

Rapport équipe Cosmologie multi-longueurs d'onde

A. Catalano, F. Mayet, J. F. Macías-Pérez, L. Perotto
Novembre 2023 - Conseil scientifique LPSC

1. Introduction

L'équipe Cosmologie Multi-Longueur d'onde (COSMO-ML) est engagée de longue date sur la thématique de la cosmologie observationnelle et instrumentale. Depuis la participation à la construction et l'analyse de données du ballon Archeops en 1998, puis du satellite Planck à partir des années 2000, l'équipe a toujours eu comme idée directrice de s'impliquer depuis la construction des instruments jusqu'à l'exploitation des données pour la cosmologie. L'activité de l'équipe se décline en trois volets.

Le premier porte sur l'instrumentation, en collaboration étroite avec les services techniques du LPSC, notamment la conception et l'électronique de détecteurs et caméras pour la cosmologie. En particulier, l'équipe a acquis une expertise dans le développement d'instruments utilisant la technologie KID (Kinetic Inductance Detectors), dans le cadre d'une synergie grenobloise sur cette activité, concrétisée par la création du [GIS KIDs](#). L'analyse de données constitue le deuxième volet, avec le développement de *pipelines* d'analyse, l'étalonnage, le *commissionning* et la caractérisation des performances de nouvelles expériences. Cette activité amène les membres de l'équipe à jouer des rôles majeurs dans des collaborations internationales (Planck, NIKA2, Concerto, Euclid). L'analyse des données brutes provenant de ces détecteurs constitue en effet un point clef pour la maîtrise des effets systématiques qui est critique pour la réussite de l'exploitation scientifique. Finalement, le troisième volet porte sur l'analyse des données de plus haut niveau pour l'obtention des résultats cosmologiques. Au cours des années, l'équipe a contribué de manière significative aux expériences mesurant le fond diffus cosmologique (CMB) en température et en polarisation, la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB et la mesure de l'effet Sunyaev-Zeldovich (SZ), ainsi que la cosmologie avec des amas de galaxies.

Le positionnement de l'équipe COSMO-ML en local repose principalement sur la synergie grenobloise en place depuis 25 ans. Il s'appuie également sur les labex Enigmass et Focus auprès desquels nous avons obtenus de nombreux financements de thèse et de postdoc. Les liens sont également forts au sein du LPSC avec l'équipe DARK dont certains membres souhaitent participer à CMBS4 et avec qui des actions communes sont en cours (Cosmo-café). Au niveau national, l'équipe est impliquée dans le GDR COPHY et les actions CMB-France et Dark Energy, à travers notamment des présentations régulières des résultats récents. Nous répondons régulièrement à des appels d'offres ANR, avec notamment deux financements ANR obtenus, NIKA2 et NIKA2Sky, dont le dernier était porté par le LPSC. Nous bénéficions régulièrement du soutien du CNES pour des financements de thèse ou de CDD ITA. Au niveau international, l'équipe fait partie de collaborations internationales (Planck, NIKA2, Euclid, ...) et répond régulièrement à des appels d'offres, avec notamment l'obtention de trois ERC : Radioforegrounds, Radioforegrounds+ et Concerto. L'équipe fait également partie du partenariat stratégique de l'UGA avec le Japon (Tsukuba) avec un cofinancement de thèse en cours et a obtenu un financement ECO-SUD en partenariat avec le Chili. L'équipe COSMO-ML a également fondé le cycle de conférences mm Universe. La première et la troisième édition ont eu lieu au LPSC. Ce cycle de conférences connaît un succès considérable dans la communauté internationale. La dernière édition a rassemblé à Grenoble les meilleurs spécialistes du domaine. Les actes de congrès sont publiés chez EDP Sciences afin d'assurer la visibilité dans la communauté scientifique.

Doctorant(e)	Titre	Soutenance	Dir. Thèse	Devenir
D. Cherouvrier	Challenges en astrophysique et en cosmologie avec des caméras KID	2025	J. F. Macías-Pérez	
A. Moyer-Anin	Cosmologie à partir des observations SZ d'amas de galaxies avec la caméra NIKA2 au télescope de 30 mètres	2025	F. Mayet	
S. Savorgnano	La technologie de KIDs pour la prochaine génération de télescopes CMB	2025	A. Catalano	
C. Hanser	Cosmologie avec les amas de galaxies dans l'expérience NIKA2	2024	L. Perotto	
M. Muñoz-Echeverria	Cosmologie multi-longueur d'onde avec les amas de galaxies	2023	J. F. Macías-Pérez	Post-doc Toulouse (IRAP)
F. Kéruzoré	Cosmologie à partir des observations Sunyaev-Zeldovich d'amas de galaxies avec NIKA2	2021	F. Mayet	post-doc Argonne
A. Jiménez Muñoz	Préparation à l'analyse et interprétation des amas de galaxies avec Euclid	2021	J.F. Macías-Pérez	post-doc Madrid
A. Fasano	Un spectro-imageur dédié aux observations des anisotropies secondaires du fond diffus cosmologique	2020	A. Monfardini & A., Catalano.	post-doc Tenerife (IAC)
F. Ruppín	Cosmologie avec les observations d'un amas de galaxies par effet Sunyaev-Zeldovich avec NIKA2	2018	F. Mayet	Maître de conférences - Univ. Lyon
A. Ritacco	Polarimétrie aux longueurs d'onde millimétriques avec NIKA et NIKA2	2016	J. F. Macías-Pérez et A. Monfardini,	Tenure-Track INAF - (Italie)
R. Adam	Etude de l'effet Sunyaev-Zeldovich dans les amas de galaxies avec NIKA	2015	J. F. Macías-Pérez et F. X. Désert	Chercheur CNRS

Tab. 1 : Liste des thèses soutenues (depuis 2015) ou en préparation dans l'équipe COSMO-ML

L'équipe COSMO-ML, dont tous les membres permanents sont HDR, a une longue tradition d'encadrement doctoral. Ainsi, 7 thèses ont été soutenues depuis 2015 et 4 sont actuellement en préparation. Le devenir des doctorant(e)s est excellent avec 2 recrutés en poste permanents, les autres étant en postdoc dans les meilleurs instituts du domaine. L'équipe a également obtenu 6 financements de postdocs (Enigmass et ERC) et encadré environ 3 stagiaires par an en moyenne (L3, M1, M2). Depuis 2015, l'équipe COSMO-ML a publié 164 articles dans des revues à comité de lecture et a effectué 72 communications dans des conférences, très majoritairement internationales ([liste complète](#)).

Les projets en cours sont : NIKA2, Concerto et Euclid et une activité instrumentale (salle millimétrique). Ils sont présentés dans les sections 2 à 5. Ils correspondent à des engagements de longue date, incluant, pour NIKA2 et Concerto, le design, la construction et le commissioning de l'instrument. L'analyse des données et l'exploitation scientifique sont les dernières étapes auxquelles l'équipe entend prendre toute sa part. Les projets futurs sont : SO, CMB-S4 et LiteBIRD. Ils sont présentés dans les sections 6 à 8.

