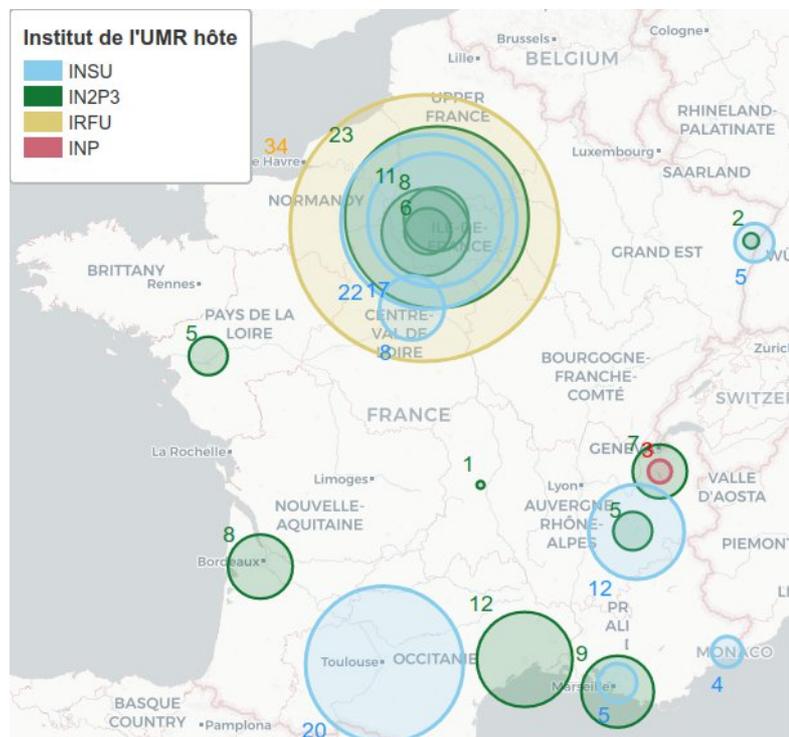


Figure 2. Pour les personnes ayant répondu au questionnaire, répartition par catégories de postes à gauche, et perspective d'implication dans les activités PNHE dans les prochaines années (à droite).

La Figure 3 montre la répartition géographique en nombre (indiqué en bord des cercles, et dont la taille est proportionnelle à ce nombre) et par institut (couleurs) des labos de la communauté HE (basée sur l'annuaire du PNHE mis à jour en avril 2024). On retrouve le très fort poids des laboratoires et observatoires INSU en région parisienne, ainsi que plusieurs laboratoires IN2P3, et la grosse contribution du CEA sur le plateau de Saclay. Nous retrouvons ensuite les observatoires ou laboratoires de Toulouse, Grenoble, Orléans, Strasbourg et Nice pour l'INSU. Les laboratoires IN2P3 sont disséminés sur plus de sites, avec des contributions au PNHE de Montpellier, de Marseille, Bordeaux, Annecy, Grenoble, Nantes et Strasbourg.



Sujets d'étude, longueurs d'onde observées et méthodologies

La Figure 4 montre le nombre total d'ETP (équivalent temps plein) mis par la communauté HE sur divers sujets traités au sein du PNHE. On retrouve, sans surprise et dans des proportions similaires aux précédentes années, les objets compacts (GRB, AGN, FRB), les aspects multi-messagers (neutrinos, X, gamma, OG), le RC et la matière noire. L'exception notable sont les OG qui, avec 13 ETP, prennent désormais une très grande place dans le panorama PNHE (ce qui n'était pas le cas lors de la précédente prospective).

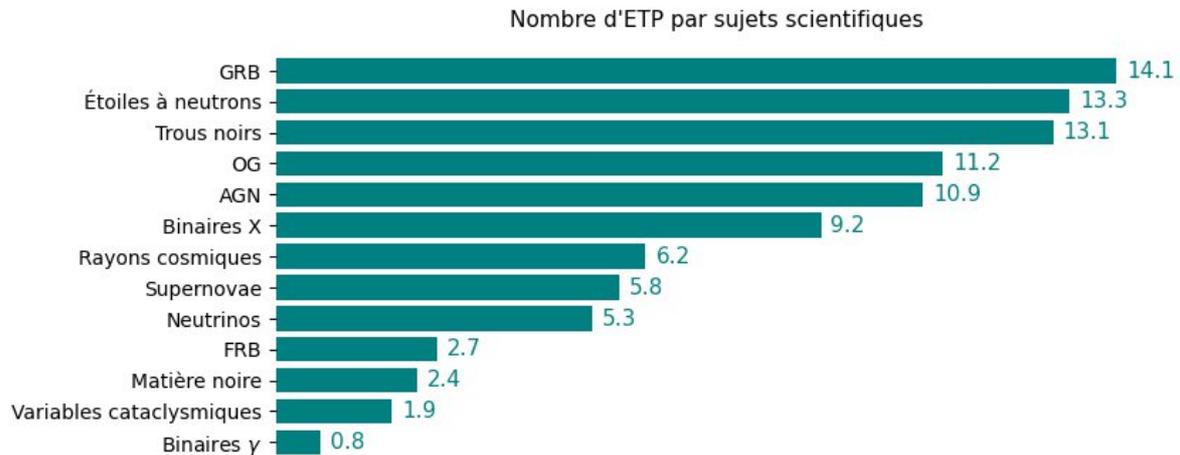


Figure 4. Nombre d'ETP (équivalent temps plein) déclarés par la communauté PNHE sur les sujets listés.

Pour comprendre comment ces objets sont observés et analysés, la Figure 5 (à gauche) rappelle que toutes les longueurs d'ondes sont utilisées pour mener des études HE. Par ailleurs, diverses méthodes sont mises en œuvre (figure de droite), couvrant l'instrumentation, l'observation, l'analyse de données et la modélisation/théorie. Le calcul haute performance et le « Big Data » font aussi leur entrée marquée de par le nombre d'utilisatrices et utilisateurs (43 au total).

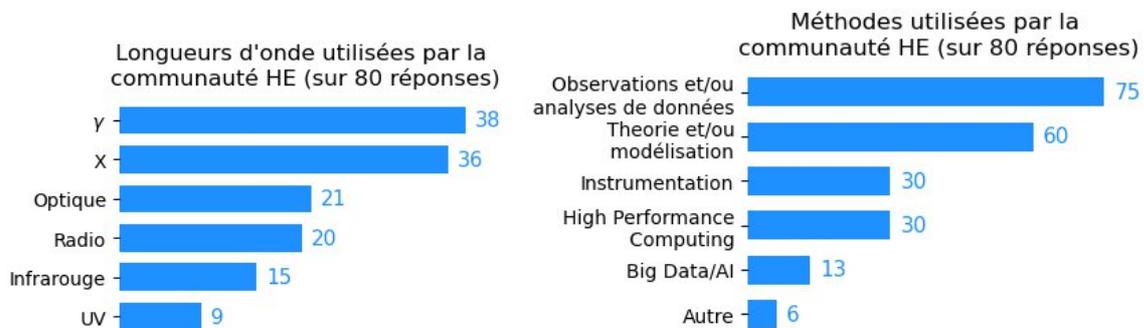


Figure 5. Longueurs d'onde (à gauche) et méthodes (à droite) utilisées par la communauté HE et nombre de personnes concernées (sur 80 personnes ayant répondu à ces deux questions).

Observatoires et instruments utilisés

De manière encore plus précise, la Figure 6 montre les instruments ou observatoires que la communauté a utilisés, ou a contribué à développer, ces cinq dernières années. Les observatoires X et γ , comme on l'a déjà dit, sont parmi les plus nombreux à être utilisés (FERMILAT, XMM, CTA, CHANDRA, Swift et INTEGRAL). Mais toutes les longueurs d'onde, du radio au visible, sont sollicitées. On remarque également que l'astrophysique HE se fait avec de nombreux instruments de l'ESO (FORS, GRAVITY, HAWKI, MUSE et XSHOOTER) qui jouent notamment un rôle majeur dans l'étude et le suivi des transitoires (par exemple via la

collaboration ENGRAVE). Et sans surprise des instruments comme CTA, SVOM, KM3NeT, Athena, LISA, etc. font évidemment partie des instruments pour lesquels la communauté HE participe au développement depuis plusieurs années.

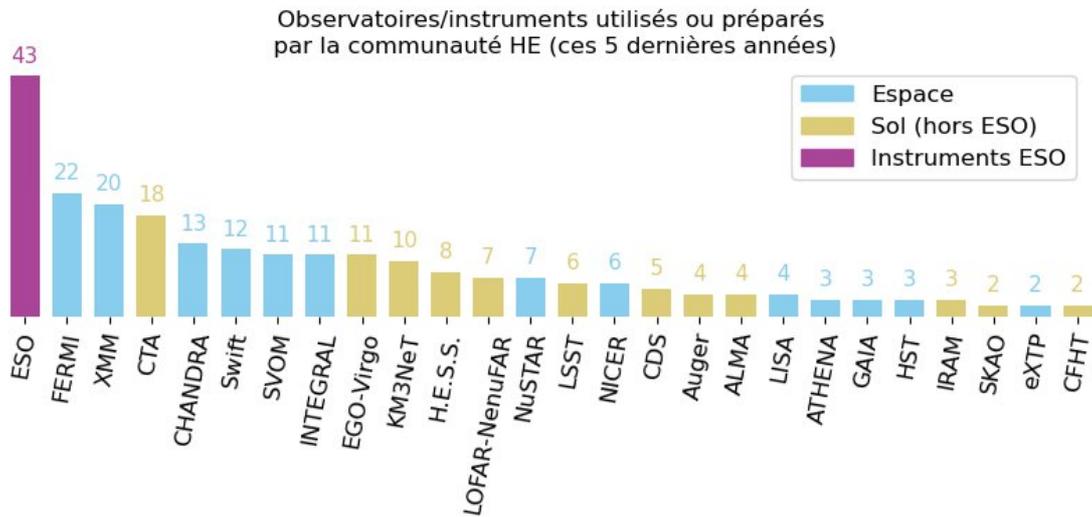


Figure 6. Nombre de personnes ayant utilisé ou participé à la préparation, ces cinq dernières années, des observatoires (ou instruments) au sol, dans l'espace, ou spécifiquement des instruments ESO.

La Figure 7, quant à elle, montre quels observatoires et instruments la communauté projette d'utiliser dans les cinq prochaines années. On retrouve sur le podium trois instruments phares de notre thématique (CTA, SVOM et ATHENA), puis les télescopes OG (LISA, LVK, ET) et une très grande diversité d'instruments couvrant l'ensemble des longueurs d'onde et messagers (incluant les neutrinos avec KM3NeT), ainsi que des télescopes optiques pour la physique des transitoires (par exemple LSST). Remarquons aussi que des instruments déjà en service depuis de nombreuses années (XMM, Fermi-LAT, etc.) vont continuer d'être utilisés par la communauté.

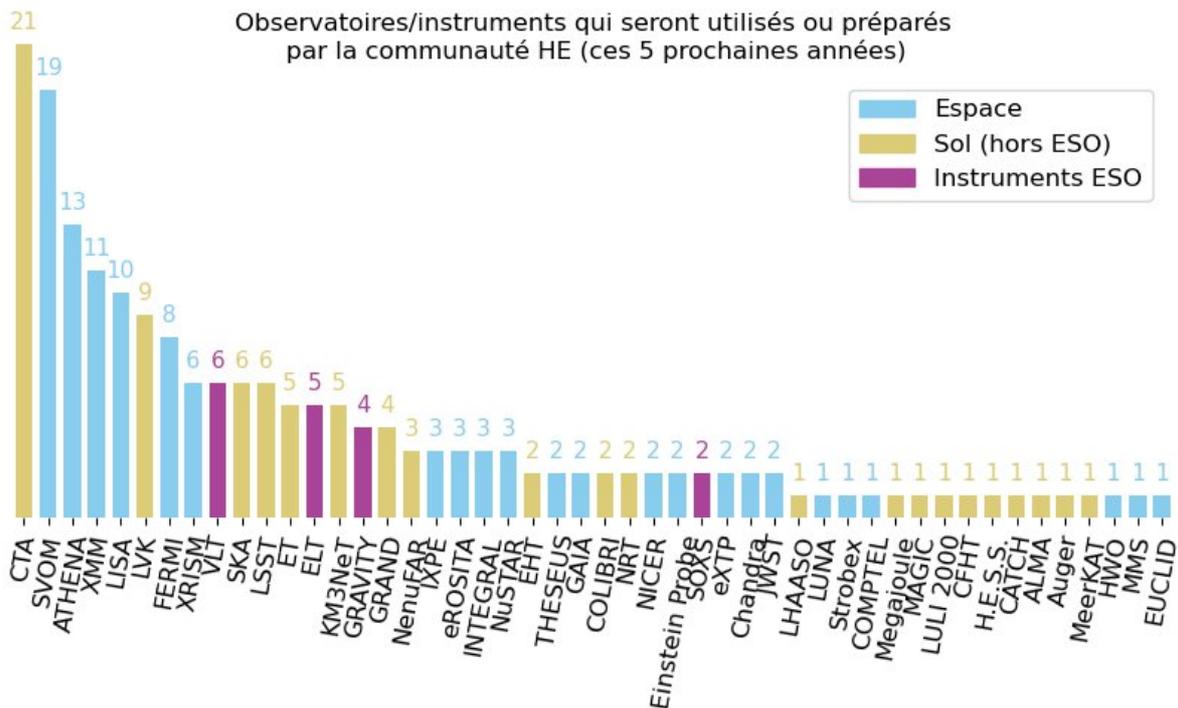


Figure 7. Nombre de personnes qui prévoient d'utiliser ou de préparer, dans les cinq prochaines années, des observatoires (ou instruments) au sol, dans l'espace, ou spécifiquement des observatoires/instruments ESO.

Focus sur les études de transitoires

Grâce à l'accroissement d'instruments couvrant une fraction croissante du ciel (ou observant de manière répétée les mêmes zones du ciel), les études menées avec le ciel transitoire monopolisent une fraction croissante de la communauté. La Figure 8, à gauche, indique quels instruments sont ou seront utilisés pour ce faire : on retrouve à la fois des télescopes, des réseaux de télescopes ou des réseaux d'alertes dédiés au suivi (ENGRAVE, GRANDMA, Colibri, etc.), mais aussi les instruments qui génèrent (ou généreront) un grand nombre d'alertes de par leur couverture du ciel (LVK, CTA, SVOM, KM3NeT, Rubin/LSST, ZTF, etc.). Il est intéressant de voir, dans la Figure 8 à droite, que la communauté française est impliquée à tous les stades de l'étude des alertes (production de ces alertes, suivi et analyse).

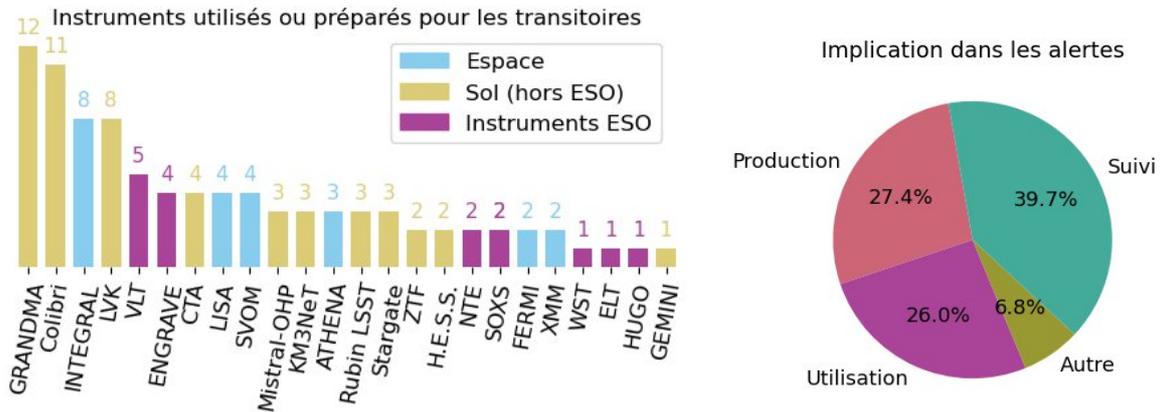


Figure 8. À gauche : instruments qui sont (ou seront) utilisés et préparés pour l'étude des transitoires. On retrouve à la fois des télescopes, des réseaux de télescopes ou des collaborations dédiés au suivi (GRANDMA, ENGRAVE, etc.). À droite : part des activités menées en lien avec les alertes.

Origine des financements

Après avoir regardé le volet scientifique, tournons-nous maintenant vers les aspects financiers. La Figure 9 indique que la source de financement qui a bénéficié au plus grand nombre de personnes dans la communauté HE (pour mener des activités HE) est le CNES (figure de droite). Le rôle du CNES est ainsi doublement important, via des financements dédiés à l'exploitation des instruments spatiaux, mais aussi via la contribution de l'ordre de 30% du CNES au budget du PNHE (voir plus bas). Les autres sources de financements majoritaires (en nombre), après le financement du PNHE proprement dit, sont les ANR, ERC et IN2P3, suivi de la CSAA et du PNCG (figure à gauche), puis de LabEx, d'autres PN et AS.

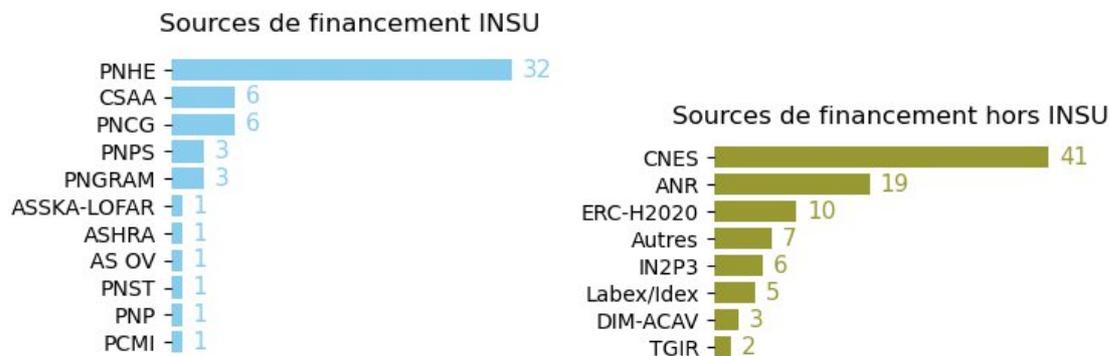


Figure 9. Sur les cinq dernières années, nombre de personnes ayant bénéficié d'un financement pour mener des activités HE. Nous avons séparé les financements liés à l'INSU (à gauche) et non liés à l'INSU (à droite).

1.3. Le CS du PNHE

Membres au 1^{er} semestre 2024

Le CS est composé de chercheuses et chercheurs de l'INSU, IN2P3, INP et CEA, dont les expertises couvrent les thématiques du PN. Le CS du PNHE se réunit au moins deux fois par an, avec une réunion en présentiel (et hybride) pour les évaluations scientifiques de l'appel d'offre (voir plus bas). La Table 1 donne la composition du CS au moment de l'écriture de ce rapport (1^{er} semestre 2024), avec le laboratoire (et l'institut) d'origine, l'année d'entrée au CS, et éventuellement les autres instances où les membres du CS siègent (dernière colonne).

Chercheur.euse	Laboratoire (Institut)	Année d'entrée au CS	Représentant le PNHE dans...
Francesca Calore	LAPTH (INP)	2018	—
Mickael Coriat	IRAP (INSU)	2018	CSD Obs. Nancay
Stefano Gabici	APC (INSU)	2021	—
Diego Götz	Dap/UMR AIM (IRFU)	2021	—
Lucas Guillemot	LPC2E (INSU)	2016	—
Astrid Lamberts	OCA (INSU)	2021	CS PNPS
Martin Lemoine	IAP (INSU)	2016	—
David Maurin (président CS depuis 2023)	LPSC (IN2P3)	2018	—
Jerôme Novak	LUTH (INSU)	2021	CS PNGRAM
Pierre-Olivier Petrucci (dir. PNHE depuis 2022)	IPAG (INSU)	2016	CS GdR OG
Thierry Pradier	IPHC (IN2P3)	2016	—
Fabian Schüssler	DPhP (IRFU)	2016	CS AS OV
Régis Terrier (président CS jusqu'en 2022)	APC (IN2P3)	2016	—

Table 1. Membres du CS PNHE au 1^{er} semestre 2024.

Membres ayant récemment quittés le CS

Ce bilan couvrant 2020-2024, nous listons aussi ci-après les personnes qui étaient membres du CS en 2020, mais qui l'ont quitté depuis :

- *Susanna Vergani (GEPI, INSU)* : directrice du PNHE jusqu'en 2022, remplacée par P.O. Petrucci suite à sa nomination comme déléguée scientifique auprès du Directeur Adjoint Scientifique Astronomie-Astrophysique.
- *Frédérique Marion (LAPP, IN2P3)* : membre du CS jusqu'au printemps 2023, suite à sa nomination comme « Deputy Spokesperson » de Virgo.

De Programme National à Action Thématique

Le CS actuel a mandat sur la période 2021-2025. Habituellement, le CS renouvelle une partie de ses membres en cours de mandat, afin d'assurer une meilleure fluidité et continuité dans son fonctionnement. Ainsi, une partie des membres actuels devait être remplacée à l'automne 2024 (à la fin de la prospective INSU). Cependant, le rôle et le périmètre des divers PN Astronomie-Astrophysique (AA) sont, au moment de l'écriture de ce document, en train d'être redéfini par l'INSU. Les PN actuels vont devenir des Actions Thématiques (AT) qui vont dépendre d'un PN Astronomie-Astrophysique qui chapeautera l'ensemble. Les CS

disparaîtront et seront remplacés par des Comités d'Expertises Scientifique (CES). Ce que seront les prérogatives de ces AT, ainsi que le nombre des membres des CES, n'est pas encore clair (voir la section 3.5). Pour cette raison et en attente de précisions sur la structure et le fonctionnement futur des AT et du PN-AA, la recherche de candidat.e.s pour les futurs du CES a été mise en suspens.

2. Bilan (2020-2024)

2.1 Résultats scientifiques marquants

De nombreux faits saillants issus de la communauté française HE ressortent sur la période 2020-2024. Nous en avons sélectionné quelques-uns pour chacun des quatre axes de recherche présentés dans la section 1.1.

