

Prospective 2024 - PNCG

Table des matières

I - Cartographie de la communauté PNCG.....	2
Méthodologie.....	2
Résultats.....	3
Démographie.....	3
Méthodes et thèmes.....	4
Interdisciplinarité.....	5
Moyens.....	6
II - Résumé Exécutif.....	10
Les grandes questions, et le multi-échelle.....	10
La richesse de nos observatoires et de nos méthodes.....	11
Multidisciplinarité.....	13
SWOT.....	13
III - Pavage thématique, cosmologie, galaxies.....	14

I - Cartographie de la communauté PNCG

Méthodologie

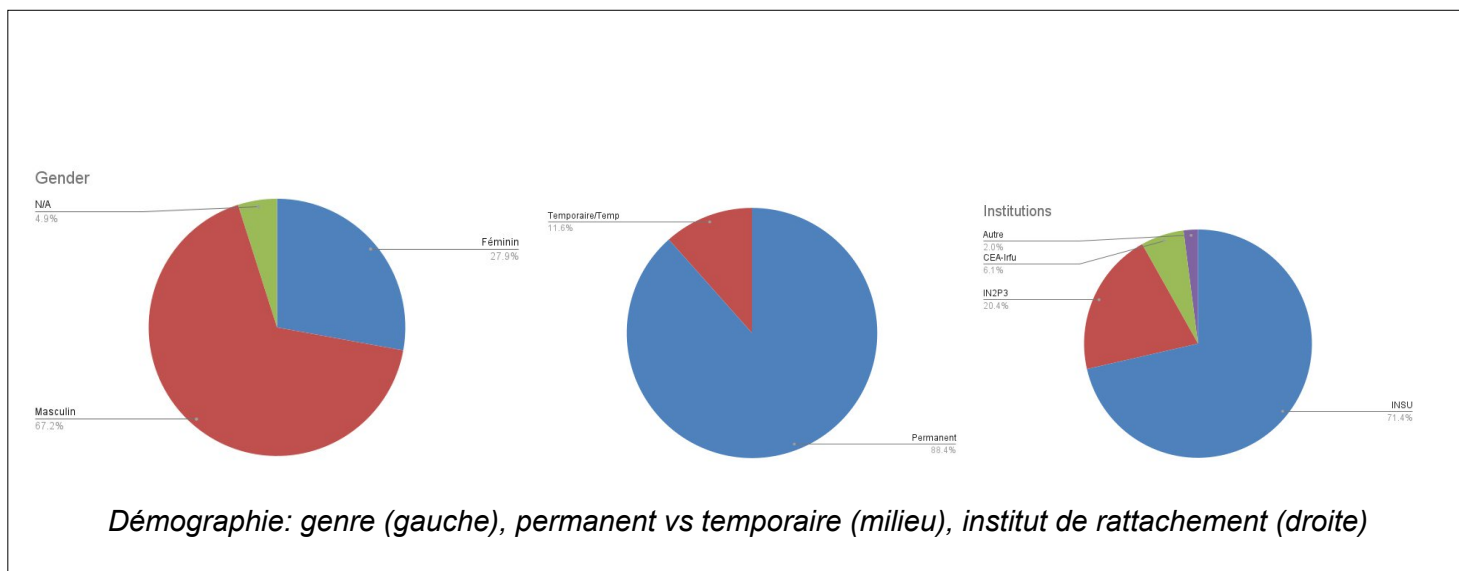
Fin 2023, un sondage a été envoyé à la newsletter PNCG (427 abonnés) afin de récolter des éléments de prospective. Ce sondage s'inspire très grandement des autres sondages qui ont été menés auprès de la communauté par les autres PN, et en particulier le PNHE. Les questions incluaient quelques éléments de démographie (genre, catégorie), des questions sur l'appartenance à nos commissions thématiques et au domaine de recherche, les projets Sols et Spatiaux utilisés lors des dernières années, et les moyens pressentis pour les dix ans à venir. Finalement, le sondage incluait aussi des questions ouvertes: « qu'est-ce qui est le plus susceptible de changer la discipline ? », « quel est le plus gros challenge pour notre discipline ? », et « pouvez vous citer UNE grande question actuelle ? ». Dans la suite de cette section, nous proposons plusieurs figures illustrant les réponses à la plupart des questions, à l'exception des questions ouvertes, qui ont été synthétisées et intégrées dans le résumé exécutif présenté dans la section suivante.

La curation a été effectuée par le bureau du PNCG et les résultats discutés dans le conseil scientifique du PNCG. Ces résultats (en tenant compte des biais possibles) et les nombreuses discussions au sein du conseil scientifique du PNCG ont permis de définir les priorités scientifiques de notre communauté et de préparer le résumé exécutif (partie II) qui a été transmis au groupe de prospective thématique et interdisciplinaire INSU 2024. Ils ont aussi été utilisés dans nos discussions pour préparer les réponses du PNCG aux requêtes de priorités du groupe moyen de la prospective, et du CNES.