2. Les projets NIKA et NIKA2

NIKA2 est une caméra cryogénique millimétrique, opérant à 150 et 260 GHz et comportant 2900 KID refroidis à 100 mK, qui est installée au télescope de 30 mètres de l'IRAM. Elle a été construite par une collaboration internationale dont le LPSC est membre fondateur. L'équipe COSMO-ML a joué un rôle majeur dans le développement et la construction de la caméra NIKA2. Elle a eu la responsabilité de la mise en service de l'expérience, de la calibration et de la caractérisation de ses performances. La collaboration NIKA2 dispose d'un temps garanti d'observation (1300 heures en 4 ans), qui est le plus grand jamais alloué par l'IRAM à une unique collaboration. Il a été partagé en cinq programmes d'observation correspondant à cinq objectifs scientifiques, avec en particulier le Grand Programme d'observations SZ (LPSZ ci-après) dont l'équipe COSMO-ML est responsable. Nous assumons des responsabilités importantes au sein de la collaboration : project scientist, responsable editorial board, responsable LPSZ, etc. La caméra NIKA2 permet également la mesure de la polarisation à 260 GHz, domaine dans lequel l'équipe a également joué un rôle clef. L'implication des services techniques du LPSC a été significative et décisive pour la réussite de ce projet. Un Memorandum of Understanding (MoU) a été signé entre l'IRAM et les instituts concernés (dont IN2P3). Il stipule que la collaboration NIKA2 fournira le support pour le fonctionnement de NIKA2 jusqu'en 2028 (10 ans au télescope). De plus, nous participons également en tant que PI et co-PI à des observations open time sur des sujets variés (amas de galaxies en SZ, pulsars). NIKA2 a été précédée par la caméra NIKA, également construite et conçue par la collaboration NIKA2 avec une contribution majeure du LPSC. Son champ de vision était plus petit (1,8 arcmin) du fait du nombre réduit de détecteurs (356). Elle a été utilisée au télescope de 30 mètres de l'IRAM de 2012 à 2015. Dans ce cadre, nous avons observé un échantillon de six d'amas en SZ et également fait des observations de haute qualité en polarisation. Cela a donné lieu à plusieurs publications qui sont discutées plus loin.

Le Grand Programme d'observations SZ (LPSZ) est une collaboration internationale menant un programme multi-sondes (X, SZ, optique) et multi-instruments (XMM-Newton, NIKA2, GTC) qui vise à optimiser l'exploitation scientifique des relevés cosmologiques en SZ passés (Planck, ACT et SPT) et futurs (CMB-S4, Simons Observatory.). Le LPSZ bénéficie de 300 heures d'observation accordées par l'IRAM. Ce programme international de recherche comporte 10 laboratoires participants (LPSC, IP2I Lyon, INSU, CEA, Rome, Madrid, Tenerife). L'objectif scientifique est d'étalonner en masse un échantillon représentatif constitué de 38 amas de galaxies sélectionnés en SZ (catalogues Planck et ACT) à un décalage vers le rouge moyen à élevé ($0,5 < z < 0,9$) et couvrant un ordre de grandeur en masse. Ces observations permettent de mener une étude complète de la morphologie et de l'évolution des amas. De plus, ces données sont combinées aux données X du satellite XMM-Newton afin d'étudier les profils thermodynamiques radiaux (densité, pression, masse, température, entropie). Ces derniers sont essentiels pour une compréhension complète de la relation observable-masse des amas de galaxies et de leur profil moyen de pression. Ces deux livrables permettront *in fine* d'exploiter les grands relevés d'amas pour contraindre la cosmologie. L'observation de ces amas a représenté 29 campagnes d'observation (de 1 à 2 semaines), ce qui a nécessité une très forte implication de l'équipe pour les observations au télescope et les étalonnages *a posteriori*. A ce jour, la totalité des amas a été observé. Les premières publications ont permis de montrer l'importance jouée par l'état de perturbation et la présence de sources ponctuelles dans

l'estimation de la masse des amas. Les publications cosmologiques (relation d'échelle, profil moyen de pression et applications) sont prévues pour fin 2024.

L'équipe COSMO-ML a obtenu plusieurs résultats d'importance. Avec NIKA, nous avons effectué la première cartographie SZ avec une caméra à base de KID [[R. Adam et al., A&A 2014](#)]. L'observation de l'amas MACS J0717.5 + 3745 nous a permis de publier deux résultats majeurs : la première cartographie de l'effet Sunyaev-Zel'dovich cinétique indépendante des modèles [[R. Adam et al., A&A 2017a](#)] ainsi que la première carte de température obtenue en combinant les données X et SZ [[R. Adam et al., A&A 2017b](#)]. Nous avons proposé dans [[F. Ruppin et al., A&A 2017](#)] une nouvelle procédure de déprojection non paramétrique de la pression électronique du milieu intra-amas, depuis le cœur de l'amas jusqu'à ses régions périphériques. La totalité des données de cet échantillon pilote a été rendue publique. Avec NIKA2, les premières études ont représenté des étapes importantes pour l'estimation des effets systématiques et la préparation des résultats cosmologiques. Dans [[F. Ruppin et al., A&A 2018](#)], nous avons étudié l'impact des sous-structures sur l'estimation de la masse. La publication [[F. Kéruzoré et al. A&A 2020](#)] a notamment présenté la méthode développée pour propager les incertitudes liées à la contamination des sources ponctuelles aux profils de pression. Dans [[A. Ferragamo et al., A&A 2022](#), [M. Muñoz-Echeverría et al., A&A 2023](#)], nous avons étudié l'impact des effets systématiques sur la reconstruction de la masse dans le cas de l'amas de galaxies CLJ1227 et PSZ2G144. La comparaison avec les données de lentillage a permis d'estimer le biais hydrostatique. L'article [[F. Kéruzoré et al., OJA 2023](#)] accompagne la diffusion publique du [code PANCO2](#) destiné à l'évaluation des profils de pression du milieu intra-amas à partir d'observations SZ. Il s'agit d'une avancée considérable dans l'optique de l'analyse complète du LPSZ et de l'étude des systématiques associées. Ce code a été pensé pour être extrêmement rapide mais aussi versatile afin d'être utilisable par d'autres collaborations. Par ailleurs, nous avons mis en place une activité en simulation hydrodynamique. Elle s'inscrit dans le cadre de la collaboration internationale *The300*. Nous avons proposé de créer une réplique synthétique de l'échantillon d'amas du Grand Programme SZ. Cela permet d'étudier les biais et les effets systématiques induits par la morphologie des amas. Dans une étude pilote (simulation Music), nous avons montré [[F. Ruppin et al., A&A 2019](#)] l'impact des perturbations du milieu intra-amas sur le profil moyen de pression. Dans [[G. Gianfagna et al., MNRAS 2021](#)], nous avons étudié le biais hydrostatique dans l'échantillon jumeau synthétique du LPSZ. Plus récemment, la publication [[M. Muñoz-Echeverría et al., A&A 2024](#)] a permis de montrer l'importance des incertitudes de modélisation et de la dispersion intrinsèque qui devraient être prises en compte lors de l'utilisation des estimations de masse pour les relations d'échelle. Nous confirmons que l'orientation des amas et les intervalles de rayon considérés pour l'ajustement ont un impact important sur le biais de masse.