Axe 1 : processus physiques dans l'environnement des objets compacts

Pesée d'un trou noir supermassif situé à 11 milliards d'années-lumière

Les trous noirs supermassifs au cœur des galaxies sont cruciaux dans l'évolution des galaxies. Ils peuvent également être à l'origine de nombreux phénomènes à haute énergie, tels que la production de jets superluminiques, ou l'émission des quasars, objets les plus brillants de l'Univers électromagnétique. Le lien avec la galaxie hôte repose essentiellement sur leur croissance conjointe, et la mesure de la masse du trou noir est primordiale.

Comme illustré sur la Figure 10, l'instrument GRAVITY a permis de mesurer précisément la masse de Sag A*, le trou noir au cœur de notre Voie Lactée³, ainsi que quelques autres trous noirs proches. Avec l'extension des capacités du VLTI pour GRAVITY+, il est désormais possible de sonder des cibles plus nombreuses, et plus faibles. En France, ce projet est développé au sein du LESIA, le CRAL, l'IPAG et le laboratoire Lagrange avec une forte implication du CNRS/Terre et Univers. L'objectif principal de GRAVITY+ est la mesure des masses de trous noirs supermassifs au cours de l'histoire cosmique. GRAVITY+ a permis la première mesure directe de la masse d'un trou noir alors que l'Univers n'avait que deux milliards d'années, et que la formation stellaire était à son pic. Le trou noir au sein de la galaxie SDSS J092034.17+065718.0 a une masse mesurée de 300 millions de fois celle de notre soleil. Alors que cette masse paraît énorme, elle est fait environ dix fois plus faible que prédite par

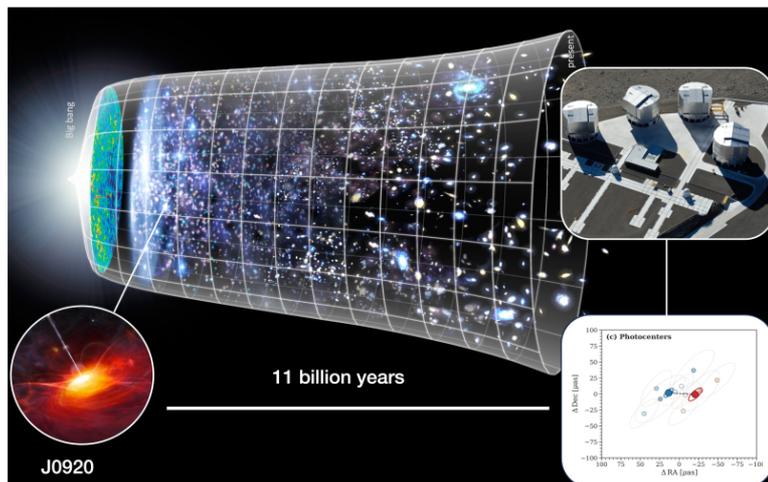


Figure 10. Illustration montrant la galaxie hôte du trou noir (en bas à gauche) et la signature spectro-astrométrique qui a permis à GRAVITY+, sur le VLTI (en haut à droite), de mesurer la masse de ce trou noir (en bas à droite). © Composition originale : T. Shimizu; Image « expansion de l'Univers » : NASA/WMAP team; illustration d'un quasar : ESO/ M. Kommesser; interféromètre VLTI : ESO/G. Hüdepohl.

³ <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/pesee-dun-trou-noir-super-massif-situe-11-milliards-dannees-lumiere>

les modèles.

Première image du trou noir au cœur de notre Galaxie

Après le premier exploit, en 2019⁴, du consortium EHT (« Event Horizon Telescope »), pour imager le trou noir supermassif au centre de la galaxie M87, le trou noir supermassif Sgr A* au centre de notre Galaxie a été à son tour observé et imagé en 2022⁵. Bien que ~2000 fois plus petit en masse que celui de M87, Sgr A* est aussi ~2000 fois plus proche, les deux trous noirs ayant donc une taille projetée sur le ciel similaire de quelques dizaines de micro-arcsecondes. Tout comme dans le cas de M87, l'image de Sgr A*, montrée dans la Figure 11, révèle une signature caractéristique : une région centrale sombre (appelée *ombre*) entourée d'une structure brillante en forme d'anneau. Cet anneau brillant résulte de l'émission d'un plasma chaud environnant le trou noir, les photons étant piégés par les effets gravitationnels intenses et tournant plusieurs fois autour du trou noir avant de pouvoir s'en échapper (formant ainsi ce qu'on appelle un *anneau de lumière*). Cet anneau brillant avait déjà été vu lors de l'observation de M87*. Il montrait également une asymétrie de brillance traçant potentiellement des zones intrinsèquement plus lumineuses. Une nouvelle observation de M87*, réalisée un an après celle publiée en 2019, a pu montrer une image très similaire, mais où l'asymétrie de brillance avait tourné d'une trentaine de degrés, témoignant du déplacement de la matière émettrice en orbite autour du trou noir.

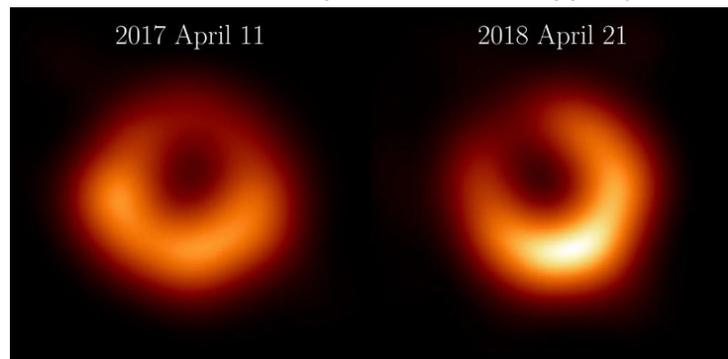


Figure 11. Images obtenues par l'EHT du trou noir M87* à un an d'intervalle. L'émission millimétrique de l'anneau de lumière a changé entre les deux images, possibles signatures de matière en rotation.

Soulignons que les télescopes NOEMA ainsi que le 30 mètres du Pico Veleta en Espagne, tous deux gérés par l'IRAM, participent à l'EHT et fournissent les plus longues lignes de base du réseau de télescopes impliqués dans l'observation. Ils contribuent ainsi à la haute résolution spatiale des images du EHT. Les contraintes polarimétriques également obtenues par l'EHT permettent aussi de sonder la distribution du champ magnétique très proche du trou noir.

Cette image EHT est à rapprocher des contraintes observationnelles obtenues par l'instrument GRAVITY du VLTI. En combinant les quatre télescopes de 8 m du VLT, dans l'IR cette fois, les astronomes peuvent aussi s'approcher au plus près de Sgr A*. Ils ont ainsi détecté les mouvements de la matière à l'origine des sursauts lumineux, régulièrement observés en IR mais aussi en X, produits par rayonnement synchrotron par les électrons non-thermiques chauffés dans l'environnement immédiat du trou noir. Le passage de GRAVITY à GRAVITY+, disponible dès 2024, par l'ajout de système d'optique adaptative et d'étoiles lasers aux quatre télescopes de 8 m du VLTI, ainsi que l'amélioration de l'ensemble de la chaîne de détection, permettra de s'approcher encore plus du trou noir central.

Fond d'ondes gravitationnelles au NanoHz

Comme illustré sur la Figure 12, les projets « Pulsar Timing Array » (PTAs) utilisent le suivi chronométrique à long terme d'ensembles de pulsars milliseconde répartis sur le ciel pour rechercher le passage d'OG de fréquences situées entre le nHz et le μ Hz. Les OG perturbent

⁴ <https://www.cnrs.fr/fr/presse/des-astronomes-reussissent-obtenir-la-premiere-image-dun-trou-noir>

⁵ <https://www.cnrs.fr/fr/presse/les-astronomes-revelent-la-premiere-image-du-trou-noir-au-coeur-de-notre-galaxie>

les géodésiques suivies par les impulsions radio depuis les pulsars jusqu'aux télescopes terrestres, induisant des variations temporelles dans leur chronométrie.

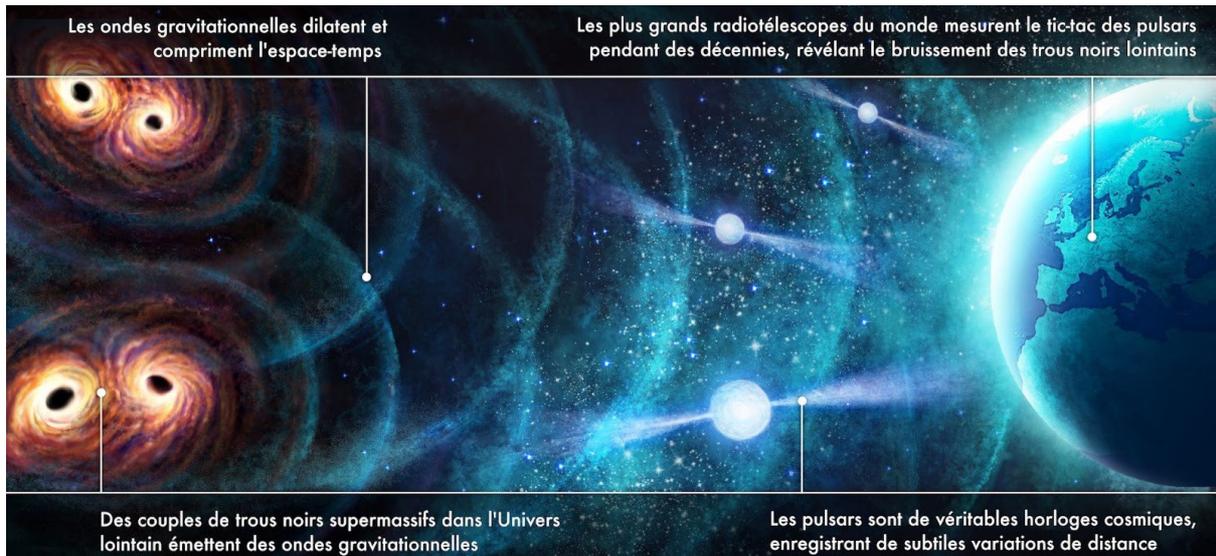


Figure 12. Illustration montrant la génération et détection du fond d'ondes gravitationnelles par les techniques de PTA. Adapté de © Danielle Futselaar / MPIfR.

En juin 2023, quatre collaborations, l'EPTA (collaboration européenne) rejointe par la collaboration indo-japonaise InPTA, NANOGrav (collaboration américaine), PPTA (australienne) et CPTA (chinoise) ont publié conjointement des articles présentant les toutes premières mesures statistiquement significatives d'un fond stochastique d'OG⁶. Les mesures effectuées par l'EPTA se sont appuyées sur des observations de 25 pulsars sur plus de deux décennies par différents radiotélescopes européens, dont le Grand Radiotélescope Décimétrique de Nançay, qui a fourni la plus grande partie des données du consortium. Les équipes françaises du LPC2E et de l'ORN (Observatoire Radioastronomique de Nançay) ont fortement contribué à la production des données, et celles de l'APC et du CEA à l'analyse statistique et l'interprétation du signal gravitationnel. Le projet a également fortement mobilisé le centre de calcul CC-IN2P3.

Le fond d'ondes détecté par les différentes collaborations à des niveaux de significativité s'échelonnant jusqu'à 4σ pourrait résulter de la superposition incohérente d'OG produites par un grand nombre de systèmes binaires de trous noirs supermassifs à des distances cosmologiques, de l'émission d'une ou plusieurs de ces sources dans l'Univers local, ou encore d'une combinaison de ces contributions. Les résultats publiés en 2023 attendent maintenant une confirmation robuste à une significativité de 5σ . Pour cela, les efforts actuels sont tournés vers l'analyse conjointe de l'ensemble des données des consortia, au sein de la collaboration internationale IPTA. À plus long terme, MeerKAT (« Karoo Array Telescope » situé dans le parc national Meerkat en Afrique du Sud) puis le SKA (« Square Kilometre Array ») fourniront les données de chronométrie plus précises encore.

Premières observations en polarimétrie X d'objets compacts

Les premières observations en polarimétrie X d'objets célestes ont été obtenues dans les années 60 avec l'instrument OSO. Le système de détection (diffraction de Bragg) nécessitait un détecteur volumineux et lourd. Il a fallu attendre une nouvelle technologie (GPD, pour « Gas Pixel Detector »), bien plus légère et adaptée au plan focal d'un télescope X, pour que la

⁶<https://www.cnrs.fr/fr/presse/les-pulsars-ouvrent-une-nouvelle-fenetre-pour-lobservation-des-ondes-gravitationnelles>

polarimétrie X devienne une observable pertinente. De tels détecteurs ont ainsi été embarqués dans la mission Italo-Étatsunienne IXPE (« Imaging X-ray Polarimetry Explorer ») lancée en 2021, qui observe principalement des objets compacts (AGN, Binaire X, pulsars) dont la luminosité X est suffisante pour obtenir un signal polarimétrique : de nombreux résultats ont été obtenus dès les premières observations sur le centre galactique⁷, les AGN⁸ et les binaires X⁹. Les chercheurs de l'Observatoire de Strasbourg et de l'IPAG ont fortement contribué à l'analyse et l'interprétation des données IXPE.

Ainsi, les mesures de degré et d'angle de polarisation de l'AGN radio silencieux NGC 4151 ont mis des contraintes fortes sur la géométrie du plasma rayonnant en X (les mesures de polarisation favorisant un plasma chaud situé au cœur du flot d'accrétion). Des résultats très similaires ont été obtenus dans le cas des binaires X comme Cyg X-1 ou Swift J1727.8-1613, suggérant une structure d'accrétion très proche dans ces différents types d'objets. La meilleure statistique fournie par les binaires X montre également une augmentation de la polarisation avec l'énergie, un résultat qu'aucun modèle n'arrive à expliquer pour le moment.

Dans le cas des AGN radio bruyants comme les blazars, l'émission est dominée dans toute la bande électromagnétique par l'émission du jet. Les jets résultant de processus magnétiques complexes, l'émission des blazars est une combinaison de rayonnement synchrotron et de diffusion Compton. La polarisation attendue, notamment en X, est élevée et est une signature directe de la distribution du champ magnétique dans le jet. IXPE a ainsi mis des contraintes très fortes sur les sites d'accélération de particules dans le jet : cette accélération se fait via des chocs. Lorsque les particules rencontrent l'onde de choc, elles gagnent de l'énergie et rayonnent en X. En s'éloignant de l'onde de choc, leur énergie diminue et le rayonnement pique ensuite dans le visible, puis l'infrarouge pour finir en radio (voir Figure 13).

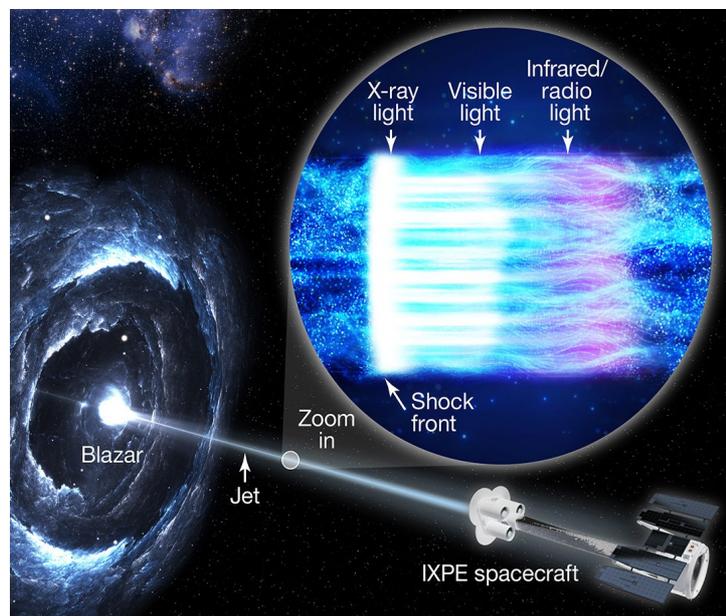


Figure 13. Vue d'artiste du processus d'accélération de particules dans un jet de Blazar pour rendre compte des observations multi-longueur d'ondes incluant les contraintes de polarimétrie X de IXPE. © NASA / Pablo Garcia.

Axe 2 : origine, production et transport des particules de HE (γ , ν et RC)

Un pulsar émet les rayonnements les plus énergétiques jamais observés

L'observatoire H.E.S.S. en Namibie a observé les rayons gamma les plus énergétiques jamais détectés dans un pulsar. Cette observation est difficilement conciliable avec la théorie de la

⁷ <https://www.cnrs.fr/fr/presse/detection-dun-echo-emis-par-le-trou-noir-de-notre-galaxie-il-y-200-ans>

⁸ <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/ixpe-perce-les-secrets-des-jets-de-matiere-en-provenance-des-trous-noirs-geants>

⁹ <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/lenvironnement-immediat-dun-trou-noir-revele-par-des-observations-en-polarimetrie-x>

production de tels rayons gamma pulsés, comme le rapporte la collaboration H.E.S.S. dans la revue « Nature Astronomy », dans une étude dirigée par une équipe de l'APC.

Les pulsars sont des sources de rayons gamma de haute énergie (100 MeV - 100 GeV). Le nombre de pulsars gamma connus dépasse les 300 dans le troisième catalogue de pulsars du Fermi-LAT, soit environ 10% de tous les pulsars connus. Une caractéristique frappante des pulsars gamma est l'universalité de leurs spectres d'émission, présentant tous des coupures marquées ou une cassure au-dessus de quelques GeV. Cela rendait ainsi les perspectives de détection dans la plage VHE (~100 GeV - 100 TeV) par des télescopes au sol plutôt improbables, bien que certains modèles aient prédit très tôt une composante au TeV. Les recherches précédentes d'une telle composante avaient abouti à des non-détections, à l'unique exception du pulsar associé à la nébuleuse du Crabe. Cependant, bien qu'atteignant environ 1 TeV, le spectre VHE du pulsar du Crabe pouvait difficilement être qualifié de composante indépendante en soi, étant donné qu'il présentait une émission très molle en continuation de son émission au GeV.

En analysant les observations très profondes du pulsar de Vela, la collaboration H.E.S.S. a mis en évidence une émission pulsée très dure en phase avec le pic P2 observé par Fermi-LAT. Le signal demeure statistiquement significatif au-delà de 20 TeV, une énergie 200 fois plus élevée que les photons les plus énergétiques mesurés jusqu'ici depuis cet objet. Cette observation remet en question les modèles développés pour expliquer l'émission de pulsars dans le domaine du GeV. Le modèle le plus courant considère des électrons accélérés le long des lignes de champ magnétique des cavités de la

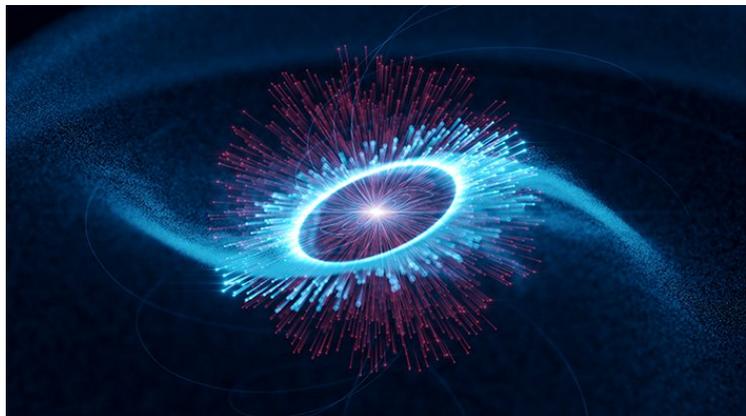


Figure 14. Vue d'artiste du pulsar de Vela, au centre, et sa magnétosphère, dont la périphérie est marquée par le cercle brillant. Les traces bleues émergeant vers l'extérieur illustrent les trajectoires des particules accélérées. Celles-ci produisent le rayonnement gamma le long des bras d'une spirale tournante, par collisions avec des photons infrarouges émis dans la magnétosphère (en rouge).
© Science Communication Lab for DESY.

magnétosphère émettant des photons gamma jusqu'à quelques GeV par rayonnement de courbure (voir Figure 14). Un scénario alternatif suppose, quant à lui, une accélération par reconnexion magnétique au-delà du cylindre de lumière, dans le plan équatorial du pulsar où se forme une feuille de courant (au croisement des lignes de champ magnétique de polarité opposée). Les difficultés surviennent lorsqu'on cherche à accélérer des particules atteignant des énergies allant jusqu'à 20 TeV. Dans le premier scénario, l'énergie maximale atteignable des particules est limitée par les pertes par rayonnement de courbure. Il faut alors postuler la présence de zones d'accélération bien au-delà du cylindre de lumière. Dans le second scénario, l'énergie maximale des particules est également limitée et nécessite de fait que les particules les plus énergétiques s'échappent des zones où elles rayonnent, ou que leur énergie soit boostée par un effet Doppler lié au mouvement d'ensemble des particules. Cette découverte ouvre une nouvelle fenêtre sur l'étude des pulsars au-delà de la dizaine de TeV pour des instruments comme CTA ou LHAASO.

Émission diffuse au PeV dans le plan galactique

L'instrument LHAASO (« Large High Altitude Air Shower Observatory ») est un détecteur de rayons gamma situé en Chine. La collecte de données a commencé en 2019, alors que le réseau des détecteurs n'était toujours pas terminé. Depuis 2021, LHAASO est complet et

observe en continu le ciel dans la bande d'énergie allant de 100 GeV à 1 PeV, ouvrant ainsi la fenêtre des rayons gamma de ultra-haute énergie (0,1 - 1 PeV). Il s'agit du premier instrument de ce type suffisamment sensible pour détecter des sources astrophysiques dans ce domaine énergétique.

L'une des découvertes les plus marquantes de LHAASO est la détection de l'émission diffuse de rayons gamma du plan Galactique aux énergies du PeV¹⁰ (voir Figure 15). C'est un résultat important car cela peut permettre de déterminer l'uniformité (ou non) spatiale de la distribution des RC au PeV. Plus important encore, ces inhomogénéités pourraient nous aider à révéler la nature des sources du RC au PeV, et à ainsi étudier les accélérateurs de particules galactiques les plus extrêmes.

Très récemment, en 2022, un petit groupe de scientifiques français a rejoint LHAASO, et a participé activement au groupe de travail sur l'émission diffuse au PeV. La participation de scientifiques français à LHAASO est financée par diverses subventions, et LHAASO est récemment devenu un master projet de l'IN2P3. Il conviendrait de continuer de soutenir et d'impliquer la communauté HE française dans cet instrument de pointe.