Résultats

Démographie

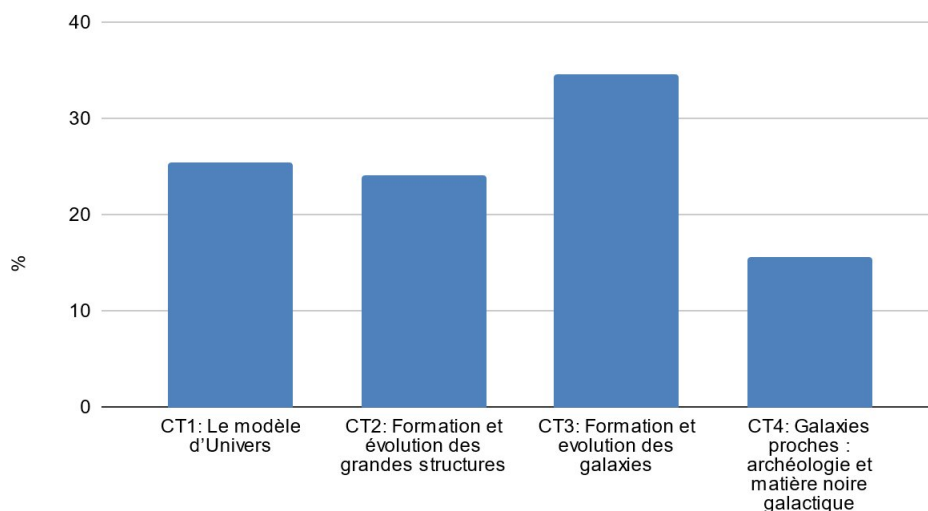
La figure ci dessous rapporte la démographie des 123 personnes ayant répondu. Nous pensons que la distribution des genres est semblable à celle de la communauté. L'INSU est probablement légèrement sur-représenté dans les instituts de rattachement, puisque l'exercice était fait dans le cadre de sa prospective, ce qui a pu être moins motivant pour le personnel des autres partenaires. Les réponses sont dominées par celles des membres permanents, les personnels temporaires ayant très peu répondu à notre sondage, se considérant très probablement moins concerné ou pertinents concernant les évolutions à long terme et la prospective.



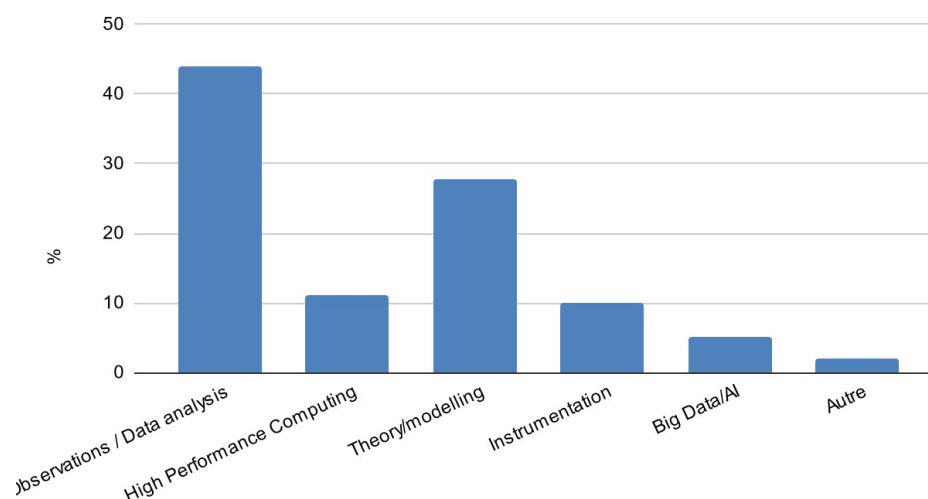
Méthodes et thèmes

Les participants au sondage ont pu donner les commissions thématiques auxquelles ils se sentent appartenir (voir aussi la dernière section de ce document sur le pavage thématique du PNCG), et donner leur méthodologie de travail. Les pourcentages correspondant sont montrés dans la figure suivante qui montre une répartition thématique assez uniforme, et des méthodes centrées sur l'observation et l'analyse de données, et la simulation d'autre part.