L'équipe COSMO-ML a également joué un rôle clé dans le développement de la polarisation avec les caméras NIKA et NIKA2. Nous avons pris en charge la conception et la construction du modulateur de polarisation basé sur une lame demi-onde rotative. En outre, le pipeline de traitement des données polarisées a été développé en collaboration avec l'équipe de l'IPAG. Cela nous a permis d'obtenir les premiers résultats scientifiques en polarisation avec des matrices de KIDs [[A. Ritacco et al., A&A 2017](#), [2018](#)]. Récemment, l'équipe s'est également fortement impliquée dans la mise en service de la polarisation de NIKA2, ce qui nous a également permis d'obtenir les premiers résultats scientifiques [[A. Ritacco et al., EPJ 2022](#)]. Les observations du Grand Programme en polarisation viennent de démarrer à l'IRAM. Cette activité s'inscrit dans l'objectif de calibrer en polarisation les futures expériences CMB.

La stratégie de synergie multi-instituts entre l'INP, l'INSU, l'IN2P3 et le CEA, qui est à la base des succès de NIKA et NIKA2, est largement reconnue. Nous avons ainsi obtenu 2 financements ANR très conséquents : "NIKA" (ANR-12-BS05-0007), dédié à la construction de l'instrument NIKA2, et "NIKA2Sky" (ANR-15-CE31-0017), dont le LPSC est porteur et qui a été attribué pour soutenir l'exploitation scientifique. L'implication forte de l'équipe dans NIKA et NIKA2 a donné lieu à la publication de 35 articles, dont 19 avec un membre de COSMO-ML en premier auteur, et a trouvé un écho certain dans la communauté mondiale. L'équipe COSMO-ML a été le cadre de 9 thèses sur NIKA2 (50 à 100%) dont 4 sont en cours. L'avenir de l'activité scientifique autour de NIKA2 est d'une part à court terme (fin 2024) avec la publication des résultats scientifiques des grands programmes et en particulier les résultats cosmologiques du LPSZ, à moyen terme avec les observations et publications en polarisation et à plus long terme (2028) dans le cadre du MoU.

3. Les instruments KISS et Concerto

Des nombreuses études en cosmologie millimétrique nécessitent des mesures spectroscopiques sur une large gamme en fréquence (des centaines de GHz) et avec un grand champ de vue permettant de grands relevés du ciel. Les spectromètres existants couvrent des bandes trop étroites (quelques GHz) et ont également des champs de vue trop petits. Dans le cadre du CMB et de l'effet SZ, cela permet de séparer les différentes composantes physiques en jeu et ainsi corriger des possibles contaminations astrophysiques. En outre, le *line intensity mapping* est placé comme l'un des meilleurs moyens pour étudier les âges sombres et l'époque de réionisation de l'Univers. La communauté scientifique vise des résolutions spectrales de 100 à 1000 avec des champs de vue (diamètre) entre quelques dizaines et quelques centaines de minutes d'arc. Ce type de mesures spectroscopiques dans le domaine millimétrique est particulièrement difficile à cause de la contamination atmosphérique. Afin de contourner ce problème il est nécessaire de moduler le signal spectral à haute vitesse (plus rapide que les changements attendus de l'atmosphère), ce qui nécessite des détecteurs avec une réponse rapide tels que les KIDs (< 1ms) et des systèmes de lecture échantillonnant à quelques kHz. Au LPSC et dans le cadre du GIS KIDs nous avons travaillé dans ce sens avec les instruments KISS et CONCERTO grâce à une solution de type interféromètre Martin-Puplett (MPI).

KISS, qui a été installé au télescope de QUIJOTE à l'observatoire du Teide à Tenerife fin 2018, consiste en un MPI couplé à une caméra de KIDs. KISS a été placé dans l'ancien cryostat de NIKA qui permet d'avoir 6 spectres par seconde. KISS a effectué des mesures spectroscopiques à basse résolution (environ 3 GHz) dans une bande centrée à 150 GHz avec deux matrices de KIDs. L'instrument a été conçu et construit dans le cadre du GIS KIDSs avec le leadership du LPSC et une très forte contribution des services techniques du LPSC (mécanique, instrumentation, électronique). En outre, les services d'électronique et d'instrumentation ont également développé des logiciels spécifiques pour la communication avec le télescope et pour l'acquisition des données en spectroscopie à 4 kHz. L'équipe COSMO-ML a pris la responsabilité de la construction, de l'installation et de l'exploitation scientifique. Nous avons obtenu les premières lumières avec KISS début 2019 et des campagnes d'observations se sont déroulées jusqu'à 2020. KISS a permis de valider aussi bien la technologie que le principe d'observation (modulation du signal atmosphériques) et a permis des observations photométriques et spectroscopiques de plusieurs objets d'intérêt [A. Fasano et al., [A&A 2021](#), [EPJ 2022](#)]. KISS a servi également de prototype pour CONCERTO aussi bien du point de vue technologique que de celui de l'analyse des données. Pour cette dernière, l'équipe COSMO-ML a pris en charge le développement d'un pipeline d'analyse pour la reconstruction de cartes

spectrales du ciel en partant des données brutes. L'exploitation scientifique de KISS a été limitée aux sources ponctuelles suite à un problème de couplage optique entre l'instrument et le télescope.

L'instrument CONCERTO (CarbON CII line in post-reionisation and ReionisationTiOn), qui a été exploité au télescope APEX à 5000 m au Chili, a été construit grâce à un financement ERC senior (Grant agreement No 788212) accordée à G. Lagache et qui se termine en juin 2024. CONCERTO utilise 2 matrices de 2172 détecteurs chacune, correspondant à un plan focal de 18,6 minutes d'arc de diamètre, dans le domaine spectral de 130 à 310 GHz, et avec une résolution spectrale maximale de 1.8 GHz. L'instrument a été conçu et construit par une collaboration entre le GIS KIDs et le LAM, avec une très forte contribution des services techniques du LPSC (électronique, mécanique et SDI) sur la base de KISS [A. Monfardini *et al.*, [JLTP 2022](#)]. Du point de vue du système de lecture un upgrade des cartes électroniques chaudes et du système d'acquisition a été nécessaire [O. Bourrion *et al.*, [Jinst 2022](#), J. Bounmy *et al.* [Jinst 2022](#)]. Les équipes du LPSC ont également participé à l'installation (pendant la période du COVID19) et à la maintenance de l'instrument pendant la période d'exploitation.