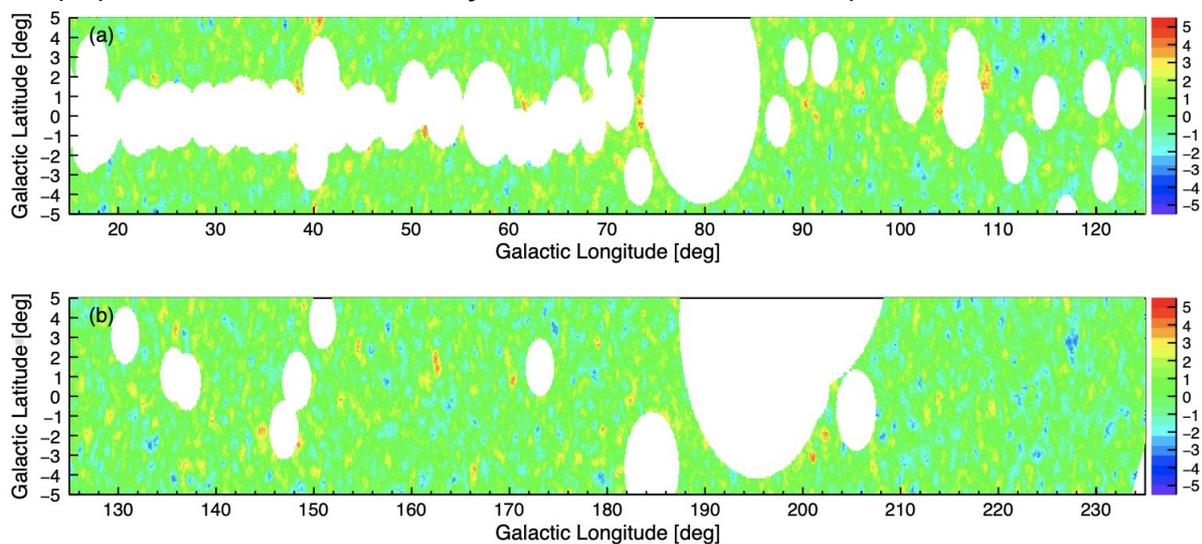


Figure 15. Émission gamma diffuse (les contributions de type « point source » ont été enlevées) mesurée par LHAASO dans le plan galactique, de 10 TeV (en haut) à 1 PeV (en bas). © Collaboration LHAASO.

Détection de neutrinos astrophysiques galactiques de haute énergie

Après l'annonce de la découverte d'une source extragalactique proche de neutrinos de haute énergie¹¹, NGC1068, la collaboration IceCube a annoncé en Juin 2023 la détection de neutrinos de haute énergie émis par notre Galaxie¹², en particulier dans le plan galactique, en utilisant dix années de prise de données (du télescope situé en Antarctique). L'interaction du RCG (protons ou noyaux) produits dans la Galaxie avec du gaz et des poussières, produisent des gamma de HE et des neutrinos. La Voie Lactée ayant déjà été observée en gamma, il était donc attendu qu'elle soit aussi une source de neutrinos de haute énergie. Cette observation vient directement confirmer ce que nous connaissons de la Galaxie et des sources de RC. Les localisations de ces neutrinos, détectés entre 500 GeV et quelques PeV, ont été comparées à des cartes d'émissions attendues calculées à partir des émissions gamma, en

¹⁰ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.151001>

¹¹ <https://icecube.wisc.edu/news/press-releases/2022/11/icecube-neutrinos-give-us-first-glimpse-into-the-inner-depths-of-an-active-galaxy/>

¹² <https://icecube.wisc.edu/news/press-releases/2023/06/our-galaxy-seen-through-a-new-lens-neutrinos-detected-by-icecube/>

particulier de Fermi-LAT (voir Figure 16). Le flux total dérivé du spectre obtenu est cinq fois supérieur au flux attendu, différence qui pourrait en particulier s'expliquer par la présence de sources de neutrinos non résolues. Ce flux de neutrinos galactiques contribue à hauteur de 6% à 13% du flux total de neutrinos astrophysiques à 30 TeV. Ces résultats constituent des avancées majeures dans la compréhension de l'origine des RCG.

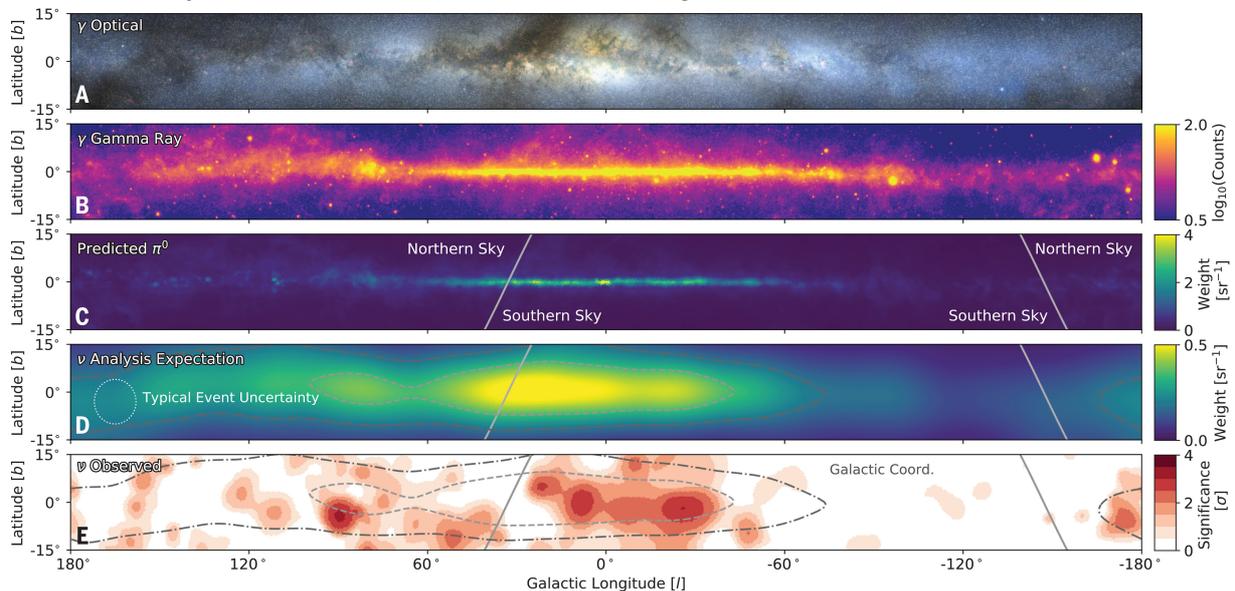


Figure 16. Signal dans le plan de la Galaxie pour différentes longueurs d'onde et différents messagers : (A) image en optique (© A. Mellinger), (B) flux intégré en gamma ($E > 1\text{ GeV}$) de Fermi-LAT, (C) flux prédit de π^0 issu de l'interaction du RCG et du gaz, (D) flux attendu de neutrino et (E) flux observé de neutrinos. © Montage proposé par la collaboration IceCube.

Il faut souligner qu'un indice d'une telle émission galactique avait été rapportée peu de temps avant par la collaboration ANTARES¹³, à laquelle a contribué la communauté PNHE. Bien que de taille réduite, ANTARES était particulièrement adapté pour les recherches de neutrinos galactiques, grâce à sa localisation dans l'hémisphère Nord (d'où une moindre contamination en bruit de fond), et à sa meilleure résolution angulaire. Avec sa position privilégiée pour observer le plan galactique et une encore meilleure résolution angulaire, KM3NeT (en cours de construction) apportera de nouvelles contraintes sur ces émissions.

L'origine des rayons cosmiques est à chercher dans des superbulles galactiques

Plusieurs résultats récents suggèrent que les superbulles galactiques, façonnées par les vents d'étoiles massives, jouent un rôle majeur dans la genèse du rayonnement cosmique, et ce jusqu'au delà du *genou* (10^{15} eV).

D'une part, une équipe française emmenée par un chercheur de l'IJCLab a récemment rassemblé un grand jeu de données pour élaborer un scénario cohérent de l'origine des RCG¹⁴ ($< 10^{15}$ eV). Leur travail s'appuie sur l'analyse de la composition chimique du RC extraite de données AMS-02, Voyager 1 et SuperTIGER (« Trans-Iron Galactic Element Recorder »), pour contraindre les propriétés du gaz interstellaire là où les RC sont accélérés par le passage d'une onde de choc de supernova. Cette modélisation repose notamment sur l'idée pionnière développée en 1997 par un chercheur du CEA (en collaboration un chercheur irlandais et un américain), qui attribue cette composition à une accélération préférentielle des éléments

¹³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026932300285X?via%3DiHub>

¹⁴ <https://www.iledefrance-gif.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/lorigine-des-rayons-cosmiques-est-chercher-dans-des-superbulles-galactiques>

contenus dans les grains de poussières et de ceux à grand rapport masse/charge. L'analyse, qui tient compte de ces effets et de leurs dépendances en fonction des phases du milieu interstellaire permet alors d'expliquer la composition mesurée du RC si l'essentiel des RC sont accélérés dans une phase chaude, caractéristique des milieux de superbulles galactiques. Ce travail suggère en outre que la surabondance relative de l'élément ^{22}Ne traduit une contribution des vents d'étoiles de type Wolf-Rayet.

D'autre part, l'observatoire LHAASO a récemment rapporté la détection de photons d'énergie de l'ordre du PeV en direction de la région de formation stellaire Cygnus-X (comme montré dans la Figure 17) sur une surface d'environ 100 deg^2 . Les zones de forte intensité se corrèlent avec la position de nuages moléculaires massifs, ce qui indique que les photons ont une origine hadronique (collisions protons-protons), plutôt que leptoniques, donc que cette association comporte un ou plusieurs PeVatrons accélérant des protons jusqu'à des énergies supérieures au *genou* du RC¹⁵.



Figure 17. Montage composite de la région de formation stellaire Cygnus OB2, idéale pour l'accélération de RC de haute énergie. © NASA/CXC/SAO/Drake et al (X), Univ. Hertfordshire/INT/IPHAS (H-alpha), NASA/JPL-Caltech/Spitzer (Infrared).

Ces résultats sont accompagnés d'autres travaux s'intéressant à un mécanisme collectif, dans lequel l'accélération a lieu autour du choc terminal d'un vent global poussé par l'addition des vents des étoiles massives. Les superbulles reviennent donc sur le devant de la scène, en candidats sérieux à l'origine des RC de haute, voire très haute énergie.

Axe 3 : origine, émission multi-messagers et évolution des phénomènes transitoires

Un cataclysme cosmique exceptionnel

Le 9 octobre 2022 à 13h16'59.99" UTC, un sursaut gamma long de 600 s a déclenché la presque totalité des expériences X et gamma en vol, saturant les plus sensibles d'entre elles. Une campagne multi-longueur d'ondes de suivi depuis le sol et l'espace a été déclenchée, ce qui a donné une énorme quantité de données à exploiter : GRB 221009A, surnommé le BOAT (« Brightest Of All Time »), est parmi les sursauts gamma cosmiques les plus proches et lumineux jamais détectés. Un sursaut d'une telle luminosité est attendu une fois par siècle, voire par millénaire. Cet événement est donc un parfait laboratoire pour tester les limites de la physique extrême.

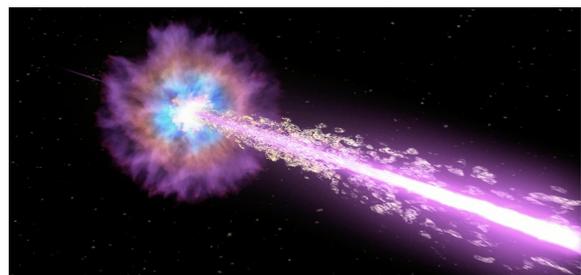


Figure 18. Vue d'artiste du jet de particules à l'origine de GRB 221009A. © Nasa / Swift / Cruz de Wilde.

Après six mois d'analyse des données, de nombreux articles scientifiques sont parus et un point presse international a été organisé par les agences spatiales NASA, ESA et JAXA pour faire le point sur les premières leçons de cet événement exceptionnel¹⁶ (voir Figure 18).

¹⁵ <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00574-y>

¹⁶ <https://lejournal.cnrs.fr/articles/un-cataclysme-cosmique-exceptionnel>

Premièrement, l'anti-coïncidence du spectromètre SPI a été l'un des rares instruments à pouvoir mesurer l'émission prompt de GRB221009A sans saturer. Ceci a permis de reconstruire la vraie évolution temporelle de la source, nécessaire pour la détermination de son énergétique réelle. Deuxièmement, l'émission rémanente de GRB221009A a été observée par IBIS à bord d'INTEGRAL dans les rayons X durs (au-delà de 15 keV), et en polarimétrie dans les rayons X mous avec IXPE, ce qui est une première. Cette émission rémanente a également été observée de façon plus traditionnelle dans les bandes UV/optiques/infrarouge. Rappelons que l'émission rémanente des GRB naît de l'interaction entre un jet ultra-relativiste, émis par le moteur centrale du sursaut (un trou noir ou un magnétar) et la matière inter-stellaire environnante. Les électrons accélérés par le choc sont responsables de l'émission synchrotron observée des X jusqu'à la radio. Ces modèles traditionnels n'arrivent cependant pas à expliquer les observations du BOAT, et une absorption locale supplémentaire, probablement due à la galaxie hôte, est nécessaire. L'évolution spectrale et temporelle ont montré également une divergence par rapport aux modèles utilisés jusqu'à présent, nécessitant leur complexification en termes (par exemple) de structure du jet relativiste. Ce type d'événement permet aussi de pousser dans leurs retranchements les modèles actuels qui associent les GRB aux explosions d'étoiles massives. Cependant, malgré la luminosité à haute énergies, les observations faites par le JWST dans infrarouge proche n'ont pas décelé de Supernova associée à GRB221009A qui, si elle devait exister, serait significativement plus faible que l'hypernova associée à GRB980425 (SN1998bw) ; cette dernière est à la base du paradigme actuel dans ce champ de recherche.

Les contributions de la communauté française (sur les nombreux articles publiés) ont été nombreuses et significatives sur l'ensemble des messagers étudiés : des chercheurs du CEA pour les données INTEGRAL, des chercheurs de l'INSU pour IXPE, de l'INSU et de l'INSIS pour les données ESO/VLT, INSU, INSIS et CEA pour JWST et HST. Notons finalement que la luminosité de cet objet a permis également d'impliquer des réseaux de télescopes qui incluent des astronomes amateurs (voir la section [Astronomie participative](#)) à travers le réseau GRANDMA, ce qui a conduit aussi à un article impliquant des chercheur.e.s de l'INSIS, INSU, IN2P3 et CEA. Notons enfin que la communauté IN2P3 française a aussi été impliquée à travers les recherches de contrepartie neutrinos avec les télescopes KM3NeT.

Première détection d'un élément lourd à 52 protons dans une fusion d'étoiles

Une équipe internationale d'astronomes, incluant trois scientifiques de l'Observatoire de Paris-PSL, a détecté la présence de Tellure (voir Figure 19), un élément lourd avec 52 protons, suite à la fusion de deux étoiles à neutrons¹⁷ (cette étude a donné lieu à un article dans Nature). Cet événement, identifié sous le nom de GRB 230307A, a été observé à l'aide d'une combinaison de télescopes terrestres et spatiaux, le classant parmi les sursauts gamma les plus brillants jamais enregistrés. GRB 230307A se distingue non seulement par sa luminosité, environ 1 000 fois supérieure à celle d'un sursaut gamma classique observé par Fermi, mais aussi par sa durée de 200 secondes, le plaçant dans la

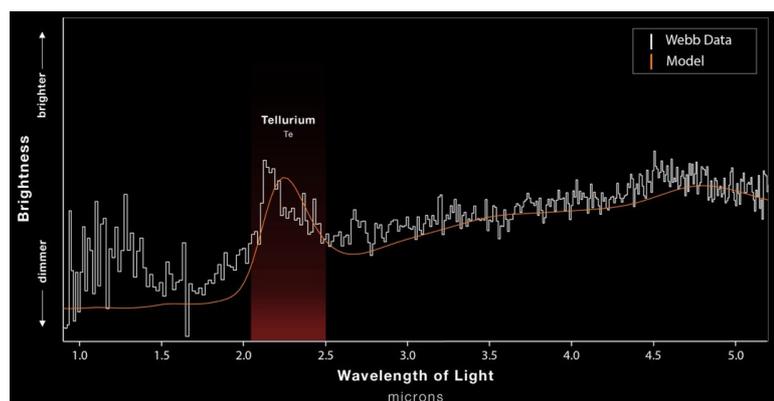


Figure 19. Comparaison des données spectrales de la kilonova du GRB230307A observées par le télescope spatial James Webb avec un modèle théorique. © Webb Space Telescope.

¹⁷ <https://www.observatoiredeparis.psl.eu/first-detection-of-a-52.html>

catégorie des sursauts gamma de longue durée. Les données recueillies, notamment grâce au télescope James Webb, ont montré une émission compatible avec une kilonova.

Il est important de noter que, traditionnellement, on s'attend à ce que l'émission d'une kilonova soit associée à la fusion de deux étoiles à neutrons, ce qui devrait donner lieu à un sursaut gamma court et non à un sursaut gamma long comme observé dans le cas de GRB 230307A. Les sursauts courts, généralement définis par une durée de moins de deux secondes, sont pensés pour résulter directement de la fusion d'étoiles à neutrons, tandis que les sursauts longs sont traditionnellement associés à l'effondrement d'étoiles massives. Cette observation remet donc en question notre compréhension des mécanismes sous-jacents aux sursauts gamma et suggère que les fusions d'étoiles à neutrons peuvent, dans certaines conditions, produire des sursauts gamma de longue durée. Cette découverte exceptionnelle de GRB 230307A, avec sa durée inhabituellement longue pour un événement lié à une fusion d'étoiles à neutrons, souligne la complexité des phénomènes astrophysiques et la nécessité de réviser potentiellement certains aspects de nos modèles théoriques actuels.

Les observations ont aussi démontré la présence de raies spectrales larges indiquant que le matériau était éjecté à grande vitesse, avec une signature claire de la présence de tellure et d'autres éléments lourds dans les matériaux éjectés. Cette découverte conforte l'hypothèse selon laquelle les fusions d'étoiles à neutrons sont une source principale de production de certains des éléments les plus lourds de l'Univers.

La fusion de deux étoiles à neutrons ayant provoqué la kilonova a été localisée dans une galaxie spirale située à environ 120000 années lumières. Le système des deux étoiles à neutrons a été expulsé de leur galaxie d'origine et a parcouru une distance équivalente au diamètre de la Voie lactée, avant de fusionner plusieurs centaines de millions d'années plus tard, pour former GRB230307A. Cette découverte ouvre la voie à de futures recherches sur les sursauts gamma et les kilonovae, facilitées par la combinaison de télescopes spatiaux et terrestres ainsi que par les détecteurs d'OG. La mission spatiale sino-française SVOM, prévue pour le printemps 2024, enrichira encore les moyens disponibles pour la détection, localisation et étude des sursauts gamma.

Ondes gravitationnelles lorsqu'une étoile à neutrons rencontre un trou noir

Les premières détections d'OG par la collaboration LVK ont concerné les binaires de trous noirs (en 2015 et plus tard) et d'étoiles à neutrons (en 2017 et 2019). Les systèmes constitués d'un astre de chaque type (une étoile à neutrons et un trou noir) ont été absents des détections jusqu'au début de l'année 2020, lors de la seconde partie de la phase d'acquisition O3 de la collaboration (voir Figure 20). Deux signaux en provenance de tels systèmes mixtes ont été alors observés à dix jours d'intervalle par les détecteurs LIGO et Virgo¹⁸, respectivement avec des masses de 8,9 et 1,9 masses solaires le 5 janvier, et 5,7 et 1,5 masses solaires le 15 janvier.



Figure 20. Vision d'artiste d'une fusion trou noir / étoile à neutrons. © Carl Knox, OzGrav – Swinburn University.

¹⁸<https://www.iledefrance-gif.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/trous-noirs-et-etoiles-neutrons-la-derniere-danse-de-couples-mixtes>

Ces systèmes peuvent a priori émettre une contrepartie en ondes électromagnétiques, mais dans les cas ci-dessus, ils étaient situés trop loin (autour de 300 Mpc) et les rapports de masses étaient défavorables à l'observation multi-messagers. Le scénario physique est alors que l'étoile à neutrons a été absorbée directement par le trou noir dans les deux cas, sans former de disque d'accrétion qui aurait émis du rayonnement électromagnétique. La découverte de tels systèmes était recherchée depuis longtemps, en particulier par le biais d'observations de pulsars en systèmes binaire avec un trou noir, mais sans succès. C'est donc une découverte très importante pour la physique des astres compacts et de leurs canaux de formation, ainsi que la confirmation de prédictions astrophysiques sur les populations stellaires.

L'instrument européen Virgo, impliquant de nombreuses équipes françaises a contribué à ces résultats, ainsi que les équipes développant les chaînes d'analyse de données et menant à bien l'interprétation scientifique. La rédaction de l'article final a été menée par une chercheuse de l'Observatoire de la Côte d'Azur.

Axe 4 : recherche de nouvelle physique dans les données astrophysiques

La matière noire pour l'excès au GeV au centre galactique ?

Depuis 2009, plusieurs observations du télescope Fermi-LAT ont mis en évidence un excès de rayons gamma (« Fermi GeV excess ») en provenance du bulbe galactique, avec une significativité supérieure à 10σ aux énergies du GeV. L'émission gamma est plus intense que celle prédite par les modèles standards d'émission provenant du milieu interstellaire ou de populations non résolues connues. La nature de cet excès est l'une des grandes questions ouvertes dans le domaine de l'astrophysique des rayons gamma de haute énergie, du fait qu'elle pourrait être une signature de l'annihilation de particules de matière noire.