Commission Thématique



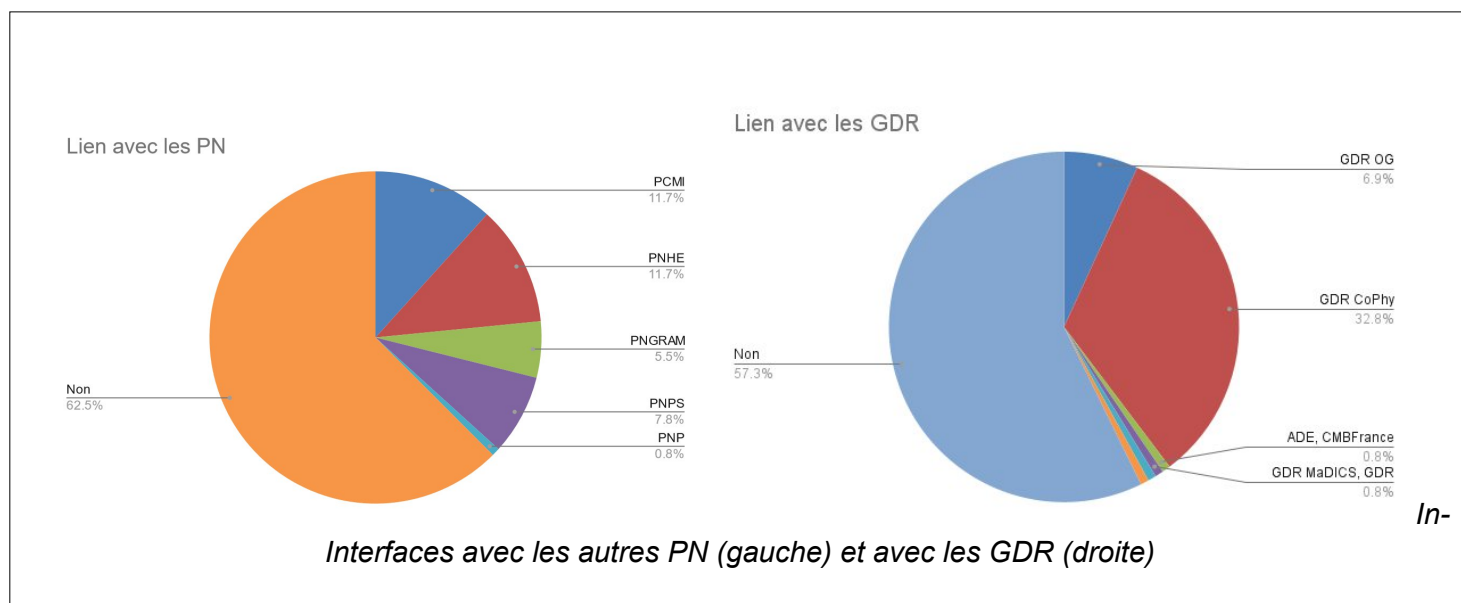
Méthodologie de Travail



*Méthodes et thèmes: appartenance aux 4 commissions thématiques du PNCG (haut),