Les objectifs scientifiques principaux [P. Ade *et al.* [A&A 2020](#)] sont : 1) la cartographie des fluctuations de la raie de [CII] afin d'étudier l'époque de réionisation, et 2) l'étude de la masse et température des amas de galaxies via l'effet SZ [A. Fasano *et al.*, [EPJ 2024](#)]. Le [CII] est une des raies les plus brillantes issues de la formation d'étoiles dans les galaxies et un traceur fiable de la formation d'étoiles dans l'ensemble de l'Univers [M. Van Cuyck *et al.* [A&A 2023](#), A. Gkogkou *et al.* [A&A 2023](#), M. Béthermin *et al.*, [A&A 2022](#)]. Pour un décalage vers le rouge $z > 5.2$, elle se trouve dans les fenêtres transparentes de l'atmosphère dans le mm et peut donc être observée via un *line intensity mapping* à 3D comme dans CONCERTO. Ceci permet à la fois de reconstruire les fluctuations spatiales et l'évolution en redshift. Dans le cadre de l'émission SZ, les observations spectroscopiques, et notamment avec CONCERTO, permettent de séparer les différentes composantes SZ — effet thermique (tSZ), effet cinétique (kSZ) et corrections relativistes (rSZ) — et de contrôler la contamination par d'autres sources astrophysiques (galaxies radio et sub-mm, poussière interstellaire, émission synchrotron, etc.). À partir de cette séparation, il est possible de déterminer des cartes (profils) de pression (tSZ), de température (rSZ) et de masse hydrostatique (tSZ) de l'amas, ainsi que le champ de vitesse dans la ligne de visée (kSZ) correspondant aux différentes structures dans l'amas.

CONCERTO a été opéré avec succès entre avril 2021 et mai 2023 et les membres de COSMO-ML ont participé régulièrement aux campagnes d'observations et de maintenance de l'instrument. Celles-ci ont permis d'assurer les observations du large programme sur le *line intensity mapping* [CII] pour 1300 heures dans le champ COSMOS. En outre, le LPSC a été moteur et a pris en charge des observations en SZ pour environ 300 heures dans 5 amas de galaxies — RXJ1347-1145, A3391-A3395, MACS J046.1-2403 et RXC J2211.7-034 — correspondant à des cas scientifiques représentatifs en spectroscopie. Enfin, nous avons également participé à un programme d'observation pour la calibration spectrale dans le millimétrique avec des sources standards photométriques qui permettent de mettre au point le pipeline d'analyse et aussi que la « *legacy science* ». L'ensemble de ces données sont les premières disponibles dans le domaine millimétrique qui permettent des études spectroscopiques sur des très grandes régions du ciel.

L'équipe COSMO-ML est particulièrement investie dans l'analyse des données de CONCERTO et tout particulièrement dans le pipeline de construction de cartes spectroscopiques. Nous avons adapté les procédures développées pour KISS pour des résolutions spectrales plus importantes. Après avoir démontré des performances attendues en continuum [Hu *et al.* 2024], nous travaillons actuellement sur les données « *legacy science* »

pour déterminer celles-ci en spectroscopie. En effet, nous avons produit les premières cartes en spectroscopie sur le programme « *legacy science* » qui confirment la grande sensibilité de CONCERTO [A. Fasano et al., EPJ 2024]. Néanmoins, un travail supplémentaire est nécessaire pour mitiger les effets systématiques afin d’arriver à une exploitation cosmologique de CONCERTO avec les raies [CII] et l’effet SZ. À ce propos le LPSC est co-I de la demande ANR ESDIR CODA qui vise le renforcement de l’équipe avec un/une postdoc sur 3 ans qui travaillerait aussi bien sur le pipeline d’analyse que sur l’exploitation scientifique des données SZ sur les amas de galaxies.

4. Euclid

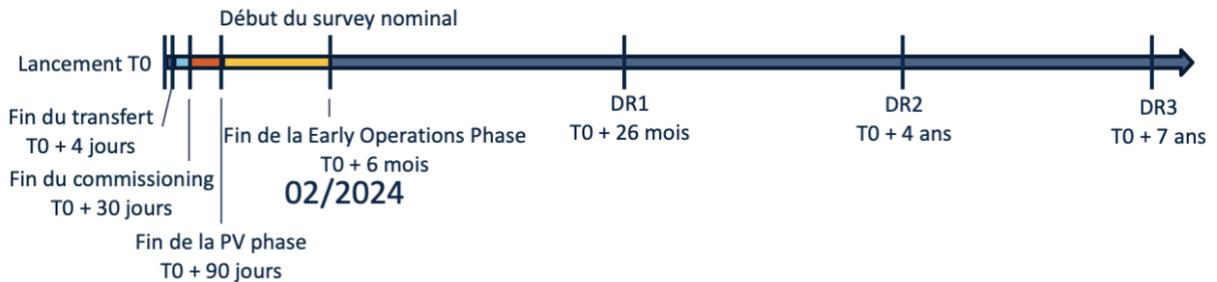


Fig 1. Calendrier des phases de la mission Euclid depuis le lancement jusqu’à la fin de prise des données et la release des données (DR).

Le satellite Euclid a été lancé le 1er Juillet 2023 au point L2 de Lagrange et se trouve actuellement dans sa phase de vérification scientifique suite au commissioning réussi des instruments à bord. Il s’agit d’une expérience phare pour la cosmologie dans les prochaines décennies, visant principalement l’étude de la nature de l’énergie noire et celle de la distribution de matière sombre grâce à trois sondes majeures : l’effet de lentille gravitationnelle, le *clustering* des galaxies et la distribution d’amas de galaxies. Euclid est constitué d’un télescope de 1.2 m avec un champ de vue effectif de 0.57 deg^2 . Euclid dispose de deux instruments : le VIS et le NISP qui permettent la détection de galaxies dans le visible et l’infrarouge, respectivement. Le VIS, grâce à sa résolution angulaire de 0.1 arcsec et sa grande bande spectrale entre 530 et 920 nm, est l’instrument ultime pour la mesure de l’effet de lentille gravitationnelle avec une qualité d’image inégalée. Le NISP permet des mesures photométriques en trois bandes (Y, J et H) et spectroscopiques dans l’infrarouge (de 940 nm à 2021 nm) qui vont sonder la distribution de galaxies à des très hauts redshifts. Euclid devrait prendre des données pendant 6 ans après la fin de la vérification scientifique avec un *release* des données un an plus tard comme montré dans la figure 1. L’équipe du LPSC est fortement impliquée dans Euclid depuis 2015 avec des contributions aussi bien instrumentales, dans le cadre de l’instrument NISP, qu’au niveau de l’analyse des données et de leur interprétation à des fins cosmologiques.