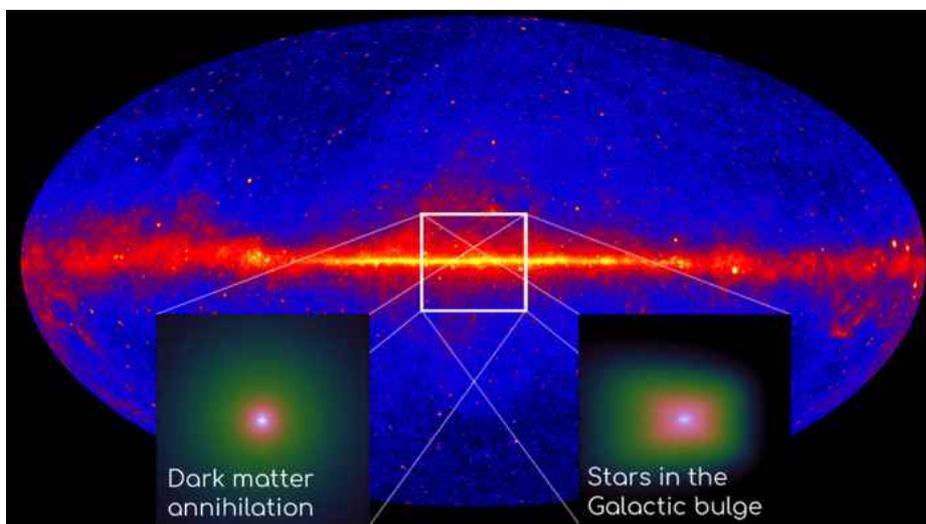


Figure 21. Émission gamma observée dans le disque galactique. Le cadre blanc indique le bulbe galactique où l'excès est observé. Les encarts montrent les profils spatiaux attendus de cet excès s'ils venaient de la matière noire (à gauche) ou des étoiles (à droite). Les équipes de recherches ont pu montrer que ce second profil correspondait mieux aux données que le profil matière noire. © Delta-ITP.

Quelle est la nature de cette anomalie ? Actuellement, aucune interprétation n'est clairement prouvée ou fermement exclue. L'émission cumulée de sources, rayonnant séparément une émission gamma trop faible pour être détectée individuellement, pourrait être à l'origine d'un tel excès. Récemment, plusieurs analyses indépendantes ont corroboré l'hypothèse selon laquelle l'excès au GeV proviendrait principalement de ces sources ponctuelles discrètes distribuées dans le bulbe galactique comme les étoiles les plus anciennes¹⁹. Une preuve forte à l'appui d'une population de sources très faibles de rayons gamma vient de l'analyse de

¹⁹ <https://www.d-itp.nl/shared-content/news/press-releases/2018/08/2018-aug-6-weniger-nature-astronomy.html>

cartes de photons avec des techniques statistiques avancées qui visent à dévoiler la présence de sources gamma au-dessous du seuil de détection du LAT (voir Figure 21). Notamment, ces résultats ont été publiés par une équipe franco-italienne menée par une chercheuse du LAPTh²⁰. Les candidats les plus plausibles pour expliquer ces données gamma sont les pulsars millisecondes (MSP) : trouver ces sources dans des données multi-longueur d'onde de la bande radio à l'émission au TeV est le but principal d'une collaboration française regroupant trois laboratoires : l'IPAG (INSU), LAPTh (INP) et LPC2E (INSU). Initiée en 2020, cette collaboration vise à sonder l'existence d'une population d'objets compacts dans le bulbe galactique dans les domaines radio et X, population qui reste, à ce jour, encore inconnue. Cette collaboration a démontré que l'hypothèse d'une population de MSP expliquant l'excès de Fermi n'était pas exclue par les données Chandra disponibles. Les informations disponibles en rayons X ont permis de sélectionner des candidats les plus prometteurs à proposer pour des suivis dans la bande radio. Cette collaboration envisage maintenant de s'étendre à d'autres laboratoires, notamment l'IRFU et/ou APC, pour sonder les propriétés de cette population au TeV et au-delà.

Matière noire légère : une quête multi-longueur d'onde

Récemment, une nouvelle frontière vient d'être explorée dans la recherche de matière noire. Cette frontière implique une nouvelle physique à des échelles de masse comparables à la matière standard, en-dessous de l'échelle du GeV, ou même radicalement en dessous, jusqu'à des échelles sub-eV, et avec une force d'interaction très faible. Les nouvelles idées théoriques concernant la matière noire et d'autres questions fondamentales prévoient de telles particules à faible interaction, ou FIP (« Feebly Interacting Particles »), à ces échelles, et les données existantes fournissent en effet de nombreux indices de cette possibilité. Un programme expérimental dynamique est en cours pour découvrir cette physique, guidé par une approche théorique systématique ancrée dans les principes sous-jacents du modèle standard.

Dans ce contexte, les recherches indirectes ont apporté des résultats majeurs en exploitant les signatures que ces particules légères pourraient laisser dans les observables de haute énergie. Ainsi, les données des instruments en rayons X, comme XMM-Newton, et en rayons gamma au MeV, comme INTEGRAL-SPI, ont permis de mettre les contraintes les plus fortes sur des particules de matière noire légère avec une masse entre le keV et quelques dizaines de MeV. Ces résultats démontrent le potentiel qu'un nouvel instrument au MeV pourrait avoir dans la recherche de matière noire légère et autres FIPs. La communauté *théorie-matière noire* française, guidée par des laboratoires INP et IN2P3 (LPTHE, LAPTh et LUPM), est fortement impliquée dans l'étude des FIPs et de possibles signatures astrophysiques. Ce domaine, à l'interface entre physique des particules et astrophysique, engendre de nombreuses interactions avec la communauté française de physique des particules.

2.2 Interfaces avec les PN, AS et GdR/IRN

Comme indiqué au début de ce document, les sujets du PNHE ont un recouvrement plus ou moins fort avec d'autres thématiques portées par d'autres PN ou AS (Actions Spécifiques), ou avec des actions menées au sein ou en collaboration avec d'autres instituts (par exemple l'IN2P3), que ce soit au niveau français dans les GdR (Groupement de Recherche) ou au niveau international avec les IRN (« International Research Network »).

²⁰ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.161102>

Les trois panneaux de la Figure 22 (basés sur le résultat du sondage réalisé auprès de la communauté), montrent qu'une partie de la communauté HE est impliquée de manière significative dans d'autres PN, dans des AS et dans des GdR/IRN. La forte représentativité dans le PNCG et le GdR OG est liée à la montée en puissance, ces dernières années (en particulier au sein du PNHE), de la thématique des transitoires, grâce aux nombreuses avancées instrumentales. L'implication forte dans l'ASNUM (Action Spécifique Numérique) suit aussi cette tendance avec les besoins de simulations numériques lourdes pour rendre compte de manières de plus en plus précises des processus physiques en jeu. Nous détaillons ci-après les liens existants avec les thématiques du PNHE.

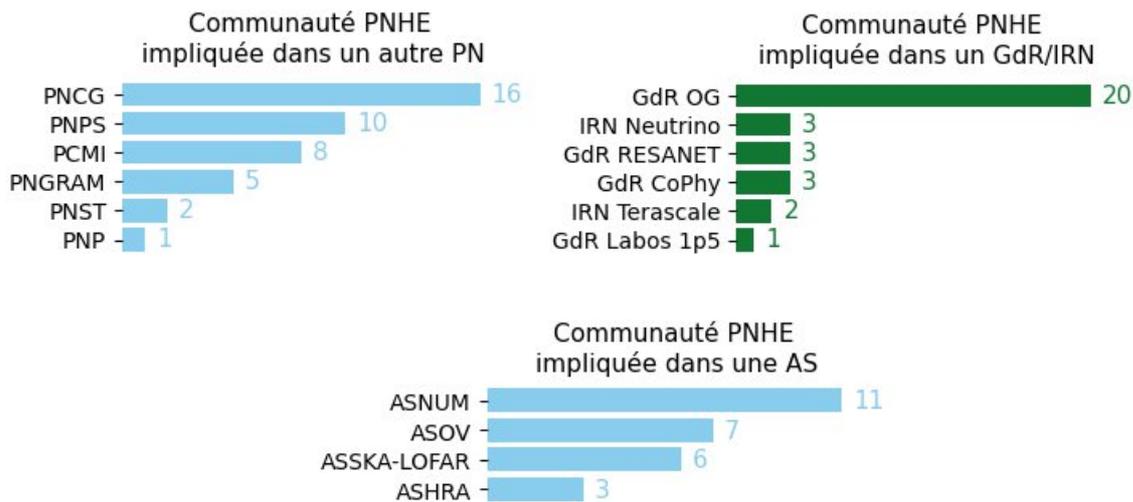


Figure 22. Nombre de personnes de la communauté HE impliquées également dans d'autres outils de l'INSU, tels les PN (en haut à gauche) et les AS (en bas), ou dans des outils de l'IN2P3, tels les GdR ou IRN (en haut à droite).

Interfaces avec les autres PN

Les liens thématiques avec les autres PN sont nombreux et amènent souvent à l'organisation par les CS respectifs d'ateliers communs notamment lors des journées SF2A. Nous les listons ces liens ci-dessous :

- **PNPS²¹ (Physique Stellaire)** : liens historiques autour de la physique des disques et des jets (présents dans les objets stellaires notamment jeunes), mais aussi (i) impact des binaires X massives sur la formation stellaire et leur utilisation comme traceur de cette dernière, (ii) étude des progéniteurs de supernovæ et sursauts γ , (iii) évolution des systèmes binaires de NS (coalescences) via l'évolution des systèmes binaires d'étoiles massives (perte de masse par vent, phases d'enveloppe commune) et (iv) évolution des étoiles vers les objets compacts et phénomènes transitoires observés.
- **PNCG²² (Cosmologie et Galaxies)** : liens avec notamment (i) le sondage des structures baryoniques présentes le long des lignes de visée via l'étude des sursauts gamma, (ii) la compréhension de la matière noire via l'étude des signatures observables (X et γ) et le flux de neutrinos ou de rayons cosmiques et (iii) la compréhension de la coévolution des trous noirs supermassifs avec leur galaxie hôte et la naissance des grandes structures (amas) via la physique de l'accrétion-éjection et des chocs (gaz chaud, cosmiques).

²¹ <https://www.pnps.cnrs.fr/>

²² <https://pncg.lam.fr/>

- **PCMI**²³ (*Chimie du Milieu Interstellaire*) : liens via notamment les interactions entre le rayonnement et les particules des objets étudiés (CR, supernova) avec le milieu interstellaire.
- **PNGRAM**²⁴ (*Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie*) : liens via (i) les tests du principe d'équivalence (invariance de Lorentz), (ii) la physique des OG notamment via la modélisation des formes d'ondes dans différents contextes astrophysiques (pulsars, supernovæ, « inspirals », coalescences) et (iii) les tests de la théorie de la gravitation via l'imagerie ou la variabilité autour d'objets compacts comme Sgr A*.
- **PNP**²⁵ (*Planétologie*) : liens via notamment (i) les impacts des processus de HE issus des étoiles (émission X, particules du vent solaires) et leurs (exo-)planètes et (ii) l'observation X des atmosphères et magnétosphères des planètes.
- **PNST**²⁶ (*Soleil-Terre*) : via notamment la physique des plasmas et l'accélération de particules (par exemple le choc terminal de l'héliosphère), l'étude des milieux neutres par l'observation X de réactions d'échange de charge, et les observations γ du Soleil et de flashes terrestres.

Interfaces avec les AS (Actions Spécifiques)

- **ASHRA**²⁷ (*Haute Résolution Angulaire*) : cette AS existe depuis les années 2000 et couvre les domaines de l'interférométrie optique, optique adaptative, mesures à très grand contraste et techniques associées des sciences des données (du visible au proche infrarouge). Le lien avec le PNHE est devenu prégnant avec la montée en puissance et les résultats récents sur les observations de l'environnement de trous noirs supermassifs (GRAVITY, EHT, etc.).
- **ASSKA-LOFAR**²⁸ (*Instrument SKA et LOFAR*) : cette AS a pour vocation de promouvoir les activités liées au développement de la radio-astronomie en France. Les liens avec le PNHE sont nombreux car la plupart des phénomènes extrêmes de l'Univers sont également de puissants émetteurs dans le domaine radio. Dans trois des quatre axes thématiques du PNHE, le rayonnement radio est une composante essentielle à la compréhension des processus physiques en jeu : (i) environnement des objets compacts et également la très haute résolution angulaire des trous noirs supermassifs (par exemple EHT et aussi le fond stochastique d'OG détecté par les PTA), (ii) origine, production et transport des particules HE avec le projet d'interféromètre radio géant GRAND pour la détection de neutrinos et (iii) phénomènes transitoires avec le suivi des sursauts gamma et radio rapides, supernovæ, TDE, etc.
- **ASNUM**²⁹ (*Numérique*) : cette AS, créée en 2022, se positionne sur le « High Performance Computing » et « High Performance Data Analytics ». Le lien avec le PNHE se retrouve via les codes numériques pour l'évolution des objets compacts (environnements de trous noirs, accrétion, binaires, etc.) et l'accélération et le transport de particules. Certains membres du comité de pilotage de cette AS sont d'ailleurs des membres de la communauté PNHE.
- **ASOV**³⁰ (*Observatoires Virtuels*) : cette AS a été créée en 2004 pour coordonner la participation française à l'Observatoire Virtuel astronomique et aux initiatives similaires internationales, élargissant son rôle en 2014 pour organiser les échanges techniques

²³ <https://www.pcmi.cnrs.fr/>

²⁴ <http://gram.oca.eu/>. Pour rappel, ce PN a été créé avec le statut d'AS en 2010 (par l'INSU avec le soutien du CNES et de l'INP) et est devenu PN en 2016 (rejoint par l'IN2P3 en soutien du CEA sur des actions ponctuelles),

²⁵ <https://pnpinsu.fr/>

²⁶ <https://pnst.ias.u-psud.fr/>

²⁷ <http://ashra-insu.fr/>

²⁸ <https://as-ska-lofar.fr/>

²⁹ <https://asnum.cnrs.fr/>

³⁰ <https://asov.obspm.fr/>

entre les services de données en astronomie-astrophysique. Renouvelée en 2016 et 2020, elle assure la coordination des équipes travaillant sur les données scientifiques, la diffusion des bonnes pratiques pour les standards de l'Observatoire Virtuel, et organise des événements annuels pour discuter des nouvelles technologies et des standards utilisés, notamment par la communauté de HE qui utilise le format de données « VoEvent » et les standards du « Virtual Observatory ».

Interfaces avec les GdR (Groupement de Recherche)

Le fonctionnement des GdR, outils utilisés par l'IN2P3 (et nombreuses autres sections du CNRS), est différent de celui des PN, avec un budget dédié à l'organisation de réunions pour des rencontres et échanges au sein d'une communauté (expérimentateurs/trices, phénoménologues et théoricien.ne.s).

- **GdR CoPhy**³¹ (*Cosmology Physics*) : créé en 2023 pour une période de quatre ans, ce GDR est piloté par l'IN2P3 (en partenariat avec l'INSU et l'INP) sur les thématiques de cosmologie observationnelle, théorie, simulations et expériences « table-top » liées. Parmi les groupes de travail pertinents pour le PNHE se trouve le groupe *Théorie, Univers et Gravitation*, qui regroupe les activités théoriques de la communauté française, également visible dans l'initiative indépendante TUG³².
- **GdR OG**³³ (*Ondes Gravitationnelles*) : créé en 2018 (et renouvelé en 2023), ce GDR est piloté par l'IN2P3 et regroupe également des chercheurs de l'INSU (le directeur du PNHE est au CS de ce GDR), de l'INP et de l'INSIS. Les groupes de travail organisent une rencontre annuelle, et les sous-groupes (i) *Populations de sources*, (ii) *Prédiction et suivi de signaux multi-messagers*, (iii) *Étoiles à neutrons, supernovæ et synthèse des éléments lourds* sont particulièrement pertinents pour le PNHE.
- **GdR RESANET**³⁴ (*Réactions, structure et Astrophysique Nucléaires: Expériences et Théories*) : créé en 2018 pour une période initiale de 5 ans (puis prolongé jusqu'en 2028), ce GdR est piloté par l'IN2P3 en partenariat avec l'INSU et le CEA. Les thématiques pertinentes pour le PNHE sont (i) les réactions de fragmentation nucléaire pour l'interprétation des mesures d'AMS-02, (ii) les rapports d'embranchement de photo-absorption à la résonance dipolaire géante en lien avec les RC de ultra-haute énergie, (iii) les raies nucléaires d'isotopes instables rares dans le contexte d'une future mission gamma au MeV et (iv) les réactions nucléaires dans les objets compacts, dans le contexte des OG pour la synthèse des éléments lourds, la compréhension des supernovæ d'effondrement gravitationnel et des coalescences de binaires compactes.

Interfaces avec les IRN (« International Research Network »)

De nombreux IRN sont des déclinaisons au niveau Européen des GdR et ont initialement commencés comme tel. Leur organisation et rôle d'animation est donc très similaire à celui des GdR, pour une communauté plus large donc.

- **IRN neutrinos**³⁵ : approuvé pour 5 ans en 2021 (et faisant suite au GdR Neutrino créé en 2004), il a l'objectif de réunir les expérimentateurs et théoriciens des neutrinos à travers l'Europe. Ses participants sont l'IN2P3 et le CEA (pour la France), l'université de Milan-Bicocca (Italie), IFIC (Espagne), UCL (UK) et KIT (Allemagne). Le lien avec

³¹ <http://gdrcofhy.in2p3.fr/>

³² <https://tug.lupm.in2p3.fr/>

³³ <https://gdrgw.in2p3.fr/>

³⁴ <https://resanet.in2p3.fr/>

³⁵ <http://gdrneutrino.in2p3.fr/>

le PNHE se trouve via les détecteurs neutrinos ANTARES et KM3NeT, utilisés pour les études multi-messagers du PNHE (RC, objets compacts et transitoires).

- **IRN Terascale**³⁶ : existant depuis plus de vingt-cinq ans (d’abord comme GdR SUSY jusqu’en 2009 et GdR Terascale jusqu’en 2016) et renouvelé en 2022, cet IRN est dédié aux recherches expérimentales et théoriques de nouvelle physique à l’échelle du TeV. Le lien avec le PNHE se fait historiquement via la recherche indirecte de matière noire (γ , ν et particules chargées) concentrée sur les candidats WIMPs, mais aussi plus récemment sur les particules légères de type axions.

2.3 Budget, appels à projet et animation scientifique du PNHE

Cette section décrit l’évolution des moyens du PNHE et le soutien qu’il reçoit de chacune de ses tutelles (INSU, IN2P3, INP, CEA et CNES). Nous détaillons aussi les activités d’animation menées par le CS du PNHE pour dynamiser et créer des liens et collaborations au sein de la communauté française.

Budget du PNHE et évolution

La Figure 23 montre l’évolution du budget total (alloué au PNHE), et par contributeur, depuis 2012 (en tant que GdR PCHE de 2012 à 2016, puis PNHE ensuite). Sur la période 2021-2024 concernée par ce rapport (encadrée en rouge), les contributions INP, CNES et IRFU sont stables, alors que la contribution IN2P3 a été diminuée par deux en 2024, celle de l’INSU de 36% en 2024, compensée en partie par l’augmentation de dotation du CNES (via du financement fléché sur GAIA et James Webb à hauteur de 10 k€). Une partie de la baisse côté INSU (15%) est expliquée par une dotation moindre du CNRS à cet institut, mais le reste de la diminution est une grosse surprise. La baisse côté IN2P3, surprenante aussi, tient à la volonté de cet institut de se concentrer sur son pilotage en « Master projet » (demandes de projets sur 3 ans pouvant être renouvelables, portés uniquement par des membres de l’IN2P3, mais pouvant inclure des collaborations inter-instituts) ; le CS du PNHE a souligné en particulier auprès du DAS « Astroparticule et Cosmologie » de l’IN2P3 que cette baisse était totalement contradictoire avec ses messages de soutien et reconnaissance des rôles du PNHE. Une remarque très importante à faire sur ce budget est que, sur la période 2021-2024, l’inflation cumulée a atteint un renchérissement des prix de l’ordre de 20% (par exemple sur les transports et les nuitées) : au final, le budget du PNHE est donc en décroissance (en euros constants) sur les cinq dernières années, avec même des signaux de baisse très préoccupants en 2024.

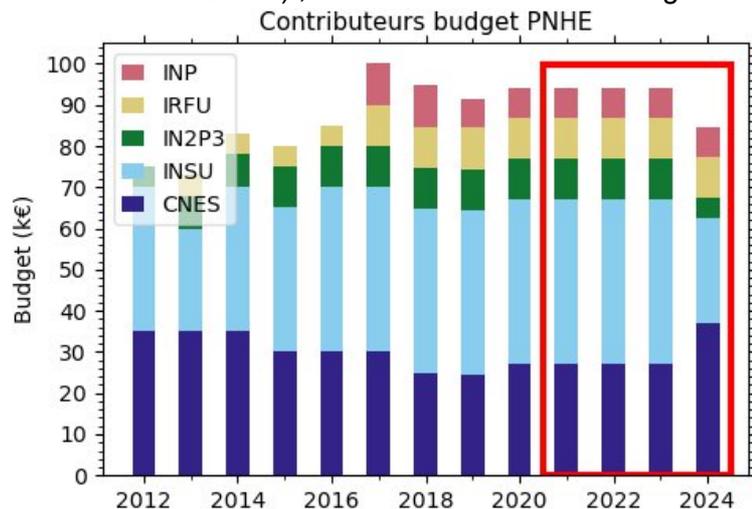


Figure 23. Évolution du budget total annuel du PNHE depuis 2102, avec contributions du CNRS (INSU, IN2P3, INP), du CEA (IRFU) et du CNES. Le cadre rouge met en avant la période couverte par ce bilan.

³⁶ <http://teryscale.in2p3.fr/>

La Figure 24 montre pour quelle fraction les instituts contribuent à ce budget total. Si durant des années, le premier contributeur a été l'INSU (~44%), suivi du CNES (30%), puis à égalité IRFU et IN2P3 (à 12%), et enfin INP (à 8%), le changement est fort en 2024, avec la contribution du CNES qui augmente fortement (passant à 50%), et celles de l'INSU et de l'IN2P3 baissant (passant à 34% et 7% respectivement), les contributions de l'IRFU et de l'INP (inchangées en termes d'euros), passant mécaniquement à 14% et 10% en fraction. En tant qu'un des piliers organisationnels de l'INSU, les PN (et donc le PNHE) devrait être soutenu principalement par l'INSU, ce qui n'a pas été le cas en 2024. Le soutien du CNES (qui a une partie fléchée) n'a donc jamais été autant fondamental aux activités et succès du PNHE. À l'opposé, l'IN2P3 rétrograde à la dernière place des contributeurs en 2024, alors que comme souligné en section 1.2, environ 40% de la communauté PNHE est issue des thématiques astroparticules (~27% issue de l'IN2P3 et ~13% de la CNU 29). Le CEA et l'INP, quant à eux, contribuent au budget total peu ou prou à hauteur de la représentativité de leur communauté au sein du PNHE.