et méthodes utilisées (bas)*

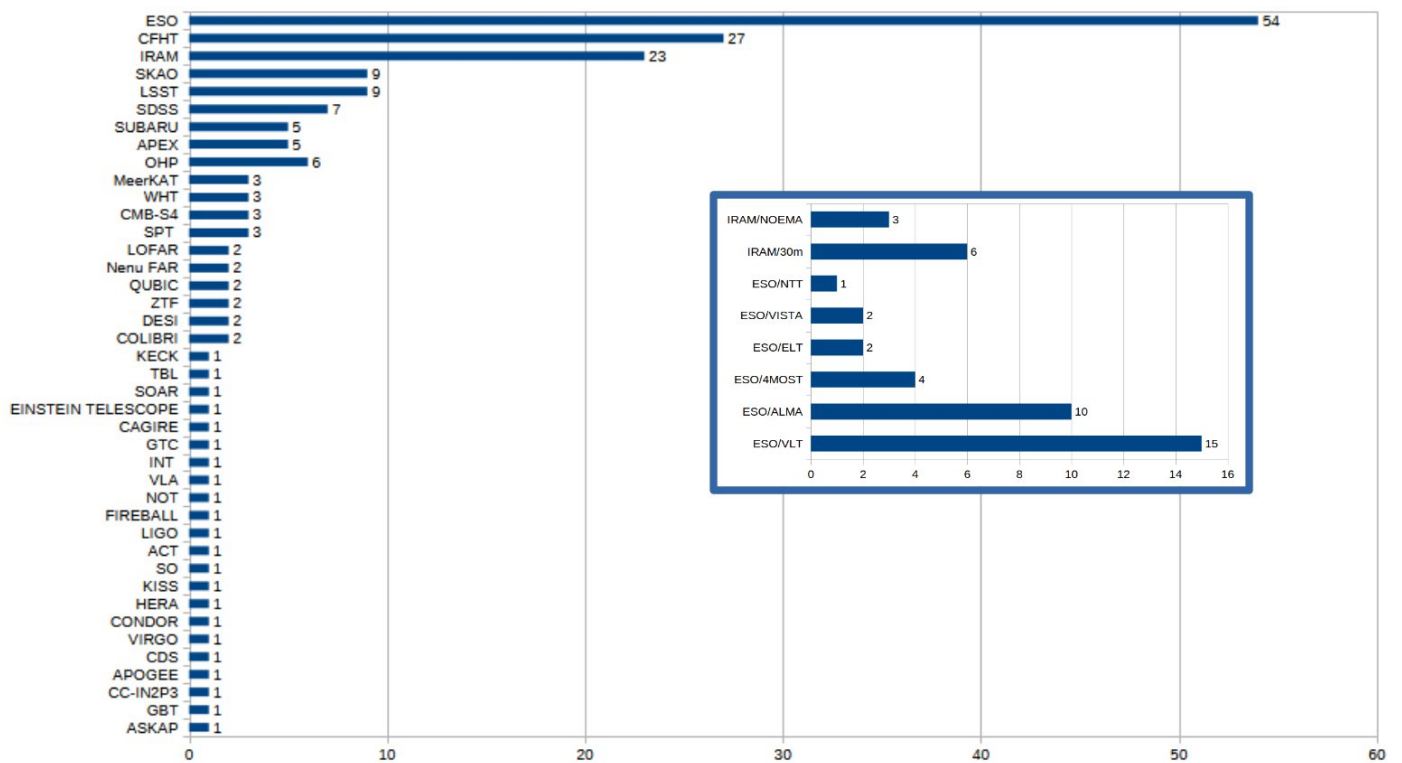
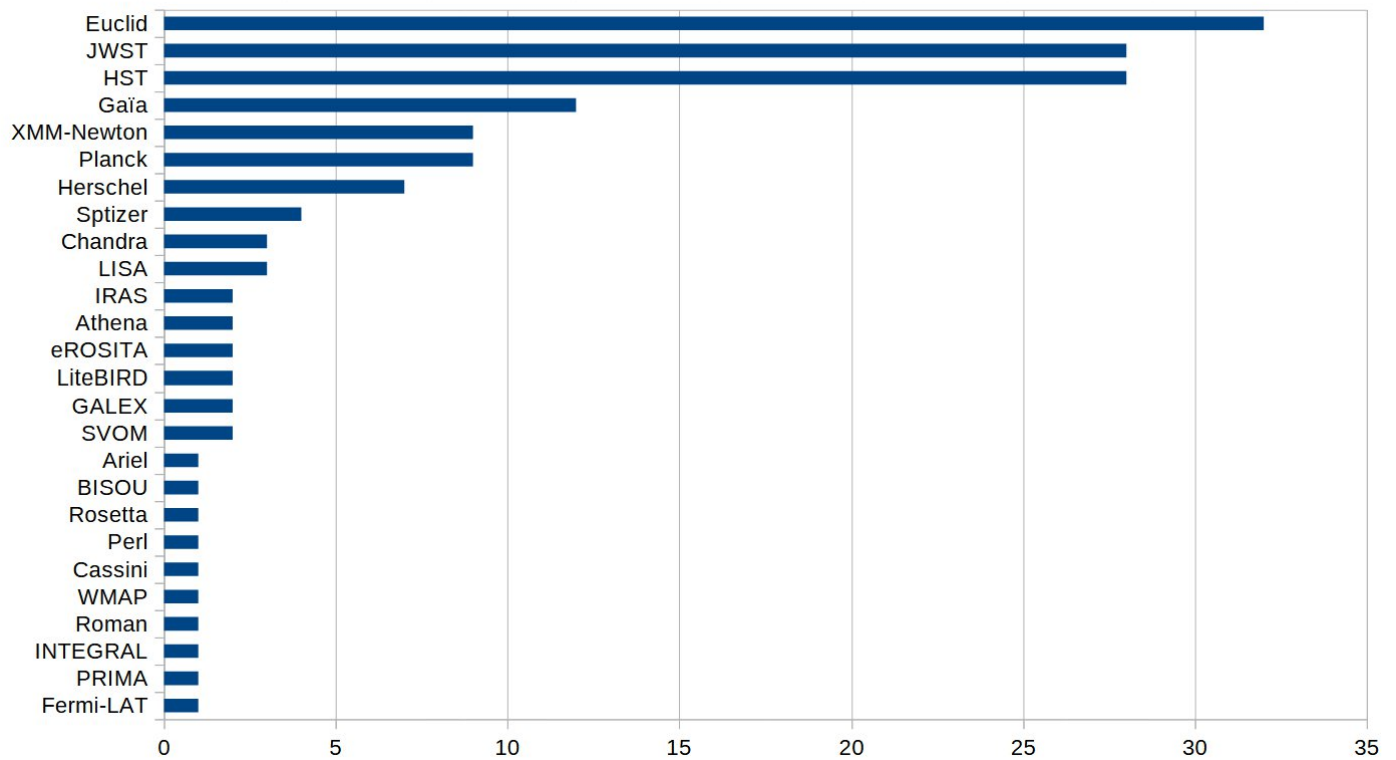
Interdisciplinarité