Dans le cadre des activités instrumentales, suite à notre implication dans l’estimation de la contribution des rayons cosmiques sur les détecteurs du NISP, nous avons pris en charge les tests de compatibilité électromagnétique (EMC) de ces mêmes détecteurs et des LEDs de calibration. Grâce à la très grande implication des services SERM, électronique et d’instrumentation du LPSC (plus de 5 ITA ont contribué fortement) nous avons pu concevoir et construire un cryostat dédié pour effectuer ces tests. Il disposait d’une fenêtre qui permettait de laisser passer le rayonnement radio (dans les fréquences d’intérêt pour la télémétrie) et de bloquer le visible et l’infrarouge. Après des tests et validation au LPSC, nous avons réalisé les tests EMC chez Airbus (Toulouse) à deux reprises et présenté les résultats à l’ESA (réunions et

rapports). Forts de la connaissance acquise sur les détecteurs du NISP, nous avons également pris en charge la mesure et modélisation du bruit corrélés des détecteurs d'Euclid ainsi que de son impact sur les données de vol. Ce travail a démontré que les flux des galaxies mesurés par le NISP ne sont pas pollués par ce bruit. Il a fait l'objet d'une [publication](#) Euclid.

L'équipe du LPSC a également pris des fortes responsabilités au sein du Science Ground Segment (SGS) en charge de délivrer les produits permettant les études cosmologiques. Nous avons le leadership du Internal Data (ID) qui gère la caractérisation des observables issues du VIS et du NISP. Dans ce cadre, nous sommes aussi responsables au sein du pipeline d'Euclid de la PF (Processing Function) VMPZ-ID qui vise la construction de masques du ciel permettant de caractériser les effets systématiques sur la détection des galaxies. Notre but ultime étant d'estimer la probabilité de détecter une galaxie dans chaque position du ciel. Cette PF est donc fondamentale pour les analyses cosmologiques car elle permet de caractériser et de prendre en compte les effets instrumentaux qui autrement seraient des sources de biais dans les paramètres cosmologiques et notamment pour ceux obtenus avec le *clustering* de galaxies. Le service informatique du LPSC est fortement impliqué dans ces travaux avec un IR et un CDD financés par le CNES pour 3 ans jusqu'en 2026. Nous sommes actuellement dans une intense phase à la fois d'implémentation des outils de base et de prototypage des analyses scientifiques finales. Par la suite, nous envisageons une veille technique sur les aspects pipeline et une forte implication dans une phase d'exploitation scientifique. Notamment, nous nous préparons pour la livraison des premières données d'Euclid d'ici environ un an. Néanmoins nous sommes conscients du fait que l'accumulation des données par la suite va diminuer les erreurs statistiques et mettre plus en évidence des effets systématiques que nous cherchons à corriger. Ainsi, une contribution importante du LPSC dans le SGS sera probablement nécessaire jusqu'à la fin de la mission.

Du point de vue de l'exploitation cosmologique des données d'Euclid, l'équipe COSMO-ML s'est toujours placées dans le cadre de l'étude des amas de galaxies. D'une part, nous avons un rôle important à jouer dans le cadre de l'estimation multi-observable et multi-longueurs d'onde de la masse des amas de galaxies qui est fondamentale pour les études cosmologiques. Les synergies entre Euclid et NIKA2 sont très importantes et devrait permettre une mesure précise de la masse des amas. Nous avons des atouts forts à cet égard de par notre implication forte dans les deux instruments et dans le développement d'outils adaptés lors de nos travaux sur NIKA2. En parallèle, nous avons aussi pu profiter de notre implication dans l'exploitation des simulations The300 pour étudier les propriétés des amas dans l'IR et le visible ainsi que leur corrélation avec l'effet SZ [[A. Ferragamo et al., A&A 2022](#), [M. Muñoz-Echeverría et al., A&A 2023](#)]. D'autre part, grâce à nos travaux sur Planck nous avons une forte expérience sur la validation des catalogues d'amas de galaxies qui constituent la base des études cosmologiques. De plus, nos travaux sur le SGS nous permettront de bien connaître les effets systématiques qui vont limiter ses catalogues. Enfin, cette implication nous a aussi ouvert la porte vers les autres sondes et notamment le *clustering* de galaxies par des bins tomographiques. Nous sommes impliqués avec les autres groupes dans le SGS dans une validation globale qui sera sans doute un élément fondamental dans les analyses cosmologiques. L'équipe du LPSC s'est également impliquée dans la communication ainsi que dans l'organisation des événements au sein de la collaboration comme le symposium Euclid France en 2021.

Malgré nos faibles forces nous avons pu jusqu'à présent fournir un travail de qualité reconnu par la collaboration grâce à l'implication des services techniques ainsi que celle d'un doctorant. Ceci nous a permis d'être les auteurs principaux de deux articles mais aussi de signer 12 papiers. Par la suite nous envisageons d'effectuer des demandes de postdocs ainsi que de doctorats. Nous avons également tissé des liens forts avec nos collègues dans Euclid afin de créer des groupes de travail pour contribuer efficacement. Nous comptons aussi sur les synergies avec

les activités au LPSC autour du Rubin Observatory pour que les engagements actuels se traduisent par un impact fort dans l'exploitation cosmologique d'Euclid.

5. Salle millimétrique

Les laboratoires LPSC, Institut Néel, IPAG et IRAM sont moteurs dans le développement de la nouvelle génération de détecteurs cryogéniques KID (Kinetic Inductance Detectors) dans le cadre du Groupe d'Intérêt Scientifique (GIS) KIDs. Ce dernier vise à assurer et améliorer la visibilité des activités de la collaboration. Le périmètre d'action du GIS KIDs comprends la fabrication et la validation photométrique des KIDs, la cryogénie, le système de lecture et d'acquisition, l'instrumentation annexe et l'étalonnage scientifique. Le groupe COSMO-ML et les services électronique, mécanique et SDI jouent un rôle clef pour le développement du système de lecture et le logiciel d'acquisition, la conception et la fabrication de l'optique de reprise, et les mesures de caractérisation des détecteurs. En 2021 nous avons renforcé les activités du GIS KIDs en équipant un nouveau laboratoire millimétrique au LPSC. Celui-ci a été installé dans le hall projet du laboratoire et fonctionne en parallèle de celui de l'Institut Néel. La salle millimétrique est conçue autour de l'instrument KISS qui a été rapatrié à Grenoble et modifié pour des contraintes des mesures en laboratoire. À l'instrument KISS se rajoutent une série équipements de pointe telles un banc de tests pour électronique de lecture, un réseau d'ordinateurs par l'acquisition, un simulateur du ciel et une table de pointage pour simuler les observations astrophysiques, ainsi qu'un système de modulation et mesure de la polarisation. La salle millimétrique ainsi que les activités qu'y sont effectuées ont été et sont financées régulièrement à travers les Labex FOCUS et ENIGMASS, par le Centre National des Études Spatiales (CNES), ainsi que par le soutien de base de l'IN2P3 et le laboratoire.