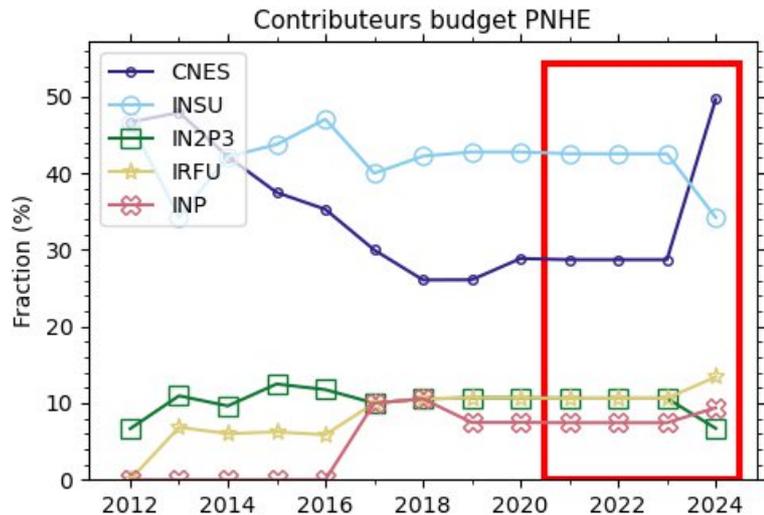


Figure 24. Similaire à la figure 23, mais en fraction de contribution par rapport au budget total. Le cadre rouge met en avant la période couverte par ce bilan.

Évaluations des appels à projet

Les demandes de l'appel à projet INSU sont évaluées par le CS du PNHE, sur la base de la lettre de cadrage de cet appel à projet :

- un.e non-permanent.e peut être PI d'un projet ;
- une demande ne peut pas être inférieure à 3 k€ par projet (somme qui peut être répartie entre plusieurs PN), sauf pour de l'animation scientifique.

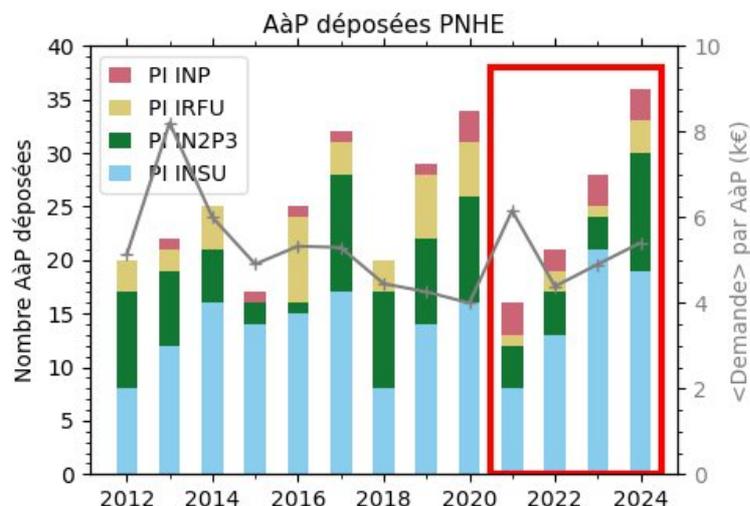


Figure 25. Évolution au cours du temps du nombre de projets déposés par institut d'origine du PI. La courbe grise en trait plein (associée à l'axe à droite de la figure) indique le montant moyen demandé par projet dans un appel d'offre donnée (c'est-à-dire une année donnée). Le cadre rouge met en avant la période couverte par ce bilan.

Pour information, chaque projet est rapporté par deux membres du CS (qui ne doivent pas être en conflit d'intérêt avec le projet), puis discuté par l'ensemble des membres du CS. En particulier, les membres du CS qui sont partie prenante d'un projet, sous une forme ou une autre, ne participent pas et ne sont pas présent.e.s pour les discussions en lien avec ce projet. La Figure 25 montre que, après une période fortement impactée par la pandémie où les besoins de financement étaient incertains (avec les restrictions de déplacement), le nombre de demandes est aujourd'hui revenu et a même dépassé son niveau pré-COVID (36 demandes sollicitant en moyenne 5,4 k€ en 2024). La dynamique est même extrêmement positive, comme elle l'était juste avant la crise de la COVID. Un frein possible à ce succès est le financement qui ne progresse plus, et qui même décroît à la fois en absolu en 2024, mais aussi en euros constant depuis 2020 (voir la discussion un peu plus haut).

Une autre façon de mesurer ce frein est le facteur de pression montré sur la Figure 26 (courbe tiretée avec symboles ronds) : ce facteur n'a jamais été aussi élevé, atteignant 2,7 en 2024. Alors que certains PN ont vu leur soutien augmenter en 2024, celui du PNHE a baissé, et ce fort facteur de pression pourrait décourager les futur.e.s porteuses et porteurs de projet et casser la belle dynamique d'échanges et de besoins observée dans la communauté. Dans le contexte de budget constant et de facteur de pression en augmentation, le CS s'est questionné sur la priorité à

donner sur divers critères d'évaluation. En 2024, le CS a en particulier choisi de :

- pondérer favorablement les nouvelles équipes et nouveaux projets ;
- pondérer favorablement les efforts faits en soutien à la communauté française, mais en gardant en tête que certaines thématiques (ou même des projets théorie) reposent parfois sur une très petite communauté ;
- pondérer défavorablement les écoles à l'étranger ;
- limiter le soutien aux projets disposant d'un financement *pérenne* (tels les ANR, ERC, soutien projet IN2P3, etc.)

Malgré ces choix, pas très différents non plus de ceux faits les précédentes années, le taux de succès en termes de projets financés (sur ceux soumis) reste globalement fort et au-dessus de 90% (courbe trait-point avec symboles carrés dans la Figure 26), illustrant l'excellente qualité scientifique des projets déposés. En contrepartie, une fraction toujours plus faible des besoins est remplie : le soutien du PNHE sur le budget demandé par AàP est ainsi systématiquement en-dessous de 50% et atteint même le chiffre catastrophique de 30% pour 2024 (trait plein avec symboles croix).

La Figure 27 montre la répartition des porteurs de projets issus des divers instituts. Ces fractions portant sur de petits nombres, les fluctuations sont grandes d'un AàP à l'autre, en particulier pour des porteuses et porteurs INP et IRFU. La majorité des demandes reste néanmoins portée par des personnels de l'INSU. Si un fort rebond est observé en 2024 pour des porteuses et porteurs IN2P3, ce rebond est fortement fragilisé par la baisse du soutien IN2P3 (voir plus haut). Si les « masters projets » de l'IN2P3 pourraient être une source de financement utile pour consolider et pérenniser des projets sur les thématiques PNHE, le fait

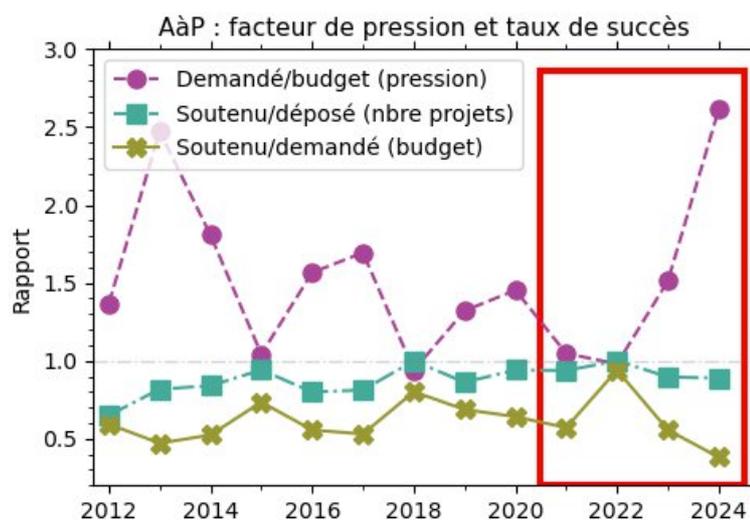


Figure 26. Évolution du facteur de pression sur les AàP, et du taux de succès en termes de nombre de projets mais aussi de budget. Le cadre rouge met en avant la période couverte par ce bilan.

qu'ils soient portés par un seul institut et qu'ils se placent en remplacement et non en complément du budget apporté aux actions du PNHE semble contre-productif. D'autant plus que la vision *par porteur* a ses biais : une fraction non-négligeable des demandes repose ainsi sur des collaborations inter-instituts. Un dernier aspect important (non-illustré par une figure) est le caractère inter-PN d'une partie croissante de ces demandes. Ainsi, en 2024, les demandes de co-financement impliquaient le PNCG (9 projets), PNGRAM (5 projets), PNPS (5 projets), PCMI (3 projets) et PNST (1 projet), avec 8 projets sollicitant 3 PN ou plus.

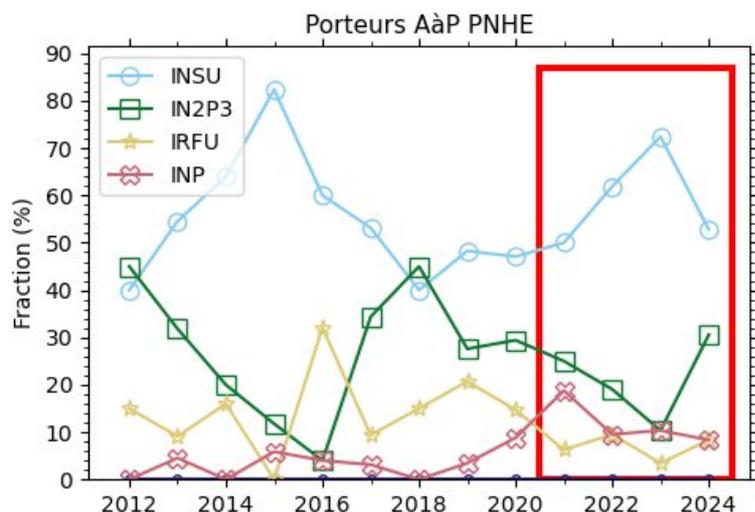


Figure 27. Évolution de la fraction des porteurs par institut dans les AàP. Le cadre rouge met en avant la période couverte par ce bilan.

Types de projets financés dans les AàP

La Figure 28 montre l'évolution au cours du temps des demandes faites à l'AàP, avec ces demandes réparties dans trois catégories : les demandes de soutien (i) pour l'organisation d'ateliers et conférences (typiquement sur quelques jours en France), (ii) pour l'organisation d'écoles (typiquement sur une semaine, à Cargèse, Les Houches ou ailleurs) ou (iii) pour des collaborations entre équipes françaises de divers instituts et laboratoires (et tout autre type de demande correspondant *in fine* à du soutien de base). Tous les types de demandes ont été impactés par la pandémie, comme déjà souligné. Il apparaît que l'organisation d'ateliers et conférences a été la catégorie la plus impactée (sans surprise), mais son nombre est presque revenu au niveau pré-pandémie. Ce que met en avant ce graphique, c'est que les aspects échanges et formations (c'est-à-dire ateliers, conférences et écoles) sont très importants pour la communauté, puisqu'ils représentent un tiers des demandes.

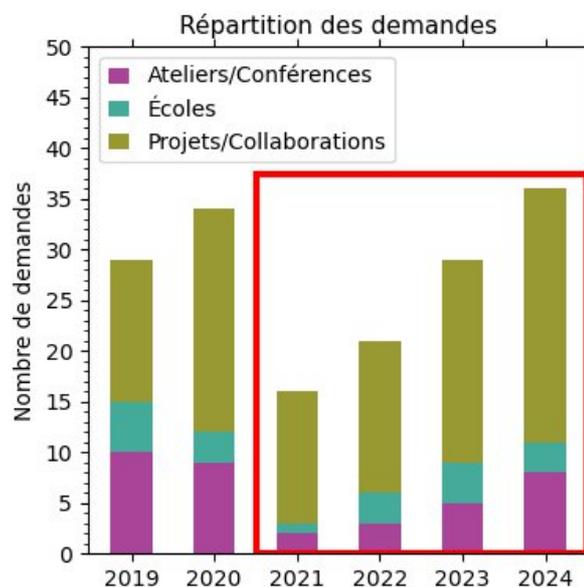


Figure 28. Évolution du nombre de demandes faites à l'AàP selon trois catégories (dont la somme correspond au nombre total des demandes reçues). Le cadre rouge met en avant la période couverte par ce bilan.

Actions d'animation menées par le CS (hors AàP)

À côté de son activité d'évaluation scientifique des AàP, le CS du PNHE joue un rôle très important pour l'animation scientifique de la communauté. Ainsi, chaque année le PNHE propose, soutient, accompagne ou participe à des écoles et ateliers ayant une forte composante HE. Cette animation a été très impactée par la pandémie de COVID. Néanmoins, le très grand succès des journées PNHE organisées à l'automne 2023 semble montrer un retour à la normale (voire plus !).

En 2021

- *Journées du PNHE en ligne*³⁷ : ces journées ont eu lieu en ligne du 14 au 16 septembre 2021, à l'occasion du renouvellement du PNHE. L'enjeu de ces journées était de discuter du bilan, de la prospective, et des actions à mener sur la période 2022-2026. Cet atelier a été un succès avec 127 participant.e.s et 39 présentations. Des discussions animées ont eu lieu pour chacun des quatre thèmes du PNHE (objets compact, rayons cosmique, multi-messagers et transitoires, nouvelle physique).
- *Journées SF2A en ligne*³⁸ : ces journées se sont déroulées en ligne, avec un atelier général PNHE (S3³⁹).

En 2022

- *Journées SF2A à Besançon*⁴⁰ : le CS a organisé un atelier général PNHE (S01⁴¹).

En 2023

- *Journées du PNHE*⁴² : ces journées ont eu lieu du 6 au 8 septembre 2023 en mode hybride à l'IAP, avec l'objectif de faire un état des lieux des thématiques des HE en France dans le contexte de la prospective à venir. Ces journées ont inclus (i) une photographie de la communauté, basée sur le sondage présenté au début de ce document, (ii) des présentations scientifiques autour des 4 thèmes de notre PN, (iii) des discussions (animées par le CS), s'appuyant sur un document partagé, des besoins et évolutions de la communauté, sur les sujets scientifiques, mais aussi sur les enjeux sociétaux listés dans la prospective, (iv) des échanges avec les représentant.e.s des tutelles qui pouvaient être présent.e.s. Le CS avait aussi choisi de sensibiliser la communauté aux questions de la parité et des biais de genre par une présentation dédiée. Ces journées ont été un succès avec ses 125 inscrit.e.s, 59 présentations scientifiques (incluant 8 présentations invitées et 16 sollicitées) et 17 présentations *éclair* (qui ont permis de découvrir les non-permanent.e.s débutant sur les thématiques HE). Les questions ont été nombreuses pour l'ensemble des présentations, et la session dédiée aux discussions a été très ouverte et très animée, avec une participation et des interventions d'un grand nombre de personnes de la communauté.
- *Écoles thématiques* : co-organisation et participation à « Transient Universe »⁴³ et « GWsNS-2023 »⁴⁴.

³⁷ <https://indico.in2p3.fr/event/24530/>

³⁸ <https://sf2a.eu/website2023/proceedings2021/>

³⁹ <https://sf2a.eu/website2023/proceedings2021/#3>

⁴⁰ <http://2022.sf2a.eu/>

⁴¹ <https://2022.sf2a.eu/ateliers/s01-atelier-general-du-pnhe/>

⁴² <https://indico.in2p3.fr/event/28794>

⁴³ <https://indico.in2p3.fr/event/27295/>

⁴⁴ <https://indico.in2p3.fr/event/28236/>

- *Journées SF2A à Strasbourg* : le CS du PNHE a organisé trois sessions, S03 (« SKA-LOFAR »⁴⁵), S07 (« Rayons Cosmiques et Cosmologie »⁴⁶) et S18 (« Prédiction et suivi des signaux multi-messagers »⁴⁷).

En 2024

- *Journées théorie du PNHE*⁴⁸ : partant du constat que les journées du PNHE en 2023 avaient donné au final une part importante aux aspects observationnels, et que les aspects théorie/modélisation/simulations bénéficieraient grandement de discussions dédiées, le CS a choisi d'organiser pour fin 2024 ces journées théorie (les précédentes journées théories du PNHE datent de 2018) à l'APC du 4 au 7 novembre.
- *Journées SF2A à Marseille* : le CS du PNHE a organisé deux sessions, S06 (« La frontière du PeV / The PeV frontier »⁴⁹) et S14 (« From dual to binary supermassive black holes »⁵⁰).

Autres activités du CS

Pour terminer sur le CS du PNHE, listons ses actions non encore mentionnées :

- avis scientifique sur les demandes de projets adressées à la CSAA ;
- nomination de potentiels candidat.e.s pour les médailles d'argent et bronze du CNRS ;
- envoi de lettres d'informations (au moins 12 par an) recensant événements importants, annonces de bourses de thèses et post-doc, etc. sur la liste de diffusion du PNHE ;
- maintenance du site du PNHE⁵¹ et suivi de la liste de diffusion.

En cette année de prospective CNES et INSU-AA, le directeur et le président du CS sont impliqués dans divers groupes de travail, de même que certains membres du CS, représentant aussi le PNHE dans divers groupes thématiques spécifiques. Par ailleurs, dans le contexte d'une refonte possible de la section 17 du CNRS évoquée en fin d'année 2023 dans un très grand flou, le PNHE s'était joint aux autres PN INSU-AA pour exprimer de profondes inquiétudes. Le PNHE avait d'ailleurs sondé sa communauté fin 2023 pour avoir son avis sur ces questions spécifiques. La direction du PNHE a aussi échangé avec divers comités de l'INSU pour faire remonter les spécificités de notre communauté et ses besoins, et continuera à le faire dans le futur.

2.4 Succès aux appels d'offre (hors PN) et distinctions

Les deux points qui suivent fournissent une indication de la reconnaissance de l'expertise de la communauté PNHE (au niveau national et international), mais aussi du succès et de l'impact de ses travaux.

Autres appels d'offre (France et Europe)

Sur ces quatre dernières années, le succès aux appels d'offres Français (ANR, CNES) et Européens est :

⁴⁵ <https://2023.sf2a.eu/ateliers/ska-lofar/>

⁴⁶ <https://2023.sf2a.eu/ateliers/cosmicrays/>

⁴⁷ <https://2023.sf2a.eu/ateliers/multi-messenger/>

⁴⁸ <https://indico.in2p3.fr/event/32157/>

⁴⁹ <https://journees.sf2a.eu/ateliers/s06/>

⁵⁰ <https://journees.sf2a.eu/ateliers/s14/>

⁵¹ <https://pnhe.cnrs.fr>

- *ANR* : douze projets sur des thématiques HE ont été financés pour un total de 4.8 M€.
- *Projets européens* (via les appels Horizon Europe) : quatre projets pour plus de 21 M€.
- *CNES* : 6 bourses doctorales et 3 financements postdoctoraux (pour un total de 720 k€) sur des thématiques HE.

La liste détaillée des ANR et projets européens est donnée en Annexe B.

Médailles du CNRS

Les recherches en lien avec les thématiques PNHE sont à l'origine de nombreuses découvertes récentes. Ces recherches sont menées par des chercheuses et chercheurs de la communauté française. Parmi la liste des médailles attribuées par le CNRS ces dernières années, la communauté PNHE est ainsi grandement représentée sur tous ses axes thématiques.

- 2023 : médaille de bronze *Astrid Lamberts* (astrophysique des OG, *INSU*)⁵²
- 2022 : médaille d'argent *Vincent Tatischeff* (astronomie gamma et RCG, *IN2P3*)⁵³
- 2021 : médaille de bronze *Francesca Calore* (astroparticule et matière noire, *INP*)⁵⁴
- 2020 : médaille de bronze *Benoît Cerutti* (astrophysique des objets compacts, *INSU*)⁵⁵

⁵² <https://www.insu.cnrs.fr/fr/personne/astrid-lamberts-0>

⁵³ <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/personne/vincent-tatischeff-0>

⁵⁴ <https://www.cnrs.fr/fr/personne/francesca-calore>

⁵⁵ <https://www.insu.cnrs.fr/fr/personne/benoit-cerutti>

3. Projet de renouvellement (2025-2029)

Après ce bilan dressé sur les quatre dernières années d'activité, nous nous projetons dans cette section sur les quatre années à venir. Le CS souligne tout d'abord que la communauté HE n'a jamais été aussi dynamique, avec un vivier de jeunes chercheur.e.s très important. Le CS rappelle que les recherches au sein du PNHE s'appuient sur l'utilisation d'instruments et de méthodes (incluant le numérique) extrêmement larges, afin de répondre aux défis des grandes questions de la discipline. Le CS note aussi la montée en puissance du multi-messager et du ciel transitoire, reflétant la mise en service ces dernières années de nombreux instruments permettant cette science, avec en particulier les succès des observatoires OG, et dans une moindre mesure neutrinos. L'environnement des objets compacts et les phénomènes extrêmes sont également très étudiés. Ils sont aussi de plus en plus utilisés pour les recherches de matière noire et de nouvelle physique. À cet égard, les travaux théoriques menés en collaboration avec les chercheuses et chercheurs de l'INP (et aussi de l'IN2P3) jouent un rôle extrêmement important pour répondre à des questions fondamentales de physique dans le laboratoire Univers, s'appuyant sur de nombreux objets étudiés par la communauté HE.

Pour dessiner les contours de ce projet de renouvellement, nous rappelons le panorama scientifique et instrumental attendu, dans le contexte d'enjeux et défis sociétaux croissants. En parallèle à ces questions de fond, l'organisation du PNHE va changer sur la forme puisque les PN deviennent à partir de 2024 des AT (actions thématiques). Nous discutons ci-après de l'impact et incertitudes liées à ces changements. L'ensemble de ces éléments nous permet de faire une analyse MOOF⁵⁶ (Menaces, Opportunités, Forces et Faiblesses). Nous présentons enfin les défis scientifiques qui nous attendent dans les 5 prochaines années ainsi que les priorités instrumentales associées pour répondre à ces défis avant de terminer sur les perspectives attendues pour les thématiques et la communauté HE.