Le sondage permettait de nous informer sur les interactions avec les autres PN et GDR. Les résultats sont montrés dans la figure suivante, démontrant de nombreuses interfaces avec presque tout les PN (sauf le PNP). Les liens avec les GDR, démontrent une très grande perméabilité entre le PNCG (CT1 et 2) et le GDR Cosmological Physics (le nombre de personnes ayant mentionné le GDR CoPhy est supérieur au nombre de personne s'étant identifiée dans la CT1 : une partie de la CT2 se retrouve bien dans la cosmologie et ses interfaces). Les liens avec les actions spécifique ne sont pas montrés ici, mais 15 % des réponses nomment la nouvelle AS numérique et 8% l'action SKA-LOFAR.

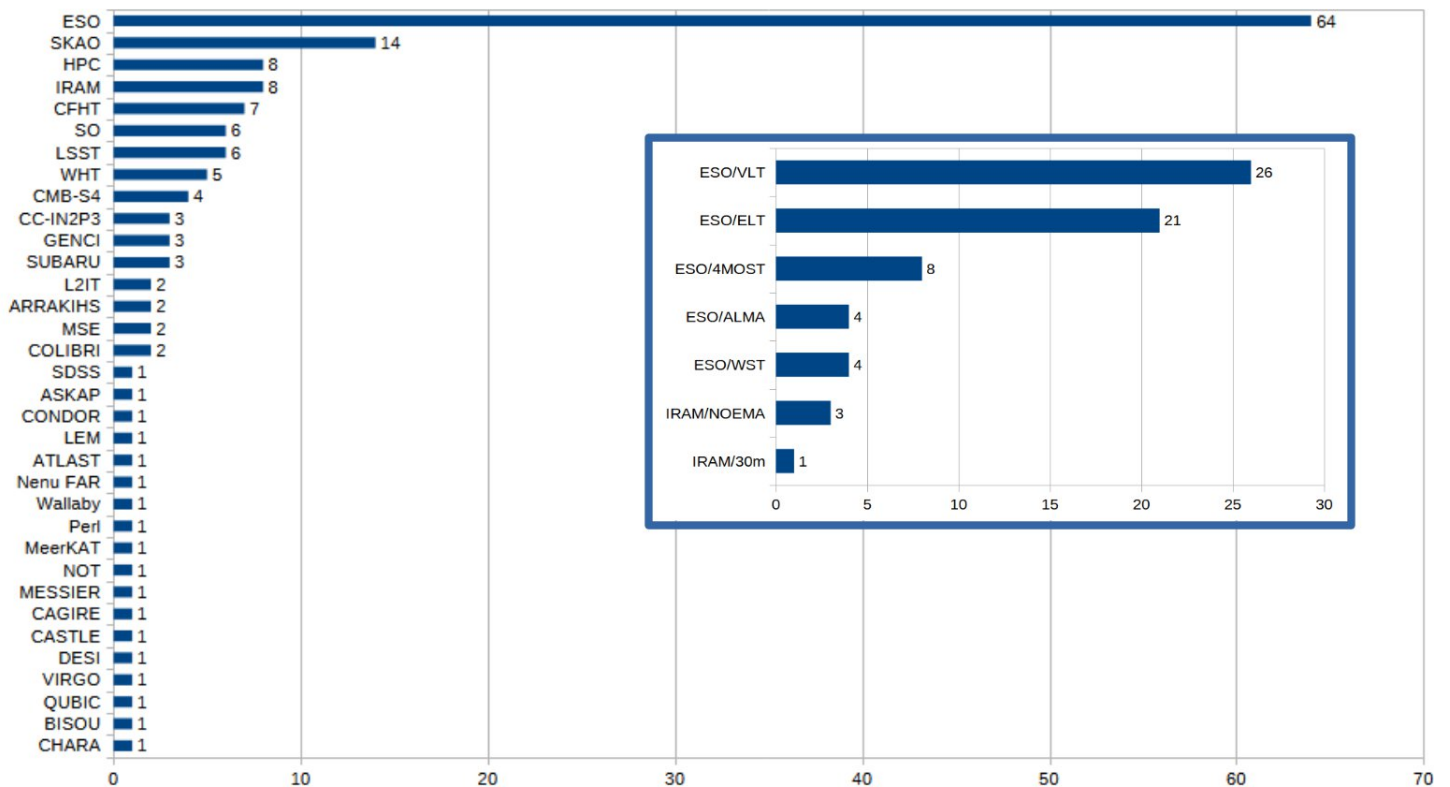
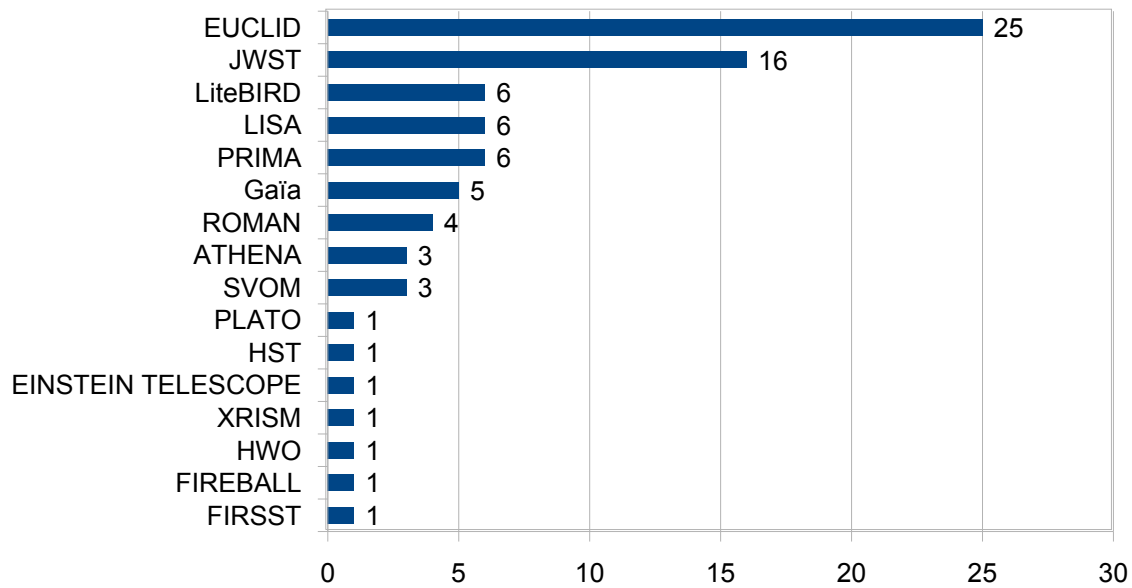


Moyens

La figure suivante donnent les moyens utilisés en 2018-2023. Celle d'après montre les moyens que les participants au sondage ont prévu d'utiliser (ou sur lesquels ils prévoient de travailler) dans les 5-10 ans à venir.



Moyens utilisés dans la période 2018-2023 dans l'espace (haut) et au sol (bas). L'insert donne le détail pour l'ESO et l'IRAM quand il est connu (les nombres sont cumulés dans le graphe précédent)



Moyens pour les prochains dix ans dans l'espace (haut) et au sol (bas). L'insert donne le détail pour ESO et IRAM lorsque qu'il est explicité.

II - Résumé Exécutif

Le Programme National Cosmologie et Galaxie (PNCG) rassemble plusieurs centaines de chercheuses et chercheurs couvrant un large éventail thématique, des galaxies résolues en populations stellaires de la Voie Lactée au groupe local, de l'évolution des galaxies, des amas de galaxies et des grandes structures de l'univers, et jusqu'à la cosmologie, en y incluant l'estimation des paramètres cosmologiques et les développements théoriques concernant l'univers primordial.