Dans la salle millimétrique nous nous concentrons sur 4 axes principaux qui avaient été identifiés comme critiques lors des expériences précédentes :

- Développement de la nouvelle génération de système de lecture et d'acquisition. L'accès à la chaîne complète de mesure permet gain en efficacité pour les services techniques et une synergie accrue avec les chercheurs de l'équipe Cosmo-ML
- Mesures de caractérisation des matrices des KID pour la future génération d'instruments pour le CMB. Un cryostat supplémentaire par rapport à ceux à l'IN permet de diversifier la production de matrices et s'attaquer à plusieurs configurations de manière simultanée : pixels polarisés, basse et haute fréquences d'observations, spectroscopie en chip, etc.
- R&D antireflet optique : mesures à froid sur les échantillons d'anti-reflet produits par l'atelier du LPSC. Comme pour le système de lecture et d'acquisition la synergie ITA/chercheurs et le gain en temps sont très importants. Ceci sera un élément clef pour assurer notre implication dans SO où nous prendrions en charge la fabrication des lentilles pour l'ensemble de l'instrument.
- Caractérisation spectrale et en polarisation. Suite à notre implication dans LiteBIRD et notre savoir-faire avec NIKA2, KISS et CONCERTO, nous avons entrepris le développement d'un banc de test permettant des mesures extrêmement précises de la réponse spectrale et en polarisation. Cela concerne les détecteurs KIDs, les éléments optiques comme les lentilles, les modulateurs (e.g. lame demi-onde) et analyseurs de polarisation (polarisateurs faits maison), et les sources de calibration (projet COSMOCAL pour la calibration en polarisation des futures expériences CMB).

La salle millimétrique constitue de manière générale un outil très précieux pour mettre en œuvre des mesures avec une chaîne complète (détecteurs froids, électronique froide et chaude, optique, software d'acquisition, etc.), permettant des mesures de précision pour : 1) la validation instrumentale, 2) la vérification logiciel, 3) le prototypage, 4) la caractérisation instrumentale,

et 5) l'obtention de résultats scientifiques d'envergure. De manière plus concrète il nous semble qu'elle aura une importance capitale dans les années à venir pour notre implication dans SO et LiteBIRD. Pour SO, le gain en temps et en synergie chercheurs/ITA sera un point critique afin de maintenir un calendrier compatible avec nos collègues américains et européens. Pour LiteBIRD la maîtrise des effets systématiques en polarisation et en conséquence de la réponse spectrale et en polarisation des instruments MHFT sera décisive. L'expérience gagnée avec la salle millimétrique pourra donc être mise à profit directement dans la conception du banc de test mais aussi dans les procédures de réalisation des mesures.

6. Simons Observatory

L'expérience Simons Observatory ([SO](#)), qui vise la mesure des anisotropies en température et polarisation du CMB avec une précision inégalée, est en cours d'installation dans le désert d'Atacama au Chili. Avec six instruments de type SAT (small aperture telescope) et un LAT (large aperture telescope) SO permettra à la fois l'étude des modes B primordiaux en polarisation du CMB (attendus à des grandes échelles angulaires) comme la cartographie de la matière dans l'Univers grâce à l'effet de lentille gravitationnelle et à l'effet SZ (nécessitant la mesure des petites échelles angulaires). Il s'agit à la fois d'un projet avec un très grand potentiel scientifique dans le domaine d'intérêt de notre groupe et aussi un *pathfinder* de luxe pour les instruments de nouvelle génération comme CMB-S4. Concernant les modes B primordiaux, SO détectera des rapports tenseur-scalaire $r > 0.003$ (68% C.L.). Il permettra également la détection de plus de 20000 amas de galaxies par l'effet SZ tout en mesurant leurs masses sans données externes via l'effet de lentille gravitationnelle des halos sur le CMB. En outre, SO cartographiera la matière intégrée le long de la ligne de visée par reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle et estimera le champ de vitesse particulière en exploitant l'effet SZ cinétique. Ces sondes lui permettront de contraindre la somme des masses des neutrinos (> 0.03 à 68% C. L.), de découvrir de nouvelles particules reliques, d'explorer la nature de l'énergie noire et d'affiner les scénarios de ré-ionisation [[SO Collaboration \(2018\)](#)].

Ces derniers mois un projet autour du GIS KIDS a émergé pour une contribution française à SO qui permettrait de fédérer la communauté sous le leadership IN2P3, et d'avoir accès à des données CMB uniques pour la prochaine décennie. Cette contribution viendrait compléter les SAT américains en cours d'installation et renfoncer les SAT anglais et japonais en cours de construction. Dans le cadre de l'appel à projet CNRS AAR, nous proposons la construction et l'équipement d'un SAT avec un nouvel instrument basé sur la technologie KID développée par le GIS-KID à Grenoble. Nous profiterions de l'expertise et du savoir-faire acquis pendant plusieurs années de R&D liées aux KIDs ainsi que du fait d'avoir été maîtres d'œuvre de plusieurs instruments à base de KIDs (NIKA2, KISS et CONCERTO). En termes de mesure de la polarisation nous envisageons d'utiliser une technologie similaire à celles de NIKA et NIKA2. Visant un instrument observant à haute fréquence (supérieure à 200 GHz) et grâce à la technologie KID, nous pourrions avoir une contribution significative à SO de part : 1) une meilleure couverture du plan focal, 2) de la redondance pour la soustraction de la contamination atmosphérique et 3) un bras de levier en fréquence plus important pour réduire la contribution de la poussière galactique aux modes B primordiaux du CMB. Dans l'hypothèse d'un financement en 2024 il est réaliste d'envisager une installation en même temps que nos collègues anglais et japonais dans la deuxième phase de l'exploitation (*Advanced SO*).

Une participation *hardware* nous permettrait de consolider les responsabilités prises aujourd'hui par le groupe SO à l'IN2P3, et plus important, d'avoir accès à la totalité des données SO. Dans ce sens nous pourrions nous investir sur les analyses cosmologiques dans le cadre de l'effet de lentille gravitationnelle et des amas de galaxies. Ces analyses ont de forts liens avec

nos travaux actuels dans le LPSZ et constitueraient un tremplin pour notre participation à CMB-S4 et LiteBIRD. En outre, ce projet permettrait à notre équipe d'avoir des cartes de haute sensibilité de la polarisation de l'émission de la poussière interstellaire qui constitueront un héritage précieux et unique à la fois pour l'exploitation cosmologique des futures expériences CMB comme LiteBIRD et CMB-S4 et pour la physique de la poussière elle-même, cf. [lien](#).