3.1 Évolutions thématiques et instrumentales

Essor de l'astronomie multi-messagers et du ciel transitoire

Les interactions des chercheurs en astronomie et astrophysique avec les chercheurs des autres sections du CNRS, souvent d'instituts de rattachement différents, sont très nombreuses, que cela soit sur les thématiques *historiques* propres au PNHE ou aux interfaces avec d'autres PN ou d'autres instituts. Les interfaces de l'astronomie HE concernent principalement l'astronomie multi-messager (qui combine tous les types de signaux astrophysiques, c'est-à-dire photons, neutrinos, gravitons et particules de haute énergie). Ces messagers sont porteurs de multiples informations, intégrant les interactions avec l'ensemble des structures et objets le long de leur propagation (les fameux avant-plans) tout en apportant des informations sur l'objet astrophysique qui les produit et sur son évolution (que l'on peut relier à l'évolution des galaxies et/ou des étoiles). C'est la combinaison de toutes ces informations qui permet une compréhension globale de l'Univers et des objets qu'il contient.

Cette astrophysique multi-messagers est en plein essor grâce notamment aux progrès faits dans la détection de ces différents signaux. De nouveaux instruments sont en cours de construction (CTA, KM3NeT, LSST, etc.) ou sont en phase d'étude (LISA, (New)Athena, ET, etc.) Cette discipline implique de nouvelles méthodes d'observation et d'analyse, des approches scientifiques et des expertises complémentaires propres aux différents instituts donnant lieu à de riches collaborations sur ces thématiques aux interfaces. C'est exactement la raison du projet ACME (« Astrophysics Centre for Multi-messenger studies in Europe »),

⁵⁶ Connue sous l'acronyme anglais « SWOT » : « Strengths », « Weaknesses », « Opportunities » et « Threats ».

dirigé par le CNRS, qui vient d'être financé par la Communauté Européenne (via le réseau HORIZON INFRA-SERV) pour fournir un accès plus large, plus simple et plus efficace aux meilleures infrastructures de recherche, aux données et aux expertises axées sur la nouvelle science de l'astrophysique multi-messagers.

L'astrophysique multi-messagers est fortement reliée à l'astrophysique des transitoires qui, comme détaillée dans l'Axe 3 des grandes questions de la section 1.1, prend de plus en plus d'ampleur dans les thématiques de notre communauté avec le déploiement d'instruments dédiés à leurs détections. La prospective en cours a d'ailleurs pour objectif de rationaliser et optimiser les moyens d'observations français comme discuté dans la section 3.5. La mise en place d'un SNO dédié pour ce suivi sol des transitoires (discuté également dans la section 3.5) serait un atout majeur pour la communauté astronomie-astrophysique française.

Projets phares des prochaines années

L'exploitation d'instruments de dimension mondiale (listés ci-après par ordre alphabétique) avec des performances révolutionnaires marquera les évolutions thématiques et amènera aussi à une montée en puissance du domaine Univers transitoire et multi-messagers. Cette exploitation nécessite bien évidemment une très forte expertise de la communauté française, à la fois du point de vue observationnel, mais également du point de vue théorique, indispensable pour le retour scientifique de ces projets.

- **(New)Athena (« Advanced Telescope for High-ENergy Astrophysics »)**. La mission Athena a connu des passages mouvementés avec une demande de redéfinition de la mission par l'ESA en 2022 pour rester dans un budget de 1,3 G€. Cette redéfinition a été réalisée avec succès en 2023 et (New)Athena est de nouveau en course. Elle garde ses caractéristiques uniques (grande surface efficace, haute résolution spectrale, grand champ de vue) qui en font toujours une mission phare de l'ESA. Les thématiques couvertes par cette mission (l'Univers chaud et énergétique) recouvrent un grand nombre de celles du PNHE ainsi que de nombreux autres PN. Ce sera également un observatoire très important pour l'astronomie des transitoires et multi-messagers. Cette mission est également supportée par une très grande communauté française, bien sûr, mais aussi internationale. L'adoption par l'ESA est prévue pour 2027 pour un lancement dans la 2^e moitié de la décennie 2030, donc au-delà de la présente prospective. Rien n'est donc encore joué et la communauté, très nombreuses derrière cette mission qui va bien au-delà des thématiques du PNHE, doit rester vigilante et présente jusqu'à son adoption définitive.
- **CTA (« Cherenkov Telescope Array »)**. Le premier télescope de CTA, le LST-1, a été monté sur l'île de La Palma en 2019 et a fait sa première lumière début 2020⁵⁷. La période 2024-2030 devrait voir la construction et la mise en place de l'ensemble des autres télescopes, à la fois sur le site Nord, sur l'île de La Palma, et sur le site sud au Chili. Développé par un consortium international réunissant presque toute la communauté mondiale des très hautes énergies, CTA sera le premier observatoire ouvert dans ce domaine (s'étendant jusqu'à 300 TeV). Il combinera une sensibilité et une résolution angulaire inégalées par rapport aux observatoires existants, notamment le réseau **H.E.S.S.** (qui a une forte participation française) qui est parmi les plus performants actuellement. Près de la moitié du temps d'observation sera proposé à la communauté, tandis que le reste sera essentiellement dédié à la conduite de projets ambitieux comme des relevés profonds ou des suivis à long terme d'objets variables.

⁵⁷<https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-prototype-lst-1-de-cta-detecte-une-emission-tres-haute-energie-en-direction-du-pulsar>

- **KM3NeT (« Cubic Kilometre Neutrino Telescope »)**. Le projet KM3NeT est un détecteur de neutrinos sous-marin situé en France et en Italie, qui s'appuie sur le succès de l'expérience de génération précédente **ANTARES** (démantelé en 2022). KM3NeT est constitué de deux télescopes à neutrinos, **ORCA**⁵⁸ et **ARCA**⁵⁹, installés au fond de la mer Méditerranée, respectivement au large de Toulon et de la Sicile. Le site français (ORCA) est dévolu à l'étude statistique de la nature des neutrinos, alors que le site italien (ARCA) est spécialisé dans l'astrophysique des neutrinos de très haute énergie : ces deux détecteurs devraient être complètement déployés pendant la période 2025-2029. L'enjeu est d'obtenir une grande statistique d'événements avec une bonne résolution et une bonne couverture du ciel pour pouvoir mesurer précisément le fond diffus et permettre les observations multi-messagers de sources. Même si au démarrage les volumes sont modestes, l'exploitation des instruments a déjà commencé et des premiers neutrinos ont déjà été observés. Le temps et l'accroissement progressif des télescopes devrait permettre la détection des neutrinos d'origine cosmique.

- **LKV (LIGO-Virgo-KAGRA)**. La collaboration LKV a démarré sa quatrième campagne d'observation, baptisée O4 (débuté le 24 mai 2023 et s'étalant sur 20 mois), avec des instruments modernisés, de nouveaux modèles de signaux encore plus précis et des méthodes d'analyse de données plus avancées. Virgo a en réalité rejoint O4 plus tardivement, dû à des problèmes hardware, et KAGRA a récemment légèrement souffert d'un tremblement de terre et des tests sont en cours avant la reprise des observations. Le prochain « run » d'observation O5 est prévu pour 2027, pour une durée plus longue de 2-3 ans, avec pour objectif d'aller jusqu'à 250-300 Mpc. En ce qui concerne la science liée à la détection d'OG (caractérisation de la population de sources, évaluation de leurs contributions éventuelles à la matière sombre, exploration spectroscopique des trous noirs et de la structure des étoiles à neutrons...) les enjeux sont de trois ordres : (i) faire progresser la sensibilité des instruments actuels et préparer la génération suivante ; (ii) extraire la science dévoilée par les observations d'ondes gravitationnelles, complétées par des observations multi-messagères ; (iii) se donner les moyens de réaliser ces observations dans un contexte multi-messager, en assurant la disponibilité d'instruments d'observation sur l'ensemble du spectre électromagnétique et la mise en œuvre de procédures efficaces pour exploiter les alertes.

- **LSST (« Legacy Survey of Space and Time »)**. La première lumière du télescope « Vera Rubin » devrait avoir lieu courant 2024-2025, avec le relevé LSST débutant courant 2025 (pour une période de dix ans). Ces observations fourniront un relevé du ciel sans précédent en termes de volume, sensibilité et couverture temporelle, ce qui révolutionnera le domaine de l'Univers transitoire en termes de nombre, type et suivi d'objets détectés. Une exploitation scientifique optimale dépendra de la capacité à trier efficacement et rapidement ces observations et de la coordination avec d'autres instruments de spectroscopie ou imagerie multi-longueurs d'onde. Cet aspect alerte, dans LSST, sera traité par les « broker », et des échanges ou collaborations avec les développeurs du broker d'alerte **FINK** (initié et développé en France) seront des atouts importants pour assurer le meilleur retour scientifique. Grâce aux alertes du LSST et aux campagnes de suivi qui seront menées, des résultats majeurs sont attendus sur les phénomènes multi-messagers et sur les transitoires rapides (comme les SNe jeunes ou les GRB) concernant, entre autres, l'étude de l'émergence du choc, la structure des jets, le rôle de la binarité, etc.

⁵⁸ <https://www.km3net.org/research/physics/particle-physics-with-orca/>

⁵⁹ <https://www.km3net.org/research/physics/astronomy-with-arca/>

- **PTA (« Pulsar Timing Array »)**. L'année 2023 a vu la convergence définitive des analyses effectuées par les collaborations EPTA (Europe), PPTA (Australie) et NANOGrav (Amérique du Nord). Elle a permis de confirmer l'existence d'un fond d'OG au nano-Hz qui résulterait des coalescences de trous noirs supermassifs se produisant à travers l'Univers. Cette confirmation ouvre une nouvelle fenêtre sur l'étude des trous noirs binaires super-massifs. De nouvelles collaborations se joignent à ce travail, pour former l'IPTA (« International Pulsar Timing Array »), incluant CPTA (Chine), InPTA (Inde). De nouveaux grands instruments plus sensibles ajoutent également leurs données de chronométrie aux lots de données disponibles, tels que FAST ou MeerKAT (qui sera suivi bientôt par SKA).
- **SKA (« Square Kilometer Array »)**. La période 2025-2030 verra la finalisation de la construction du SKA sur les sites australien (SKA-low) et sud-africain (SKA-mid, qui sera combiné à Meerkat, précurseur de SKA) et les premières observations scientifiques (lorsque les difficultés concernant le traitement des données seront maîtrisées). Les domaines d'intérêt principaux de la science de SKA pour le PNHE — l'Univers transitoire radio (systèmes accréteurs, sursauts gamma, supernovae, FRB, suivi GW...) et la physique fondamentale à l'aide des pulsars (PTA, binaires de pulsars et binaires pulsar - trou noir, équation d'état des étoiles à neutrons...), vont subir une transformation majeure grâce au gain de sensibilité et de couverture instantanée du ciel que fournira SKA comparé aux instruments actuels.
- **SVOM (« Space Variable Objects Monitor »)**. Cette mission sino-française, dont le lancement est prévu en juin 2024, permettra à la communauté française de jouer un rôle de premier plan dans la thématique des GRB et de l'Univers transitoire. Les instruments multi-fréquences à bord du satellite, ainsi que le réseau de suivi sol de la mission — notamment le télescope **Colibri (équipé de la caméra IR Cagire)**, installé à l'observatoire de San Pedro Martir au Mexique, qui a un PI français — permettront à la communauté liée à SVOM d'être l'un des acteurs principaux dans la détection et l'étude des GRB, mais aussi dans la recherche des contreparties des OG et la caractérisation des objets transitoires. La synergie multi-longueurs d'onde avec les observatoires au sol garantira une exploitation scientifique sans précédent. SVOM a la particularité d'être une mission spatiale avec un segment sol dédié via 2 télescopes qui réagiront en moins d'une minute dès qu'une alerte sera déclenchée à travers le réseau VHF. C'est donc un moyen sol d'importance et même critique, pour la mission SVOM en particulier, et pour le suivi des transitoires de manière générale.
- **THESEUS (« Transient High Energy Sky and Early Universe Surveyor »)**. La mission THESEUS, après avoir été retenue en 2018 par l'ESA pour une étude de phase A (dans le cadre de l'appel à missions M5) mais non sélectionnée, a été reproposée et retenue de nouveau pour le futur appel à missions M7. Cette mission aura les capacités de détection et de caractérisation de GRB, ainsi que d'autres sources transitoires, sur une grande plage d'énergie (0,3 keV – 10 MeV) et de champs de vue, en incluant la possibilité de suivi (photométrique et spectroscopique) à bord dans l'infra-rouge proche (instrument IRT de leadership français). THESEUS permettra d'exploiter pleinement les potentialités uniques des sursauts gamma cosmiques (GRB) pour investiguer l'Univers jeune (plus d'une dizaine de GRB par an à $z > 6$ sont attendus, c'est un ordre de grandeur plus grand que ce que fera SVOM) et produire des avancées significatives pour l'astrophysique du domaine temporelle et multi-messagers. Ce sera le seul instrument X grand champ qui sera en opération dans les années 2030 pour (i) alerter les observatoires comme CTA, SKA, ELT, (New)Athena, (ii) suivre les alertes produites par les télescopes neutrinos et GW de dernière génération, ainsi que certaines sources découvertes par les grands relevés optiques tels que VRO/LSST. L'engagement dans THESEUS permettra une continuité du positionnement de la France dans le paysage de l'astronomie des transitoires après SVOM.

Grands projets et besoins à plus long terme

En plus de ces projets majeurs et des autres projets déjà en exploitation et/ou concernant une plus petite partie de la communauté, la période 2025-2029 visera aussi la préparation aux grands projets futurs.

- **OG (LISA et Einstein Telescope).** La période 2025-2029 verra la préparation de la communauté à l'exploitation astrophysique du projet LISA (interférométrie spatiale au millihertz), adoptée en janvier 2024 par le SPC de l'ESA pour un lancement prévu en 2035. Mais ça sera une période décisive pour faire évoluer au sein de la communauté française le projet (ET), projet européen d'un interféromètre terrestre de troisième génération, qui, combiné à LISA et à son homologue étasunien (« Cosmic Explorer »), donnera accès aux signatures d'ondes gravitationnelles venant de tout l'Univers.
- **X et γ (MeV et SWGO).** Il faudra aussi maintenir et rendre plus efficaces les efforts de la communauté pour un projet autour du MeV (nouvelle *frontière* du γ), très soutenu par une partie significative de la communauté mais sans succès jusqu'à aujourd'hui. À noter aussi que, motivé par le succès de la détection de rayons gamma de HE avec des détecteurs de particules (HAWC et **LHAASO**), la communauté internationale collabore depuis 2019 sur la construction d'un observatoire similaire en hémisphère sud, SWGO (« Southern Wide-field Gamma-ray Observatory »). Cette collaboration est entrée dans une phase de design de prototypes de détecteurs pour un début de déploiement prévu en 2028⁶⁰. Une partie de la communauté française est intéressée par ce projet. À noter qu'il y a depuis peu un *Master Project* IN2P3 pour SWGO (sans budget) et que plusieurs équipes devraient devenir membres de la collaboration en 2024.
- **Neutrinos (GRAND).** Une partie de la communauté HE participe aussi à GRAND (« Giant Radio Array for Neutrino Detection »), projet exploitant une nouvelle technique de radio-détection des neutrinos à très haute énergie. Les objectifs scientifiques sont la détection des neutrinos cosmogéniques, la mise au jour des accélérateurs de RC de ultra-haute énergie, et la compréhension de l'Univers violent dans l'ère multi-messager (comme illustré par la fusion étoile - étoile à neutron GW170814. Ce projet, né en France et principalement financé par la Chine, est maintenant dans une étape de R&D avec pour objectif de valider la technique de détection. Actuellement, trois prototypes de réseaux radio GRAND sont en service : [GRANDProto300](#)⁶¹ (en Chine), [GRAND@Auger](#)⁶² (Argentine) et [GRAND@Nancay](#)⁶³ (France). La suite qui sera donnée à cet instrument dépendra de la validation du principe de détection par ces différents prototypes.

Une astronomie numérique (stockage, simulations et IA)

Un des grands enjeux des années à venir est la maîtrise par la communauté des outils de stockage, communication, traitement, triage et interprétation de grands flux de données. Les nouveaux instruments et relevés (CTA, LSST, SKA, etc.) vont fournir des Peta-bytes de données à analyser et interpréter. En parallèle, les « brokers » d'alertes, tels que FINK (dont le PI est français), sont des systèmes capables de gérer (en temps réel), de traiter, enrichir et

⁶⁰ <https://www.swgo.org/SWGOWiki/doku.php?id=start>

⁶¹ <https://grand.cnrs.fr/overview/grandproto300/>

⁶² <https://grand.cnrs.fr/first-grandauger-antennas-deployed/>

⁶³ <https://grand.cnrs.fr/antennas-growing-in-the-forest-at-grandnancay/>

stocker ces volumes et de les recouper avec d'autres données issues de catalogues ou d'autres télescopes. FINK est en réalité déjà utilisé dans le traitement des alertes ZTF et il fait partie des sept « brokers » retenus par le LSST. Ce « broker » aura donc un accès illimité à l'ensemble du flux d'alertes pour la prochaine décennie, et la communauté française pourrait tirer parti de cet outil initié et développé en grande partie en France. Le classement de ces alertes repose sur des techniques de pointe issues du traitement de données massives (« Big data ») et de l'apprentissage automatique (« Machine learning »). Sur l'ensemble de ces aspects, (tri, analyse, stockage, etc.), il est nécessaire et urgent pour la communauté de se familiariser, d'utiliser ou de participer au développement des divers outils et techniques numériques de pointe.

Un autre axe numérique est celui des simulations numériques, qui concernent a priori tous les axes scientifiques décrits dans ce document. La Figure 29 illustre que, dans la boîte « Astrophysics and Geophysics » du GENCI, les simulations en lien avec les thématiques du PNHE représentent environ un quart des demandes de temps de calcul (principalement en lien avec les plasmas). Ainsi, les thématiques du PNHE sont très fortement demandeuses, et à la fois à la pointe, en termes de développement.

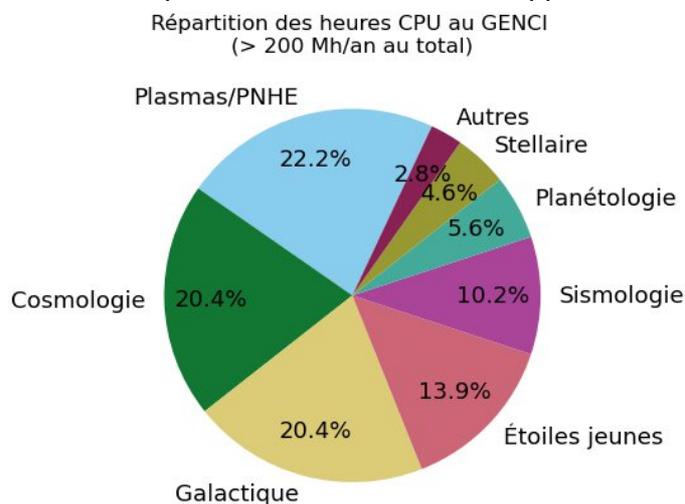


Figure 29. Répartition des heures CPU sur GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif) entre les différentes thématiques Terre-Univers. Les projets en lien avec le PNHE représentent 25% du total (principalement Plasmas). Figure adaptée d'une présentation de G. Lesur (IPAG Grenoble), responsable du comité d'allocation « Astrophysics & Geophysics » du GENCI.

Cependant, certains thèmes d'actualité sont absents du paysage français, comme par exemple les simulations de binaires d'étoiles à neutrons comme sources d'OG ou progéniteurs de sursauts gamma courts, ainsi que les destructions d'étoiles par effets de marées. Par ailleurs, la communauté *numérique* en astrophysique des HE fait face, à l'instar de celle d'astronomie et astrophysique, à un certain nombre d'évolutions importantes qui vont fortement impacter les outils (codes) en HPC. À très court terme (2025), le consortium Jules Verne mettra à disposition de la communauté scientifique des capacités de calculs « exascale », avec des contraintes quant à l'architecture des programmes de simulation. Dans le même temps, le calcul sur cartes graphiques (GPU) est en train de prendre l'ascendant sur les processeurs traditionnels (CPU) en termes de puissance, de prix et d'efficacité énergétique. Cela exige la plupart du temps une réécriture des codes numériques pour pouvoir bénéficier pleinement de ces ressources. Cela a été fait en France, par exemple avec le code IDEFIX, dont certaines applications concernent directement le PNHE. Un autre changement majeur du domaine est l'utilisation potentielle d'algorithmes d'intelligence artificielle pour l'émulation de simulations complexes, à faible coût informatique.

Dans tous ces domaines, la mise en place de l'Action Spécifique Numérique apporte un nouveau cadre pour l'animation de la communauté ainsi que l'aide à la diffusion de codes, qu'ils soient labellisés *communautaires* ou pas. Cette diffusion peut s'accompagner d'une ouverture des codes allant dans le sens de la science ouverte. Enfin, il faut noter qu'au-delà des *gros* codes HPC, la communauté numérique PNHE développe de nombreux *petits* codes (parfois également « open source ») requérant beaucoup moins de ressources informatiques

et étant capables cependant de résoudre des problèmes des plus intéressants. En cela, ces derniers répondent aussi au besoin de réduction de la consommation de ressources du calcul scientifique, qui est l'un des défis majeurs à court terme de la communauté.

3.2 Enjeux sociétaux et positionnement du PNHE

Transition carbone et écologie

Comme toute activité humaine, la recherche scientifique est à la fois contributrice et vulnérable aux bouleversements écologiques en cours. Et comme toute activité humaine, elle se doit de réduire son impact, a minima pour des raisons d'éthique de la recherche (voir le rapport⁶⁴ du comité d'éthique du CNRS), mais également par soucis d'exemplarité et de juste contribution à l'effort collectif ; l'astrophysique, et donc la communauté HE, ne font pas exception.

Les impacts environnementaux de l'astrophysique sont liés en partie à notre pratique *au quotidien*, incluant notamment déplacements professionnels en avion, achats de biens et services dans les laboratoires et consommation énergétique des bâtiments. De multiples actions et démarches sont en cours dans les laboratoires d'astrophysique français pour atténuer l'impact de ces pratiques quotidiennes : elles vont de l'établissement de bilans de gaz à effet de serre (GES) — comme dans les travaux⁶⁵ menés par des chercheurs de l'IRAP (de la communauté HE) — jusqu'à la mise en place de règles d'utilisation de l'avion et d'action de réduction des achats. Les impacts environnementaux de l'astrophysique vont cependant au-delà de ce quotidien. De récents travaux ont souligné les émissions GES significatives de nos infrastructures de recherche (satellites et télescopes) et leur part prépondérante dans les bilans GES des laboratoires d'astrophysique (voir les travaux récents⁶⁶ menés là encore par ces chercheur.e.s de l'IRAP).