La période écoulée a été très riche pour ces thèmes de recherche, avec l'acquisition de nouvelles données provenant d'instruments dédiés ou très utiles à nos sujets, et avec le démarrage de nouvelles missions ouvrant de belles perspectives. **Planck** a publié ses derniers résultats en 2018, établissant le modèle cosmologique de référence. La communauté française a été fortement impliquée dans la mesure de ces paramètres cosmologiques, ainsi que dans la modélisation des avant-plans galactiques. Dans le domaine de l'évolution des galaxies, la mise en place du spectrographe à intégral de champ **MUSE** sur le VLT a constitué une avancée majeure dans beaucoup de domaines, permettant, par exemple, de détecter l'émission diffuse du gaz ionisé dans le milieu circumgalactique et les filaments cosmiques, révélant ainsi les liens complexes et jusqu'alors peu visibles entre les grandes structures de l'univers et les galaxies. Les interféromètres **ALMA** et **NOEMA**, et l'instrument **NIKA-2** au foyer du 30m de l'IRAM, ont ouvert la voie à l'étude du gaz et de la poussière dans les galaxies proches et lointaines, ingrédients qui se sont révélés être essentiels dans la régulation de leur formation d'étoiles. De nombreux programmes d'observations sur cette thématique ont vu le jour, dans lesquels la communauté a joué un rôle de premier plan : ALPINE, Z-GAL, IMEGIN. L'approche multi-longueurs d'onde et multi-échelles permise par la complémentarité de MUSE / ALMA / NOEMA, et maintenant JWST, est particulièrement visible dans les résultats de l'équipe PHANGS sur les galaxies proches (à l'interface avec le PCMI). Ces résultats illustrent également la synergie entre les études détaillées des galaxies locales, qui sont ensuite utilisées pour interpréter les études statistiques sur l'évolution des galaxies lointaines. Les données de **Gaia** (à l'interface avec le PNPS) ont fourni des résultats remarquables sur la Voie Lactée, grâce à ce catalogue de plus d'un milliard d'étoiles avec photométrie, parallaxes et mouvements propres, en accès public. On notera en particulier la découverte de nombreux courants stellaires qui tracent l'histoire de l'assemblage chemo-dynamique de la Voie Lactée. La communauté PNCG est aussi impliquée dans des campagnes de simulation cosmologique et de formation des structures toujours plus complexes (**Horizon suite**, **SPHINX**, **Euclid Flagship Simulations**), qui permettent de confronter les grands volumes d'observations aux attentes théoriques. Enfin, le lancement de **JWST** a déjà apporté son lot de découvertes (comme la formation de galaxies massives et de trous noirs supermassifs à très grands redshifts), et le lancement réussi d'**Euclid** promet pour les années à venir une manne de données pour les mesures cosmologiques et l'évolution des galaxies.

Les chercheuses et chercheurs du PNCG obtiennent d'excellent résultats dans ces domaines de recherche, comme en attestent les articles qu'ils publient, les prix qu'ils reçoivent (par exemple : une médaille d'or CNRS, 2 médailles d'argent CNRS et de nombreuses autres distinctions nationales ou internationales) et leurs succès aux appels d'offre européens et nationaux. Sur la période de référence, nous avons comptabilisé (probablement de manière incomplète) : 4 ERC, 24 ANR, et un fort soutien du CNES à divers projets (SVOM, Euclid, Gaia, LiteBIRD) et à l'exploitation de données spatiales (HST, JWST, XMM).

Les grandes questions, et le multi-échelle

Grâce aux avancées théoriques et aux nouvelles observations des télescopes existants, futurs et en projet, de grandes perspectives scientifiques s'ouvrent, qui s'articuleront autour de quatre grandes questions aux différentes échelles qui structurent la communauté du PNCG. Aux plus grandes échelles, la question fondamentale de **l'expansion de l'Univers (avec la nature de l'énergie noire et de l'inflation)** se pose naturellement. Cette vaste question nécessite de

connaître l'équation d'état de l'énergie noire, et de faire le lien avec les nouveaux développements théoriques. Pour y répondre, des mesures précises de la polarisation du fond diffus cosmologique et une cartographie 3D de l'univers à travers des relevés de galaxies sont nécessaires. Si ces mesures sont à la portée des instruments futurs (voir les ressources ci-dessous), elles nécessiteront une maîtrise sans précédent des effets systématiques, notamment ceux introduits par les avant-plans extra-galactiques et galactiques (à l'interface avec le PCMI). Ce point illustre l'interdisciplinarité du PNCG - comprendre la physique des galaxies et des amas de galaxies en tant qu'objets astrophysiques, afin de pouvoir aussi les utiliser comme sondes cosmologiques - et est au cœur de notre deuxième grande question, qui concerne les **relations entre la physique des baryons et celle de la matière noire dans la formation des galaxies et des grandes structures**. Là encore, une cartographie 3D de l'univers sera nécessaire, retraçant l'histoire de la réionisation et l'évolution des grandes structures sur une large gamme de redshifts. Cette cartographie devra inclure une détermination encore plus détaillée des propriétés des galaxies elles-mêmes, et en particulier celles relatives à la physique du cycle des baryons (via la détection de gaz en émission ou en absorption), dont l'inclusion dans les modèles est décisive pour la compréhension de l'évolution des galaxies et de leur lien avec l'environnement et les grandes structures. Ceci exigera aussi le développement de nouvelles simulations exascales offrant une meilleure description multi-phase et multi-échelle des processus physiques à l'œuvre dans ces structures. Ces simulations seront basées en partie sur les résultats des études relatives à notre troisième grande question, qui porte sur **la compréhension des processus de couplage à toutes les échelles à partir de l'observation des galaxies proches**. En effet, alors que les simulations font aujourd'hui appel au couplage stellaire et au couplage des trous noirs supermassifs pour reproduire les propriétés des galaxies, les preuves observationnelles de ces processus restent à trouver. Dans les années à venir, le travail entre théoriciens et observateurs pour définir les signatures directes de ces processus de couplage pourrait révéler leur présence dans les observations à haute résolution spectroscopique et spatiale des nouveaux observatoires. Ces enseignements, acquis grâce à des études détaillées des galaxies locales, seront ensuite utiles pour l'interprétation de grands échantillons de galaxies lointaines. Enfin, aux plus petites échelles couvertes par le PNCG, se posera la question du **décryptage de l'assemblage chemo-dynamique de la Voie Lactée et des galaxies du groupe local (et au-delà)**. Si Gaia a démontré son potentiel pour déchiffrer l'assemblage de la Voie Lactée, une difficulté réside dans la comparaison de notre galaxie au bestiaire extra-galactique, et dans le suivi de son histoire d'accrétion de masse et l'impact sur sa formation stellaire. Dans les années à venir, des progrès importants seront réalisés par les simulations, qui devraient pouvoir représenter le groupe local en détail, en tenant compte des contraintes observationnelles actuelles et futures, et dans l'extension des méthodes d'archéologie galactique au-delà du groupe local, reliant ainsi les études galactiques et extra-galactiques.