7. CMB-S4

CMB-S4 est la prochaine génération d'expériences CMB au sol, qui avec ses $\sim 5 \times 10^5$ détecteurs couvrant une gamme de fréquence de 20 à 300 GHz, mesurera la température et la polarisation du CMB avec une précision jamais atteinte, surpassant d'un ordre de grandeur la sensibilité des expériences actuelles. Ces performances lui ouvriront de nouvelles cibles scientifiques, telles la détection des modes B primordiaux de polarisation pour un rapport tenseur-scalaire r jusqu'à 5×10^{-4} , une cartographie sur 60% du ciel et à une sensibilité sans précédent de la matière noire intégrée sur la ligne de visée via la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle, lui permettant de déterminer la hiérarchie des masses des neutrinos, ou encore une cartographie des effets SZ thermiques et cinétiques, offrant des sondes supplémentaires de l'Univers dominé par l'énergie noire ([CMB-S4 collaboration, 2019](#)). L'expérience se déploie sur deux sites. Au pôle Sud seront installés 3 SAT de 0,6 m de diamètre, qui bénéficieront des conditions atmosphériques uniques pour la mesure des modes B primordiaux, ainsi qu'un LAT de 5 m de diamètre, essentiel pour la correction des modes B induits par effet de lentille. Le désert de l'Atacama accueillera 2 LAT de 6 m de diamètre supplémentaires pour l'exploitation des anisotropies post-découplage, *e.g.* effet de lentille et effets SZ, et ouvrant également la voie à des études cosmologiques en corrélation croisée avec les grands relevés optiques. Ce design a été validé par les agences pilotes (DOE et NFS) et la construction débutera en 2026 pour une première lumière en 2032, la prise de données s'échelonnant jusqu'en 2042. CMB-S4 bénéficiera de l'expérience engrangée avec *Advanced SO*, qui achèvera alors ses opérations, tout en le surpassant en sensibilité et vitesse de cartographie.

L'équipe Cosmo-ML et les services techniques du LPSC participent d'ores et déjà au projet CMB-S4. Nos travaux et projets s'inscrivent dans la stratégie du groupe CMB de l'IN2P3 (APC, CPB, IJClab et LPSC) pour entrer officiellement dans CMB-S4 via une contribution à la construction et au *Data Management*. Du côté de la construction, le service électronique du LPSC développe des solutions *hardware* pour intégrer l'ASIC construite à l'APC à l'électronique chaude de CMB-S4. Les premières cartes à circuits imprimés sont en cours de fabrication au LPSC. Du côté du *Data Management*, nous avons proposé aux leaders de l'infrastructure logicielle de CMB-S4 d'adapter l'écosystème Atlas Metadata Infrastructure ([AMI](#)), développée par le LPSC, à la gestion des métadonnées de S4. Cet outil couvrirait la sélection de données multi-critères, l'agrégation de métadonnées disparates et de bas niveau en base de données orienté utilisateur, le suivi des données brutes et des paramètres des analyses de fabrication des produits d'intérêt scientifiques (cartes en fréquence). Forts de notre expertise dans le traitement des données temporelles de Planck, nous participerons également à élaborer une chaîne de simulation des données ordonnées en temps de CMB-S4 incluant les effets instrumentaux réalistes.

Après cette première contribution technique en 2024-2026, notre projet est de préparer l'exploitation cosmologique de CMB-S4. Nous nous appuyons sur les études développées dans *Advanced SO* pour contribuer à la reconstruction de l'effet de lentille et aux études cosmologiques basées sur les effets SZ. Sur l'effet de lentille, nous adapterons les outils et méthodes originales développées pour Planck au cas de S4. Nous proposerons des méthodes de

reconstruction du potentiel gravitationnel dérivées des estimateurs quadratiques ([Planck Collaboration VIII, 2018](#)), nous produirons des cartes modèles du mode B induit par effet de lentille, offrant une méthode alternative de *delensing* ([Planck Collaboration XLI 2016](#)) et nous estimerons la masse des amas de galaxies en reconstruisant la carte de déflexion du rayonnement CMB par leurs halos ([Planck Collaboration XXIV 2015](#)). Sur l'effet SZ, notre ambition est de contribuer à la construction du catalogue d'amas de galaxies et de la carte de paramètre de Compton et à leur exploitation cosmologique, dans la lignée de nos travaux dans Planck, NIKA2 puis SO. Nous projetons également de développer des méthodes de reconstruction de la carte de l'effet SZ cinétique, dépendant de la vitesse particulière des amas, afin de l'utiliser comme sonde cosmologique. Ces projets s'inscrivent dans les groupes de travail *Maps to Other Statistics* et *Clusters* de la collaboration CMB-S4. Nous encadrerons des étudiants en thèse et des post-doctorants sur ces thématiques afin d'avoir un fort impact sur les résultats cosmologiques de CMB-S4.

8. LiteBird et les ERC RADIOFOREGROUNDS

[LiteBIRD](#) est un projet satellite de la JAXA, en collaboration avec l'ESA et la NASA, pour l'étude des anisotropies en température et polarisation du CMB et avec un lancement prévu après 2032. L'objectif principal de LiteBIRD est la mesure des modes B primordiaux en polarisation du CMB afin d'étudier la période inflationnaire dans l'Univers primordial avec une précision de 10^{-3} sur la mesure du rapport tenseur-scalaire (r). En outre, il va pouvoir sonder avec précision inégalée la période de réi-onisation de l'Univers et reconstruire son histoire via les grandes échelles angulaires des modes E en polarisation associés aux fluctuations scalaires. LiteBIRD permettra également la mesure du spectre de puissance angulaire de l'effet SZ à des très grandes échelles angulaires qui permettra d'une part améliorer les résultats de Planck et d'autre part compléter les instruments au sol comme SO et CMB-S4, pour lesquelles ces échelles sont inaccessibles. LiteBIRD est composé de trois instruments, LFT, MFT et HFT, dont les deux derniers, à moyenne et haute fréquence, sont sous responsabilité européenne avec un pilotage par le CNES. Ils couvrent 15 bandes en fréquences entre 34 et 448 GHz et avec une résolution de 0.5 degrés à 100 GHz. LiteBIRD est particulièrement conçu pour un contrôle fin des effets systématiques, et particulièrement ceux en polarisation, ainsi que pour une soustraction ultime des émissions d'avant grâce aux multiples bandes en fréquence.

L'équipe COSMO-ML est responsable du banc de test qui permettra la caractérisation spectrale et en polarisation des détecteurs du MFT et LFT lors des calibrations au sol. La construction du banc de test sera probablement assurée par des sous-traitants. Nous sommes cependant en charge de sa conception, afin de répondre aux besoins imposés par les objectifs scientifiques, de sa mise en opération et de sa caractérisation. Le banc de test sera composé d'un MPI pour la mesure de la bande passante de l'instrument et d'un système de modulation de la polarisation. Ce travail est, d'une part, intrinsèquement lié aux développements effectués dans la salle millimétrique avec l'installation d'un simulateur de ciel et d'un système de modulation de la polarisation couplés avec l'instrument KISS. D'autre part, ce travail fait écho à notre savoir-faire en termes de la modélisation et de correction des fuites spectrales en polarisation. Ils vont également s'appuyer sur les développements des systèmes de mesure de la polarisation de NIKA et NIKA2 [A. Ritacco *et al.* 2017, G. Pisano *et al.* 2022]. C'est le cas notamment de la mesure des angles de polarisation et des effets systématiques associés aux lames demi-onde qui modulent la polarisation. Enfin, ces travaux vont également de pair avec ceux prévus pour le SAT français de SO. Dans ce cadre, l'équipe COSMO-ML est naturellement impliquée dans le groupe de travail sur la calibration au sol et en vol et sur celui de la correction des effets

systématiques. A cet égard nous avons participé à la rédaction et revue interne du « [white paper](#) » de LiteBIRD. Grâce à notre expérience passée et à la synergie avec les développements dans la salle millimétrique, nous pensons être en mesure d'assurer nos engagements. Le calendrier de LiteBIRD a été récemment révisé, suite à un retard important sur la phase A2, qui correspondrait avec un objectif de vol en 2032. Ces changements de planning devraient faciliter le recouvrement avec SO par exemple. Jusqu'au présent nous sommes principalement impliqués sur la préparation de la calibration en vol [Vielva et al 2022, Aumont et al 2020] et participons au LiteBIRD editorial board qui gère une importante activité de publications.