La diminution de notre impact écologique implique donc une réflexion sur un pilier majeur du cœur de notre métier. Le domaine HE, de par la nature des phénomènes étudiés, nécessite une approche multi-longueurs d'onde et multi-messagers qui repose sur l'utilisation de nombreux instruments. Il est donc particulièrement sensible à la question de la réduction de l'impact de nos infrastructures de recherche. Des actions basées uniquement sur une amélioration de l'efficacité énergétique et matérielle, et sur l'amélioration tendancielle de l'intensité carbone de l'économie, ne suffiront cependant pas à atteindre les objectifs que la France s'est fixée aux horizons 2030 et 2050 (travaux sous presse). Comme pour de nombreux autres secteurs de nos sociétés, une approche également basée sur la sobriété est nécessaire afin d'être crédible face aux objectifs nationaux. Pour l'astrophysique, cette sobriété peut se traduire, entre autres, par un soutien à la mutualisation/collaboration des projets (plutôt que par la compétition) et par un ralentissement du rythme de production des instruments, en favorisant la maximisation du retour scientifique des infrastructures et des données existantes.

La façon d'atteindre concrètement ces objectifs doit faire l'objet d'un débat collectif de notre communauté lors de cette prospective (voir les travaux du groupe de travail GT I.2 de prospective INSU dédié aux enjeux environnementaux). Le CS du PNHE est favorable à la mise en place de règles contraignantes, basé sur des critères qui intégreraient les émissions GES d'un projet. Ces critères devraient cependant être donnés et calculés par les porteurs de gros projet eux-mêmes en amont de l'expertise scientifique. Au niveau des AàP, des règles de calcul plus ou moins simples devraient être mises en place pour que le CS puisse pondérer

⁶⁴ <https://comite-ethique.cnrs.fr/avis-du-comets-integrer-les-enjeux-environnementaux-a-la-conduite-de-la-recherche-une-responsabilite-ethique>

⁶⁵ <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01771-3>

⁶⁶ <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01612-3>

son évaluation scientifique par l'impact GES des demandes. À l'heure actuelle, par manque de cadre, d'outils et de méthodologie, cette action est impossible à mettre en place. En conséquence, le CS du PNHE se limite à ne pas soutenir les demandes pour des conférences à l'autre bout du monde, ce qui est très certainement insuffisant au vu des enjeux climatiques.

Inclusion/diversité/égalité

La communauté HE ne déroge pas du reste de la communauté astrophysique avec une sous-représentation des femmes. Si l'on regarde les réponses au questionnaire envoyé à la communauté (été 2023), seulement 21% des personnes (pour une centaine de répondant.e.s) qui y ont répondu sont des femmes. C'est un peu plus faible que le pourcentage moyen de femmes en Astrophysique (un peu moins de 30%). La liste des personnes inscrites sur la liste de diffusion du PNHE (mise à jour en avril 2024) donne, quant à elle, une fraction similaire au questionnaire (22% pour 250 personnes sur la liste), mais avec un éclairage supplémentaire : la Figure 30 indique que la fraction de femmes décline au cours de l'avancée de la carrière, passant de 37% durant la thèse à 24% durant le post-doc, puis 22% de postes permanents, et 9% d'émérites. La forte décroissance après la thèse interroge mais n'est pas une surprise, puisque les incertitudes liées aux post-docs, recrutement tardifs, biais d'évaluations et autres sont des facteurs connus et identifiés tendant à écarter plus les femmes que les hommes dès le recrutement.

Pour ce qui concerne le vivier arrivant en thèse, des actions au niveau de la société dans son ensemble sont nécessaires pour assurer que les femmes se dirigent vers les thèmes scientifiques autant que les hommes. Au niveau du CNRS et de l'INSU, une partie de la tendance notée ci-dessus pourrait être corrigée via des choix forts faits au niveau du recrutement et avancée de carrière.

Des actions immédiates pourraient par exemple être menées pour limiter tous les biais de genre, comme par exemple l'institution de visionnage de vidéos de sensibilisation avant tout travail d'évaluation de dossiers. De telles vidéos existent même si elles sont plutôt orientées *recrutement*⁶⁷. Il faudrait diversifier ces vidéos pour sensibiliser les personnels sur des situations plus proches de celles qu'ils vivent dans leur travail : évaluation de dossiers scientifiques, rédaction de dossiers de recrutement (thèse, postdoc).

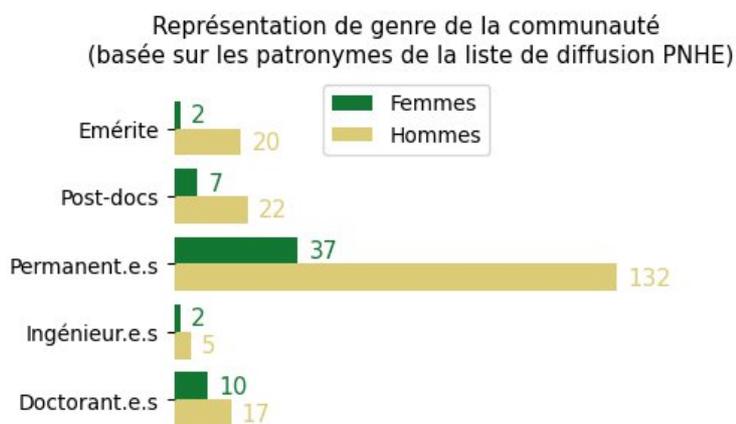


Figure 30. Représentativité de genre de la communauté, basée sur les patronymes de la liste de diffusion du PNHE (mise à jour en avril 2024).

À son niveau, le PNHE veille à la représentation des femmes dans les colloques/conférences qu'il subventionne. Plusieurs interventions, sur la parité et les biais de genre ont aussi été faites devant le CS et lors des dernières journées PNHE, pour sensibiliser la communauté à ces questions.

Pour finir, si l'inégalité de genre est celle qui concerne le plus grand nombre de personnes aujourd'hui, il ne faut pas oublier les autres discriminations. Les aspects d'inclusion et de diversité sont difficiles à mettre en œuvre à notre niveau, tant les déterminant sociaux, qui

⁶⁷ <https://academics.skidmore.edu/blogs/vids/narrative-videos/>, <https://academics.skidmore.edu/blogs/vids/expert-interview-videos/>, <https://gender.cerca.cat/en/parcialitat-en-la-contractacio/>

débutent dès le plus jeune âge et s'accumulent au fil de la scolarité, semblent être le principal goulot d'étranglement pour avoir un vivier divers. Il semblerait néanmoins souhaitable de mettre en place un code de conduite minimal, au niveau du CNRS ou de l'INSU : le PNHE pourrait alors s'emparer de ce code de conduite pour demander à chaque école, atelier ou réunion de travail organisée (et financée par le PNHE) de s'assurer de la mise en œuvre et du respect de ce code, afin de continuer à lutter contre les stéréotypes et tendre vers un environnement de travail le moins discriminant possible. Un autre aspect pourrait être l'enrichissement de l'offre de formation pour prendre conscience et lutter contre tous les types de stéréotypes.

Télescopes et territoires

Si de nombreux instruments d'importance pour le PNHE sont sur des satellites (pour toute la partie X/Gamma notamment), d'autres demandent et vont demander des infrastructures importantes sur des surfaces très grandes (comme par exemple CTA et SKA). Le PNHE se joint évidemment aux efforts de l'INSU pour intégrer les télescopes et les observatoires dans les territoires qui les hébergent, dans un souci d'écoute des populations locales et de prise en compte de leurs spécificités.

Astronomie participative

L'astronomie multi-messagers liée aux événements transitoires de HE est un sujet qui suscite l'intérêt et la curiosité de la société dans son ensemble — pensons au GRB dénommé BOAT, dont l'intensité pose la question de la stérilisation des biosphères, ou encore au mystère des trous noirs —, des astronomes amateurs aux étudiants de tous âges, en passant par le grand public. À cet égard, les projets de science participative sont un moyen de mieux faire connaître nos thématiques, mais aussi de rapprocher la société des travaux de recherche.

Le PNHE porte activement le programme de science citoyenne participative Kilonova-Catcher⁶⁸, dont les PI sont du CEA/IRFU. Ce projet a été lancé en 2019 par la collaboration GRANDMA et vise à capturer la contrepartie électromagnétique (EM), c'est-à-dire l'émission de kilonova optique et infrarouge, des sources d'OG détectées par les interféromètres LIGO, Virgo et KAGRA. En effet, en raison de la mauvaise localisation de ces sources dans le ciel, des efforts d'observation sans précédent sont nécessaires pour pouvoir identifier les émissions de kilonova associées, qui par ailleurs disparaissent rapidement. Alors que GRANDMA a mis en place un réseau mondial de plus de vingt observatoires professionnels, l'impact des citoyens dans cette science d'observation peut être décisif grâce à leur grande flexibilité et leur nombre. Aujourd'hui, plus de 180 astronomes amateurs du monde entier (28 pays répartis sur tous les continents) sont enregistrés pour compléter l'ensemble des données du réseau d'observatoires professionnels et participer ainsi au progrès scientifique. En retour, les astronomes amateurs bénéficient directement de l'expérience professionnelle fournie par les chercheurs du PNHE, par le biais d'une formation à des procédures fiables et la distribution d'équipements adéquats (par exemple, sept jeux de filtres « Sloan » ont été fournis à des astronomes amateurs) pour effectuer ces suivis pour des candidats kilonova prometteurs ; des réunions d'avancement et news scientifiques sont aussi régulièrement organisées.

Jusqu'à présent, le projet collaboratif KNC a réalisé 27 campagnes d'observation et collecté plus de 940 images fournies par 25 astronomes de toutes nationalités. Face au succès du programme et à la grande motivation des citoyens astronomes, les capacités observationnelles de KNC ont été étendues à d'autres cas scientifiques au cas par cas : suivi optique de l'émission rémanente des sursauts gamma, suivi de candidats transitoires optiques

⁶⁸ <http://kilonovacatcher.in2p3.fr>

rapides détectés par le relevé américain ZTF (impliquant aussi une collaboration étroite avec le « broker » d'alerte français FINK qui sera utilisé pour LSST), ou bien suivi des supernovae brillantes. L'ensemble des observations KNC ont été valorisées dans des communications scientifiques diverses : présentations scientifiques internationales, télégrammes scientifiques instantanés et six publications dans des journaux scientifiques avec comité de lecture (avec plus de 150 citations). Tous les citoyens ayant participé à ces campagnes d'observation sont systématiquement inclus dans ces communications, au même titre que les scientifiques. Aucune distinction n'est faite entre astronomes professionnels et amateurs, ce qui contribue à renforcer les liens entre le monde académique et la société civile. KNC a d'ailleurs un lien étroit avec les programmes RAPAS⁶⁹, GEMINI⁷⁰ de la SF2A ou les actions incitatives Pro-Am (professionnels et amateurs) de l'observatoire de Paris. Les chercheuses et chercheurs impliqués dans le projet KNC participent autant que possible aux événements grands publics, telles les *Rencontres Ciel et Espace* à Paris, et répondent également le plus possible aux sollicitations des associations d'astronomie ou collaboration Pro-Am en France principalement.

Le succès de ces projets d'astronomie participative ne doit pas cacher néanmoins un retour et un impact scientifique parfois très incertain. Il conviendrait sûrement de réfléchir à une coordination des différents projets pour éviter notamment la dispersion de la communauté amateur. Un soutien institutionnel (en ressources humaines et financières) serait aussi certainement souhaitable pour aider notamment à l'acquisition, le stockage et la compatibilité des données.

3.3 Analyse des forces, faiblesses, opportunités et menaces

Au regard du bilan dressé, incluant les pratiques et attentes de la communauté, nous pouvons établir une analyse critique et synthétique des activités de la communauté HE.

Forces

- *Un panorama instrumental HE inédit* : la couverture en termes de longueur d'onde (du radio au gamma), la gamme d'énergie pour les particules chargées (de 10^5 à 10^{21} eV) et les messagers (ouverture des fenêtres neutrino et OG) n'ont jamais été aussi favorables. Ceci permet de réaliser un grand nombre d'études et des avancées significatives qui n'auraient pas pu être possibles autrement.
- *Des thématiques en pleine croissance* : la quantité et qualité de nouvelles observations et données collectées, associées aux progrès des modélisations numériques multi-physiques, permettent d'aborder des questions théoriques toujours plus fondamentales (objets compacts, trous noirs, matière noire, etc.). Dans ce contexte, les thématiques associées aux grandes questions de la dernière décennie n'ont jamais été aussi dynamiques, avec aussi la montée en puissance de nouveaux axes en lien avec le ciel transitoire et multi-messagers.
- *Compétences reconnues* : les membres de la communauté HE ont eu du succès sur les appels à projets français et européens. Ces compétences sont aussi illustrées par les quatre médailles du CNRS obtenues dans la communauté sur les cinq dernières années (voir la section Médailles du CNRS).
- *Expertises multi-instituts* : les thématiques du PNHE se trouvent au carrefour d'intérêts portés par différents instituts (INSU, IN2P3, INP, CEA-IRFU). Les méthodologies et

⁶⁹ <http://rapas.imcce.fr/>

⁷⁰ <https://proam-gemini.fr/>

expertises propres de ces instituts (détecteurs, analyse de données, modélisation, théorie, etc.), mises en œuvres dans les collaborations de la communauté, sont un atout pour répondre aux questions nécessitant une forte synergie entre les aspects sus-cités.

Faiblesses

- *Ressources humaines limitées* : les défis scientifiques sont nombreux et la diversité des approches et instruments utilisés (de plus en plus grand) nécessitent des ressources humaines accrues (soutien technique, tâches de service et bien évidemment recherche). Ce soutien n'est pas garanti et pourrait impacter fortement et négativement les retours scientifiques et avancées de nos thématiques.
- *Baisse des crédits* : avec l'inflation seule, le budget du PNHE a baissé d'environ 20% en euros constants ces 5 dernières années. En valeur absolue, le budget a aussi baissé de 10% en 2024 (baisse principale venant de l'INSU). C'est un très mauvais signal envoyé pour une communauté extrêmement dynamique et en croissance.
- *Inadaptation des tâches de services* : certaines tâches à mener de notre communauté, comme par exemple la question des alertes, sont peu visibles au niveau du CNAP. Ceci affaiblit l'intégration des ressources support nécessaires pour traiter les questions du ciel transitoire (dans le contexte des observatoires à transitoires comme SVOM, LSST, LKG, etc.).
- *Priorités multi-instituts pas toujours convergentes* : l'organisation et les priorités des instituts sont différentes, avec parfois des financements et soutiens financiers priorisés dans des actions et des cadres différents. Ceci crée des complications quand il s'agit d'encourager les synergies entre chercheuses et chercheurs de ces instituts.

Opportunités

- *Pléthore de nouveaux instruments envisagés* : dans le contexte multi-messagers (photons, neutrinos, particules et OG) au cœur des thématiques du PNHE, les projets prévus dans un futur proche (CTA, SKA, LISA, etc.), en phase de sélection ((New)Athena, THESEUS) ou en phase d'étude (ET, SWGO, GRAND, etc.) dans un futur plus lointain, sont nombreux. Ces projets devraient permettre de sonder de manière inégalée les populations et la physique des objets compacts, et devraient mener à d'étonnantes découvertes.
- *Jouer des rôles clefs du fait de nos compétences* : de par son positionnement très fortement inter-instituts et des compétences acquises par la communauté sur le développement ou l'exploitation d'instruments dans des contextes très variés (CNES, ESO, INSU, IN2P3, CEA), la communauté PNHE a une position privilégiée pour se projeter et faire des recommandations sur les défis scientifiques et organisationnels des prochains années.
- *Coordination multi-instituts* : des projets phares comme CTA, LISA, (New)Athena, ET, etc. impliquent de nombreux membres de la communauté HE et une coordination inter-instituts. Cette coordination donne une forte visibilité de la communauté, en particulier sur les demandes de financements et projets.

Menaces

- *Incertitudes sur de nombreuses missions satellites* : la compréhension des objets et processus étudiés au sein de la communauté HE reposent sur la qualité et complétude de la couverture multi-longueur d'onde et multi-messagers. Dans la décennie à venir, l'arrêt de certains instruments (par exemple en X et gamma, comme Chandra et INTEGRAL) et les incertitudes pesants sur la construction d'autres (par exemple (New)Athena et THESEUS) sont une menace pour les défis de la discipline.
- *Recrutement à la marge dans un contexte multi-instituts* : les compétences diverses et transverses mises en œuvre dans nos travaux sont souvent à la croisée des compétences de nos instituts. De fait, les profils typiques de notre communauté ne sont pas forcément bien identifiés et priorisés comme tels au sein de chaque institut.
- *Soutien inter-instituts aux PN* : cette dernière année, l'IN2P3 a choisi de baisser sa dotation au PNHE pour favoriser des financements fléchés (au détriment des PN). Par ailleurs, pour pousser ses priorités et organiser sa communauté, l'IN2P3 s'appuie généralement sur des GdR (pour l'animation) qui sont clairement en concurrence (en partie en tout cas) avec l'action des PN. Ceci est de nature à fragiliser une approche transverse nécessaire.
- *Besoins de formation initiale étendus* : l'évolution des formations en astronomie, astrophysique et physique fondamentale ne semble pas suivre l'évolution des besoins de notre communauté, et en particulier dans sa transversalité (données dans toutes les longueurs d'onde et tous types de messagers, interférométrie, polarisation, simulation numérique, modélisation, etc.).
- *Adapter les objectifs scientifiques dans un futur moins-carboné* : les besoins croissants, en termes d'instruments et de ressources humaines, évoqués pour répondre aux grandes questions de notre discipline, clashent avec l'objectif de décarbonation de nos sociétés.

3.4 Défis scientifiques et priorités instrumentales

Nous avons présenté dans ce document, pour les années à venir, le panorama instrumental, les évolutions thématiques et perspectives scientifiques, ainsi que le contexte sociétal. Les activités menées au sein du PNHE sont en plein essor. Elles ont une forte composante d'observation et d'analyse de données. La nature multi-longueur d'onde et multi-messagers des processus étudiés implique un très grand nombre d'instruments utilisés (incluant IR/IR*/OI, sol et spatial), qui requière un soutien fort par les SNO. La communauté est aussi fortement investie dans la théorie/modélisation et le calcul haute performance (25% des demandes astrophysique et astronomie sur GENCI⁷¹ concernent des thématiques PNHE), le « Big Data »/AI étant aussi de plus en plus utilisé (avec des volumes de données excédant les capacités de stockage actuels).

Devant la complexification croissante des instruments, analyses menées et questions scientifiques, les besoins en formation, échanges et animation dans la communauté vont encore croître. Ceci alors que le contexte budgétaire est morne, avec globalement un soutien (à euros constant) décroissant ces cinq dernières années. Le contexte de décarbonation va aussi agir comme une contrainte à considérer pour mener ces projets. Malgré ce paysage budgétaire, qui pourrait limiter la portée et l'ampleur des actions que pourra mener le PNHE, et ce tournant climatique qu'on ne peut ignorer, le contexte scientifique reste néanmoins extrêmement excitant et favorable.

⁷¹ <https://genci.fr/>

Le soutien aux thématiques historiques liées aux grandes questions de la communauté (voir la section 1.1) va évidemment se poursuivre, notamment par l'arrivée régulière de nouvelles données. Les thématiques transversales (voir la section 2.2) vont aussi se poursuivre et certaines thématiques vont également monter en puissance (nouveaux développements instrumentaux, ciel transitoire et multi-messagers, tests de nouvelle physique), tout cela à l'ère des simulations HPC, des grands relevés (« Big data ») et techniques de « Machine Learning » pour tirer le meilleur parti des flots de données. Dans ce contexte, nous pouvons mettre en avant quatre grands défis scientifiques pour les cinq prochaines années. Ces défis vont orienter une partie du développement instrumental à venir ainsi que la priorisation des missions futures discutées plus loin.

Défis scientifiques

1. **Transitoires/multi-messagers.** Optimiser le retour scientifique de l'astrophysique multi-messagers et des transitoires à l'ère des instruments à grands relevés, des nouvelles missions sol et spatiales dédiées, des nouvelles campagnes d'observations d'ondes gravitationnelles et des nouvelles générations de télescopes à neutrinos.
2. **Univers extrême.** Comprendre l'Univers extrême (environnements d'objets compacts, cycles de vie des AGNs, origine et transport du rayonnement cosmique, binaires X, sondages de l'état de la matière nucléaire) par l'étude de ses messagers électromagnétiques (radio, X, gamma), particulières (cosmiques, neutrinos) et ondes gravitationnelles.
3. **Nouvelle physique.** Découvrir une nouvelle physique et comprendre la nature de la matière noire en recherchant les signatures astrophysiques associées.
4. **Numérique.** Appréhender les processus complexes de l'astrophysique des HE à l'aide de calculs numériques hautes performances et d'intelligence artificielle.

Avancer sur ces différents défis va nécessiter des travaux à la pointe en théorie, modélisation et observations. Cela reposera également sur des développements instrumentaux, sol et spatiaux, sur de nombreuses années, en lien direct avec les priorités instrumentales détaillées dans la section suivante.

Priorités instrumentales

Le classement des instruments prioritaires pour les thématiques HE est reporté dans les tables ci-dessous. Nous suivons les définitions du *Groupe Thématique III.1 (Moyens Prioritaires)* de la prospective, à savoir :

- **P0** : *moyen incontournable pour réaliser les objectifs scientifiques principaux de la thématique et communauté active en soutien. Cette priorité est en lien avec vos défis scientifiques prioritaires pour le quinquennat.*
- **P1** : *moyen utile pour objectif scientifique secondaire et ou nécessitant un renforcement de la communauté.*
- **LTAS** : *("Long Terme A Suivre") projet à long terme dans une phase d'étude très préliminaire mais dont les phases de développement sont à suivre activement.*

Missions sol

Ne sont indiquées dans la Table 2 que **les missions Sol en phase de construction et/ou qui commenceront à observer durant les cinq prochaines années** couvertes par la prospective. L'ensemble des instruments d'intérêts majeurs pour les HE sont listés dans la section [Projets phares des prochaines années](#).