La richesse de nos observatoires et de nos méthodes

Le large éventail de sujets de recherche couverts par le PNCG se traduit par une grande diversité dans les méthodes et les observatoires utilisés pour atteindre nos objectifs scientifiques. Néanmoins, quelques grandes lignes peuvent être tracées. Environ la moitié de notre communauté est impliquée dans ce que l'on appelle **l'astrophysique observationnelle** (50%), qui applique des méthodes de pointe de traitement et d'analyse des signaux à de vastes ensembles de données multi-longueur d'onde, pour ensuite comparer ces observables à des modèles physiques théoriques, et où l'utilisation de l'intelligence artificielle commence à émerger. Les observatoires utilisés dans ces études illustrent les deux approches complémentaires employées par cette communauté : d'une part, l'étude minutieuse d'un petit nombre d'objets à partir d'observatoires à haute résolution angulaire et spectrale (**HST, JWST, Gaia, VLT, ALMA, IRAM/NOEMA**), et d'autre part, des études statistiques à grande échelle utilisant des instruments offrant de grands champs de vue (**Planck, CFHT, XMM, Herschel, IRAM/30m**). Naturellement, l'interprétation de ces observables requiert **des développements théoriques et des simulations**, qui occupent environ 40% de la communauté du PNCG. Elle demande également un dialogue permanent et le développement d'outils communs entre ces deux communautés, afin d'obtenir des comparaisons pertinentes entre observations et

modèles théoriques. Si le déploiement de simulations toujours plus complexes nécessite des super-calculateurs tels que ceux du **GENCI**, cette demande se fait aussi sentir pour le traitement de volumes de données toujours plus importants (**CC-IN2P3**). Enfin, 10% de la communauté du PNCG est impliqué dans le **développement instrumental**, essentiel à nos recherches.

Pour répondre aux questions clés mentionnées ci-dessus, les chercheurs du PNCG s'appuieront à l'avenir sur les observatoires multi-longueur d'onde existants, en construction et en projet. La communauté PNCG travaillant sur la cosmologie est concentrée sur l'analyse des données des grands survey galactiques (**Euclid** et **LSST**) qui sont actuellement en cours. Elle prépare aussi l'avenir proche (**SPT** et **SO**), et un peu plus lointain avec de grandes attentes sur **LiteBIRD** et **CMB-S4** pour la cartographie du fond diffus cosmologique. Pour obtenir une cartographie 3D et multi-longueur d'onde du ciel, notre communauté utilisera les caméras grands champs (**Euclid**, **SKAO**, **CFHT**, **LSST**, **Gaia**, **Roman**, **SVOM**...) et les capacités spectroscopiques multi-objets (**4MOST**, **VLT/MOONS** **ELT/MOSAIC**, **WHT/WEAVE**) à venir. Pour obtenir une vue détaillée des processus multi-phases et multi-échelles dans les galaxies, les observatoires à haute résolution angulaire et spectrale seront privilégiés (**JWST**, **VLT**, **ELT**, **SKAO**, **ALMA**, **IRAM/NOEMA**, et **Athena**). **SKAO** joue un rôle particulier dans notre prospective. Il apparaît très nettement comme un moyen majeur pour le futur, en ouvrant une nouvelle fenêtre pour l'étude des galaxies et la ré-ionisation de l'univers. Une activité existe aujourd'hui sur les précurseurs, mais elle semble modeste en rapport aux possibilités à venir, témoignant de la nécessité d'animation et d'un renforcement futur de la communauté autour de ces thématiques.

L'attrait de la communauté pour les indicateurs multi-messagers semble également se dessiner (**LISA**). Dans le domaine de l'étude des galaxies, des demandes émergent pour des observatoires multi-longueurs d'onde de nouvelle génération, notamment dans l'infrarouge à moyen terme, dont **PRIMA**, sur lequel se positionnent certaines équipes françaises.

La communauté est aussi impliquée dans la préparation de l'instrumentation qui succédera aux projets actuels et à ceux de la décennie à venir (aux horizons 2040-2050). Elle commence notamment à se structurer autour des deux thèmes relevant du PNCG identifiés comme de possible future mission "Large" de l'ESA par le rapport Voyage 2050 : "Galactic Ecosystem with Astrometry in the Near-infrared (un complément à Gaia dans l'infra-rouge proche est proposé avec GaiaNIR) et « New Physical Probes of the Early Universe » avec le but de sonder l'univers primordial avec de nouvelles sondes (pouvant être les ondes gravitationnelles, ou la structure spectrale détaillée du CMB, ce que prépare le ballon **BISOU**). Les thématiques du PNCG bénéficieront aussi grandement du prochain grand observatoire spatial généraliste HWO, avec des capacités en particulier dans l'ultra-violet inexistantes aujourd'hui, et sur lesquels des chercheurs PNCG se positionnent. Finalement, les projets de spectrographes actuels étant limités par la taille des télescopes ou l'efficacité de sondage, le suivi spectroscopique des très nombreuses sources extra-galactique détectées en imagerie par les grands relevés actuels (LSST, Euclid, Union...) nécessiterait un télescope dédié tel que WST, proposé comme projet « post ELT » à l'ESO.

Toutes ces nouvelles observations s'accompagneront de nouveaux défis. Le premier concerne la gestion et l'interprétation des grands volumes de données collectées, notamment par Gaia, Euclid, SKAO, et LSST, et les projets à plus long terme. Les solutions résideront dans le **recours massif aux outils d'intelligence artificielle**, mais aussi dans le déploiement de **ressources humaines** au profil interdisciplinaire entre l'astrophysique et l'astrostatistique, et dans le renforcement des **synergies**, notamment à travers les SNO, entre observatoires de même type partageant des méthodes communes. Le développement de **simulations numériques exascales** utilisant de nouvelles architectures est le deuxième défi majeur à relever, dans le but de fournir une description cohérente des processus complexes et multi-échelles à l'œuvre dans les structures étudiées par le PNCG.

Multidisciplinarité

La multidisciplinarité est au cœur du travail des chercheuses et chercheurs du PNCG. Le PNCG couvre déjà un champ de recherche très large, comme l'illustre l'existence en son sein de quatre commissions thématiques (CT), entre lesquelles les forces sont relativement bien partagées : modèles d'univers, formation et évolution des grandes structures, formation et évolution des galaxies, et galaxies proches. Le dialogue, l'échange de méthodes, et le transfert de connaissances entre ces CT sont quotidiens, rendus nécessaires par le couplage d'échelles décrit ci-dessus, et facilités et amplifiés par l'utilisation, pour la plupart, des mêmes observatoires et outils de simulation numérique. Au final, cette multidisciplinarité entre la physique de la matière noire et la physique des baryons, de l'échelle de l'univers à celle des galaxies, s'incarne dans les simulations numériques et modèles théoriques qui tentent d'englober l'ensemble de ces phénomènes. Bien entendu, cette approche multidisciplinaire dépasse largement le cadre du PNCG. Les travaux aux petites échelles sur la physique et la chimie du milieu interstellaire menés au PCMI sont indispensables à la compréhension et à la simulation des galaxies proches et lointaines, tandis que les travaux sur les phénomènes de haute énergie de l'univers menés au PNHE sont essentiels à la compréhension du rôle des trous noirs dans l'évolution des galaxies. Les interactions avec ces PN impliquent quotidiennement plus de 23% de la communauté du PNCG. Les interactions avec les PNPS et PNGRAM sont plus modestes, mais importantes pour l'archéologie galactique en particulier, et concernent 10% de notre communauté.

La multidisciplinarité au PNCG s'étend également au-delà des limites de l'INSU, puisque le CEA, l'INP et l'IN2P3 sont des partenaires de longue date du PNCG. Nous avons notamment été associés à la création du GDR Cosmological Physics, à l'initiative de l'IN2P3. Les membres du PNCG touchant à la cosmologie se rapprochent massivement de ce GDR. Il faut noter que le PNCG regroupe des chercheurs de l'IN2P3 et de l'INSU qui travaillent bien ensemble depuis de nombreuses années, que ce soit dans le cadre de projets (Planck, Euclid, LiteBIRD) ou d'actions d'animation de la communauté (par exemple Action Dark Energy, CMB-France). Ces chercheurs ne sont cependant pas interchangeables, ils conservent des méthodologies distinctes, notamment parce qu'ils sont issus de formations différentes (particules et cosmologie pour les premiers, astronomie et cosmologie observationnelles pour les seconds).

Finalement, les grands volumes de données amènent les membres du PNCG à se rapprocher d'experts des sciences des données. Cela se traduit en particulier par une interface avec les GDR MADICS et IASIS, et par les candidatures CR/DR à la CID55.

SWOT

La force principale du PNCG est sa très vaste communauté, très active, et présente sur la scène internationale. La faiblesse associée est que la communauté est dispersée, à la fois thématiquement, et en terme d'implications sur de nombreux projets parallèles.

La grande opportunité qui s'ouvre aux membres du PNCG sont les nombreux grands relevés pour l'évolution des galaxies et la cosmologie à venir (Euclid, LSST,...) et les lancements réussis de nouveaux observatoires parfaitement adaptés à nos thématiques (Euclid, JWST).

Les menaces principales que voient les membres du PNCG sont le manque de ressources humaines et financières pour l'exploitation des très grands volumes de données à venir, et les choix politiques qui peuvent venir désorganiser nos efforts ou ne pas les soutenir à la hauteur des investissements.

III - Pavage thématique, cosmologie, galaxies

Lors du renouvellement du PNCG en 2021, un document de bilan et perspective avait été rédigé. Pour une bonne part, celui-ci est encore d'actualité, et nous recommandons sa lecture: https://pncg.lam.fr/wp-content/uploads/2021/06/Bilan_PNCG_2017-2021_web.pdf

En particulier, à l'occasion de ce renouvellement, le PNCG s'était structuré en 4 commissions thématiques:

- CT1: Le modèle d'Univers
- CT2: Formation et évolution des grandes structures
- CT3: Formation et évolution des galaxies
- CT4: Galaxies proches : archéologie et matière noire galactique

La CT1 relève totalement de la cosmologie, ainsi qu'une partie importante de la CT2 (l'utilisation de l'étude des grandes structures de l'univers pour la détermination des paramètres cosmologiques), alors que les CT3/4 sont plutôt liées à l'étude des galaxies. Cependant tous les sujets (et les moyens) sont largement liés, ce qui avait été l'élément fondateur de la fusion des programmes nationaux Cosmologie et Galaxies. Dans la nouvelle organisation se mettant en place avec les Actions Thématiques au sein du PN-AA, la visibilité et le travail de ces CT en dessous du nouveau des nouvelles AT peut paraître compromise, et nous recommandons de poser la question de la création de deux AT, une action thématique cosmologie (sur les profils de la CT1 et 2) et une action thématique galaxies (CT 3 et 4) plutôt qu'une AT héritant de toute la thématique PNCG.