SOL		
Priorité	Justification / commentaire	Défis / thématiques cibles
P0 : <u>CTA</u>	Réseau de télescopes Cherenkov sur deux sites (Nord : La Palma, Sud : Chili)	Transitoires/multi-messagers Univers extrême Nouvelle physique
P0 : <u>SKA</u>	Réseau de milliers d'antennes sur deux sites (Afrique du Sud et Australie)	Univers extrême Transitoires/multi-messagers Nouvelle physique
P0 : <u>KM3NeT</u>	Instrument incontournable pour l'astronomie neutrinos, dont la construction a déjà commencé et qui s'étalera encore sur 2-3 années.	Transitoires/multi-messagers Univers extrême Nouvelle physique
P0 : <u>LSST</u>	Instrument incontournable dans les années à venir pour les alertes concernant les transitoires	Transitoires/multi-messagers Nouvelle physique
P0 : FINK (appliqué à LSST)	Software « broker » d'alerte français sélectionné pour être utilisé sur les données LSST	Transitoires/multi-messagers
P0 : <u>Colibri et Colibri/Cagire (SVOM)</u>	Instrument dédié au suivi d'alerte (associé à SVOM). Caméra infrarouge Cagire d'importance pour le suivi GRB de SVOM	Transitoires/multi-messagers Univers extrême
P1 : <u>SWG0</u>	Fort intérêt de la communauté française HE qu'il convient de renforcer. À noter qu'il y a depuis 2024 un « Master Project » IN2P3 pour SWGO (sans budget). Plusieurs équipes devraient devenir membres de la collaboration cette année	Univers extrême Transitoires/multi-messagers Nouvelle physique
P1 : <u>VLT/Gravity+</u>	Les avancées amenées par les instruments du VLT/Gravity+ contribuent à des intérêts/enjeux croissants au sein du PNHE. Communauté française HE à renforcer	Univers extrême Nouvelle physique
P1 : <u>Astro-COLIBRI (appliqué à LSST, SVOM)</u>	Software	Transitoires/multi-messagers
P1 : <u>Instruments ELT (MICADO, MOSAIC, MORFEO, ANDES)</u>	La communauté PNHE commence à s'intéresser aux performances de ces instruments. Communauté à renforcer.	Univers extrême Transitoires/multi-messagers

Table 2. Priorisation des instruments Sol d'importance pour les thématiques HE.

Les missions sols LTAS d'intérêt pour les HE sont présentées dans le GT III.1 (*Les Moyens prioritaires*). Nous les listons simplement ici : ATLAST, VLT/UT5, Einstein Telescope,

GRAND, IRAM Pico Veleta, instrumentation ELT (MICADO, MOSAIC, MORFEO, ANDES), VLT/BlueMUSE et TAMARINS.

Missions spatiales

Le classement des instruments spatiaux prioritaires pour les thématiques HE est reporté dans la Table 3 ci-dessous. Ce classement repose en partie sur les discussions menées par le Groupe de Travail AA de la prospective CNES (réunions où les directions des PN étaient invitées) :

- **P0.** Il y a deux missions spatiales d'importance pour le domaine des HE, non encore approuvées, et dont l'avenir va se décider bientôt, à savoir **(New)ATHENA** et **THESEUS**, présentées en section [Projets phares des prochaines années](#).
- **P1.** Se retrouvent en P1 les missions spatiales moins prioritaires que les deux précédentes. Nous les commentons brièvement, car elles ne sont pas discutées dans le reste du document :
 - γ *au MeV* : cette fenêtre d'observation est l'une des plus mal couvertes à cause de la faible sensibilité des instruments actuels ou passés. Plusieurs projets sont en développement, portés par des membres de la communauté HE (**COMCUBE**, qui sont des télescopes Compton, **GRINTA** pour « Gamma-Ray International Transient Array Observatory », **e-Astrogam** pour « enhanced-ASTROGAM, A space mission for MeV-GeV gamma-ray astrophysics »). Beaucoup d'objets ont une émissivité maximale dans ce domaine (blazars, sursauts gamma, pulsars, ...) et sont d'un grand intérêt pour les thématiques HE. C'est aussi un domaine d'importance pour la spectroscopie nucléaire ou la raie d'annihilation électrons-positrons (qui concerne aussi les HE, avec la recherche de matière noire par exemple ou de signaux de nouvelle physique, type matière noire légère ou trous noirs primordiaux).
 - *Missions d'opportunités* : dans les années à venir, différentes missions d'opportunité dans le domaine des rayons X seront portées par d'autres pays, notamment l'APEX (« APophis EXplorer ») de la NASA avec trois missions X en compétition (**STROBE-X** pour « Spectroscopic Time-Resolving Observatory for Broadband X-rays », **HEP-X** pour « High Energy X-ray Probe », **AXIS** pour « Advanced X-ray Imaging Satellite »), ou via des missions chinoises (missions **e-XTP** pour « Enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission » et **CATCH** pour « Chasing All Transients Constellation Hunters »). Un appel MIDEX (mission « Medium Explorer ») de la NASA, ouvert à des collaborations avec la communauté internationale, est aussi possible dans les prochaines années. Ces missions sont très fortement à considérer, car elle peuvent potentiellement conduire à un très fort retour scientifique pour un investissement en coût et RH limité.
 - *Spectroscopie dans l'UV* : la couverture dans ce domaine sera limitée dans l'ère après HST, alors que c'est un domaine d'intérêt pour plusieurs thématiques HE (objets compacts, transitoires comme les kilonova). La communauté française (notamment stellaire) est impliquée dans le développement du nanosatellite **CASSTOR**, démonstrateur de la mission POLLUX (spectro-polarimètre UV-Visible à haute résolution pour la mission HWO de la NASA, pour « Habitable Worlds Observatory », prévu pour la décennie 2040). D'autres missions UV, comme **ULTRASAT** (« Ultraviolet Transient Astronomy Satellite ») en Israël (lancement planifié pour 2027), ou **UVEX** (« UltraViolet Explorer ») aux USA (prévu pour 2030), apporteront néanmoins déjà des informations dans ce domaine.

SPATIAL		
Priorité	Justification / commentaire	Défis / thématiques cibles
P0 : <u>(New)Athena</u>	Mission L2 ESA, adoption définitive prévue en 2027 : caractéristiques uniques (grande surface efficace, haute résolution spectrale, grand champ de vue), multi-thématiques et trans-PN	Univers extrême Transitoires/multi-messagers Nouvelle physique
P0 : <u>THESEUS</u>	Mission en compétition M7 ESA : observatoire grand champs crucial pour astronomie transitoires + continuité positionnement France dans paysage de l'astronomie des transitoires	Transitoires/multi-messagers Univers extrême
P1 : Missions au MeV (COMCUBE, GRINTA, e-Astrogam, etc.)	Fenêtre d'observation très mal couverte (faible sensibilité instruments actuels / passés) : domaine d'importance pour l'émission de certains objets (AGN, GRB, pulsars, ...) pour la spectroscopie nucléaire (nucleosynthèse)	Univers extrême Transitoires/multi-messagers Nouvelle physique
P1 : Missions d'opportunités APEX NASA (STROBE-X, HEX-P, AXIS...) ou chinoises (e-XTP, CATCH)	Retour scientifique potentiellement significatif pour un investissement français RH et financier limité. Enjeu de la polarimétrie X.	Univers extrême Transitoires/multi-messagers
P1 : Missions UV (CASSTOR)	Besoin de couverture du domaine UV après HST	Univers extrême Transitoires/multi-messagers

Table 3. Priorisation des instruments spatiaux d'importance pour les thématiques HE.

3.5 Perspectives de l'astronomie HE en France

Évolutions structurelles de l'INSU-AA : restons vigilants !

L'astronomie-astrophysique (AA) à l'INSU va vivre une évolution structurelle qui sera mis en place fin 2024/courant 2025. Afin de se rapprocher des structures existantes dans les autres domaines de l'INSU, le domaine AA sera ainsi chapeauté par une commission Spécialisée (l'actuelle CSAA) mais celle ci sera responsable d'un unique Programme National AA (PNAA). Les actuels PN (mis à part le PNP qui sera un PN transverse) deviendront des Actions Thématiques (AT) et les CS des Comités d'Expertises Scientifiques (CES). Si, sur la forme, le changement ne paraît pas conséquent, il convient d'être extrêmement vigilant sur les prérogatives qui seront données à ces AT (et leurs CES) et ses articulations avec l'échelon inférieur (la communauté) et supérieurs (le PNAA et la CSAA). En effet, nonobstant le fait que ce changement ait été présenté aux PN de manière concomitante à l'exercice de prospective, et sans aucune concertation avec les premiers concernés (les PN), les détails de la nouvelle organisation sont restés très longtemps flous avec, a priori, peu de marge de manœuvre (de nombreux échanges ont eut lieu durant toute la durée d'écriture de ce rapport).

À titre d'exemple, un des changements proposés est la mutualisation des actions d'animation au niveau de la CSAA et de faire des PN de simples panels d'évaluations des demandes de financement annuelles. Ceci a été très contesté par tous les PN. En effet, l'animation scientifique est une composante très importante des actions des PN actuels, à travers la subvention d'écoles/colloques ainsi que via l'organisation par les PN eux-mêmes de colloques pour l'ensemble de leur communauté. Pour notre cas, 30% des demandes déposées le sont pour des écoles/colloques (voir [ici](#)). Nous organisons aussi des Journées du PNHE tous les deux ans, intercalées avec des Journées Théories. Des ateliers sont également régulièrement organisés par les membres du CS du PNHE lors des journées de la SF2A (voir [ici](#)). Les actuels PN (et donc futures AT) semblent donc être les mieux placés pour poursuivre une grande partie de cette animation scientifique. Reste que dans la prochaine structure INSU-AA, la gestion de l'animation sera maintenant faite à la CSAA. Même si des membres des différents AT feront partie de la CSAA il n'est pas du tout clair de savoir comment les demandes d'animation seront jugées et avec quel budget elles seront soutenues. Il convient donc d'être extrêmement vigilant sur la manière dont cela sera mis en place (dès l'AàP 2025).

Les détails de la mise en œuvre de cette réforme se précisera probablement sur l'année à venir (donc probablement après la fin de cet exercice de prospective). Le futur ex-CS du PNHE sera attentif à ces changements. Il pourrait y avoir des aspects positifs à cette réforme, comme une vision plus globale et transparente, par exemple, de la répartition des budgets entre divers AT (qui pourra être réglée au niveau du PNAA et CSAA où siègeront les futur.e.s. responsables des AT). Les demandes proposées à l'intersections de plusieurs PN (comme c'est le cas pour de nombreuses écoles et colloques), pourraient aussi être évaluées de manière plus efficace et moins redondantes au niveau du PNAA, ce qui faciliterait aussi l'émergence de sujet inter-AT. Mais il faudra s'assurer que ces bénéfices ne s'accompagneront pas d'effets pénalisant dommageables à la dynamique actuelle des communautés dans ces AT.

Un point à suivre avec attention sera l'évolution de l'appel d'offre. Un minimum de 5 k€ va être maintenant imposé pour toutes demandes faites aux AT. Ce montant n'est pas adapté aux demandes de notre communauté et au budget à disposition du PNHE. Sans augmentation de ce budget à disposition des AT, le CS se verra contraint de sélectionner seulement quelques demandes (en faisant donc aussi des choix de politique scientifique) en dépit de l'action des résultats actuels de l'appel d'offre du PNHE, et que plébiscite pourtant la communauté (voir le document du Groupe de Travail III.4 - Organisation nationale, articulation Europe et International sur ces questions). Une solution à ce minimum de 5 k€ est d'envisager plus souvent des projets pluriannuels, pour lesquels il est plus facile de justifier de tels montants. Or, le budget à disposition du PNHE est toujours établi sur l'année, et le CS ne peut donc pas garantir des financements pour les années suivantes. Ce point est à éclaircir le plus rapidement possible, d'autant plus que la pluriannualité ne garantit pas forcément la qualité scientifique. Vu la nature des demandes que nous recevons et le budget limité à disposition du CS, nous préférierions voir l'avancement d'une demande d'une année à l'autre et renouveler notre soutien si elle le mérite, plutôt que de s'engager sur un soutien sur plusieurs années. Ces aspects sont donc également à suivre avec vigilance.

Réflexion sur les moyens d'observations disponibles et à venir

De nombreux instruments, existants et à venir, sont et seront d'utilité majeure pour les thématiques HE. Il est important de se projeter vers une utilisation plus optimale et parcimonieuse de ces instruments, étant donné la finitude des moyens humains et financiers. Cette réflexion est également importante pour comprendre comment mieux exprimer et quantifier les besoins de la communauté HE en termes de soutien par les SNO.

Le GT III.1 de la prospective (*Les Moyens prioritaires*) a mené une action pour recenser les activités de la communauté AA autour des alertes, le but étant d'optimiser ces activités et de faire en sorte qu'elles puissent être clairement reconnues comme service d'observation. Vu que de très nombreuses thématiques du PNHE sont liées à l'astronomie du ciel transitoire, le PNHE a participé à cette action en interrogeant sa communauté sur les besoins observationnels optimaux (en termes de longueur d'ondes, résolution spectrale, couverture du ciel, magnitude limite, résolution temporelle, temps de pointage) pour un suivi sol des différents transitoires connus (GRB, FRB, TDE, QPE, etc.). Une fois recueillis, ces besoins observationnels ont été comparés à l'offre observationnelle des différents instruments développés par la communauté AA française. Le bilan se trouve dans le document de ce groupe de travail GT III.1. En résumé, il apparaît assez clairement qu'il existe un nombre important d'instruments français adaptés au suivi sol des transitoires. Ces instruments ont cependant des caractéristiques assez similaires en termes de magnitude limite, résolution spectrale, longueur d'onde, champs de vue, etc. L'objectif étant de mettre en place un SNO dédié au suivi des transitoires, il serait donc intéressant de voir si leur utilisation pourrait être optimisée, par exemple en reliant les stratégies d'observations plutôt que chaque instrument ait la sienne propre. Ce travail de recensement des instruments d'intérêt pour l'astronomie des transitoires a également permis de voir qu'il semblait manquer de télescopes équipés de spectromètre mais capables d'observer l'hémisphère Nord. Des caméras grand champ en IR sont aussi absentes de la liste des instruments existants, alors que cela serait sûrement très pertinent pour la détection et les suivi des transitoires. Ce sont des axes de réflexion à mener pour de futurs instruments.

La France fournit également un investissement majeur dans les instruments de l'ELT. Il est probable que ces instruments puissent également apporter une contribution unique à certaines thématiques du PNHE, et la communauté HE commence à s'intéresser aux performances de ces instruments. L'INSU-AA a mis en place un comité de suivi et d'animation scientifique par l'INSU-AA, réunissant des personnes de chaque PN responsable du suivi de l'ensemble des instruments ELT. Alexis Coleiro, de l'APC, est le représentant pour le PNHE, et il est déjà intervenu au CS du PNHE pour rendre compte des premières avancées. Il a aussi fait une présentation sur les liens entre l'ELT et les thématiques du PNHE aux dernières journées PNHE en 2023. C'est une action à continuer.

Actions pour la visibilité et la pérennité de la communauté HE

Avec l'évolution structurelle de l'INSU-AA et des PN, il faudra vraisemblablement redoubler d'efforts et de vigilance pour faire comprendre qu'un changement organisationnel imposé sans besoin identifié est (et sera toujours) de nature à déstabiliser l'existant qui marche (et qui est largement plébiscité par la communauté). Par ailleurs, il faudra continuer à mener des actions pour faire connaître le PNHE à un plus large nombre de chercheur.e.s non permanents et solliciter leur inscription. En effet, une partie de ces jeunes seront les chercheuses et chercheurs des années à venir. Il est donc fondamental que ces personnes soient insérées le mieux possible au sein de la communauté et mis au courant des actualités en cours. Cela nous permettra aussi d'avoir une perception plus complète de la composition de notre communauté ; la mise en place d'un nouveau site web (<https://pnhe.cnrs.fr/>) va dans ce sens.

Au niveau organisationnel et ressources humaines, des évolutions et besoins forts restent en suspens :

- **Budget** : comment s'assurer d'un budget pérenne de l'INSU (voire croissant) et de ses partenaires (CNES, CEA et INP), et comment convaincre l'IN2P3 de ne pas se désengager financièrement du PNHE ? Ce rapport d'activité espère montrer l'excellence et la dynamique de la communauté auprès de l'INSU. Sur le second aspect, nous continuerons de discuter et d'argumenter avec les représentant.e.s au niveau des instituts. En particulier, nous devons convaincre encore plus la ou le DAS

Astroparticules et Cosmologie de l'IN2P3 de l'importance du soutien financier. À cet égard, nous espérons que le GT II.3 de la prospective (*AA à l'interface INSU-IN2P3-INP*) apportera des éléments d'organisation pour une meilleure coordination dans les actions de soutien.

- **SNO** : nous l'avons dit, les thématiques multi-messagers, et plus encore les transitoires, sont à l'interface et nécessitent un très grand nombre d'instruments et de ressources humaines pour optimiser l'utilisation de ces instruments et de leurs données. L'organisation actuelle des SNO ne permet pas vraiment de répondre à ces besoins qui reposent sur des actions multi-instruments plutôt que ciblées sur un seul instrument comme le sont la plupart des SNO actuels. Le travail conjoint mené avec le GT III.1 (*Les Moyens prioritaires*), décrit plus haut, devrait permettre de donner des pistes pour prioriser ces besoins. Nous regarderons aussi avec attention les conclusions et recommandations du GT III.4 (*Organisation Nationale, articulation Europe et Internationale*), qui a interrogé l'ensemble des PN, sur ces questions (entre autres).
- **Formation** : la communauté PNHE est constituée à 1/3 d'enseignant.e.s chercheur.e.s et professeur.e.s, qui connaissent donc bien les problématiques et l'évolution des méthodologies de cette thématique. Nous devons certainement faire plus d'effort (et pourquoi pas de propositions) pour sensibiliser encore plus nos collègues à cette problématique, pour qu'ils essaient de peser dans le programme de constitution des plaquettes d'enseignement en Master. La communauté pourrait aussi tenter de proposer plus de cours d'école doctorale dans ses thématiques (nous n'avons d'ailleurs pas fait de recensement sur la question). Nous lirons avec intérêt les conclusions et recommandations du GT II.2 (*Les moyens de l'astronomie : l'enseignement et l'astronomie*). Au niveau du CS et des AàP, nous continuerons à apporter un fort soutien aux écoles thématiques, très demandées et appréciées par la communauté.
- **Recrutement** : les domaines de recherches se complexifient, mettent en œuvre des techniques toujours plus diverses, auprès d'un nombre d'instruments toujours plus grand. Si cette évolution n'est pas nouvelle et si les grandes questions et défis peuvent toujours se formuler en tant que questions AA, le chemin vers la résolution de ces questions, en tout cas dans les thématiques HE, emprunte de plus en plus des voies transverses, en collaboration avec des chercheur.e.s d'autres instituts (dont les critères de recrutement sont par ailleurs différents et via des sections CNRS différentes). La visibilité des jeunes chercheurs travaillant sur ces thématiques n'est pas évidente du fait de leur profil multi-instituts, ce qui joue souvent contre eux lors des concours de recrutement. Il faut donc travailler à faire reconnaître la spécificité de ces candidats pour espérer de futurs recrutements. Là aussi, le GT II.3 de la prospective (*AA à l'interface INSU-IN2P3-INP*) pourrait apporter des pistes.

Annexe A : Laboratoires des membres de la communauté PNHE

Liste des laboratoires ayant des membres inscrits sur la liste de diffusion du PNHE. Le nombre de membres par laboratoire est indiqué dans la seconde colonne.

CEA	
IRFU Saclay	34
INP	
LAPTh Annecy-le-vieux	3
INSU	
CRAL Lyon	2
IAP Paris	17
IPAG Grenoble	12
IRAP Toulouse	20
LAM Marseille	5
LPC2E Orléans	7
Observatoire Côte d'Azur	4
Observatoire Paris Meudon	20
Observatoire Strasbourg	5

IN2P3	
APC Paris	23
CPPM Marseille	9
IJCLab Orsay	11
IPHC Strasbourg	2
IP2I Lyon	1
LAPP Annecy-le-vieux	7
LLR Palaiseau	6
LPC Caen	1
LPC Clermont	1
LPNHE Jussieu	8
LPSC Grenoble	5
LP2I Bordeaux	8
LUPM Montpellier	12
IPHC Strasbourg	2
SUBATECH Nantes	5

Annexe B : Liste ANR et financements Européens depuis 2021

Projets ANR acceptés (depuis 2021)

- MOTS « Multimessenger Observations of the Transient Sky », 579 k€ (F. Schussler)
- GW-HNS « Émission d'ondes gravitationnelles d'étoiles à neutrons chaudes et les propriétés de la matière ultra-dense » 375 k€ (M. Oertel)
- COSMERGE « Les coalescences de trous noirs : un nouvel éclairage sur l'évolution stellaire et la formation stellaire globale » 342 k€ (A. Lamberts)
- MICRONG « Miroirs CRistallins pour les détecteurs d'ONdes Gravitationnelles » (R. Flaminio)
- PEGaSUS « Sonder et explorer les galaxies lointaines grâce aux sursauts gamma détectés par SVOM », 600 k€ (S. Vergani)
- StronG « Gravitation en Champ Fort et Trous Noirs : Images, Modes Quasi-Normaux et Binaires », 392 k€ (K. Noui)
- TOSCA « Lentilles gravitationnelles faibles pour la cosmologie : optimisation de la synergie entre Euclid et SKA », 538 k€ (JL Starck)
- DIRECTA « Apprentissage profond en temps réel pour CTA » 332 k€ (T. Vuillaume)
- MICRO « Exploration multi-messenger de l'origine des rayons cosmiques », 445 k€ (C. Berat)
- MiCRO « Micro-physique des observables de rayons cosmiques » (S. Cerri)
- CLINM « Caractérisation physique et chimique de la fragmentation des rayonnements cosmiques », 417 k€, (M. Vanstalle)
- MBH_Waves « Fusions de trous noirs massifs : lumière et ondes gravitationnelles », 567 k€ (M. Volonteri)

Financements Horizon Europe

- INFRA-2023-SERV ACME « Astrophysics Centre for Multi-messenger studies in Europe », 15 M€
- CL4-2023-SPACE SPEARHEAD « SPECification, Analysis & Re-calibration of High Energy pArticle Data », 1.4 M€
- KM3NET-INFRADEV2 « Towards full implementation of the KM3NeT Research Infrastructure », 1.5M€
- ET-PP « Preparatory Phase for the Einstein Telescope Gravitational Wave Observatory », 3.4 M€