Comme indiqué précédemment un des problèmes majeurs pour les futures expériences CMB est la correction des émissions d'avant-plan en polarisation qui sont principalement dus à l'émission de la poussière et du synchrotron par les électrons relativistes dans notre galaxie. Bien que Planck ait obtenu des données uniques à haute fréquence pour l'étude de la poussière, elles doivent être complétées à basse fréquence avec des données au sol pour le synchrotron. Ceci était le but principal du projet ERC H2020 COMPET-05 multi-institut [RADIOFOREGROUNDS](#) dont le LPSC étaient un des nœuds principaux. De par son travail pionnier dans le cadre de l'expérience Archeops, l'équipe COSMO-ML était en charge du work-package sur le développement de modèles de l'émission polarisée de la poussière et le synchrotron galactique. Nous avons pu contraindre ce dernier grâce aux données de Planck, de WMAP, et de QUIJOTE [V. Pelgrims et al., 2021]. Le software développé au LPSC a été livré à la communauté. La qualité de ces travaux a été reconnue par l'obtention d'un financement de type ERC HORIZON-CL4-2023-SPACE-01 pour le projet [RadioForegroundsPlus](#) pour lequel avec nos collègues de l'IPAG (Grenoble) et l'IRAP (Toulouse) nous avons mis place un nœud CNRS. Ceci nous a permis d'élargir notre champ d'expertise vers les algorithmes de séparation de composantes, que nous avons également développés pour Planck et Archeops [G. Hurier *et al.* 1013, J. Aumont *et al.* 2007], et vers la modélisation spectrale de l'émission de la poussière qui nous avons peu exploré lors de RADIOFOREGROUNDS. Nous pensons que notre implication dans RadioForeGroundPlus, avec notamment le renforcement de l'équipe du LPSC par un postdoc, nous permettra de participer à la préparation des analyses scientifiques et cosmologiques de LiteBIRD.

9. Conclusions et perspectives

Au cours des années précédentes, l'équipe COSMO-ML a contribué de manière très significative à plusieurs grands projets et collaborations internationales en cosmologie. Cette activité inclut notamment :

- une fructueuse synergie grenobloise en instrumentation millimétrique qui s'est concrétisée par la création du GIS KIDs,
- une collaboration étroite avec les services techniques du LPSC (électronique, SERM, SDI, informatique) avec un nombre de FTE par an très conséquent,
- une implication de premier plan, depuis la conception et la construction jusqu'aux analyses de données et aux interprétations cosmologiques,
- une prise de responsabilité et une visibilité importante dans de grandes collaborations internationales, notamment dans Planck, NIKA2, Concerto et Euclid,
- des collaborations étroites à l'international (U. Tsukuba, U. La Sapienza, IAC, UAM, ...),
- l'obtention de plusieurs financements (ANR, ERC, Labex locaux),
- un encadrement doctoral très significatif pour une équipe de 4 permanents,
- un important taux de publications,
- la création d'un nouveau cycle de conférences (mm Universe).

Pour l'avenir immédiat, la philosophie de l'équipe COSMO-ML demeure inchangée. Nous nous impliquons dans chaque projet dès la conception/construction des instruments et la mise en place de la stratégie d'analyse de données, afin d'être bien positionnés pour l'exploitation scientifique, notamment pour la compréhension des effets systématiques fins. Nous maintenons un fort niveau d'engagement tout au long de la durée des projets auxquels l'équipe prend part, avec pour objectif une contribution significative à l'analyse cosmologique.

Les projets actuels vont évoluer significativement à moyen terme, ce qui modifiera la répartition des moyens humains. L'instrument Concerto a par exemple été démonté et rapatrié en France après de fructueuses campagnes d'observation. L'effort à moyen terme portera sur l'analyse et l'interprétation des données. L'intense activité autour du LPSZ de NIKA2 est prévue pour se terminer fin 2025 avec la publication des résultats d'intérêt pour la cosmologie et la livraison des données. Les observations en polarisation, en partie préparatoire au SAT-kids de SO, et les engagements au support de NIKA2 dans le cadre du MoU impliquent une poursuite de des activités pendant encore quelques années. L'implication dans Euclid se poursuivra à moyen terme avec une contribution au *Science Ground Segment*, une participation à l'exploitation cosmologique des données d'Euclid et aux analyses multi-observables (Euclid-NIKA2).

Le lancement de LiteBIRD étant prévu au-delà de 2032, les activités instrumentales s'en trouvent décalées d'autant. Les développements d'infrastructures dans la salle millimétrique vont être capitaux pour mener à bien notre implication dans des futures expériences comme SO et LiteBIRD, tout en permettant une R&D de qualité dans le domaine mm et des KIDs. A moyen terme, les activités menées dans le cadre de l'ERC RadioForegroundsPlus sur les émissions d'avant-plan en polarisation constituent une excellente préparation aux analyses cosmologiques de LiteBIRD.

L'avenir immédiat de la participation à SO se structure autour de la demande CNRS AAR visant à la construction d'un SAT supplémentaire, basé sur la technologie KID. Ce projet est structurant pour l'équipe COSMO-ML pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit de concevoir, construire et mettre en service une caméra dans le cadre de la collaboration SO au sein de laquelle l'équipe souhaite exploiter les données cosmologiques. D'autre part, cela s'inscrit fortement dans le cadre de la synergie grenobloise sur les KIDs et contribue à poursuivre cette collaboration féconde. Finalement, cette proposition a contribué à fédérer une communauté IN2P3 (APC, IJCLAB), ce dont l'équipe ne peut que se féliciter. Un financement en 2024 permettrait de prévoir une installation dans quelques années dans le cadre d'*Advanced SO*. En parallèle, l'équipe COSMO-ML souhaite s'investir sur les analyses cosmologiques avec l'effet de lentille gravitationnelle et l'effet SZ. Cette thématique s'inscrit à la fois dans la continuité du LPSZ mais également dans le contexte de la préparation à CMB-S4.

Dans le cadre de la collaboration CMB-S4, la participation au *Data Management* en 2024-2026 comporte principalement la proposition d'utiliser l'écosystème Atlas Metadata Infrastructure ([AMI](#)), développée au LPSC, pour la gestion des métadonnées de la collaboration. Ce point est actuellement en discussion. A plus long terme, l'activité sera centrée sur la préparation de l'exploitation cosmologique de CMB-S4. La première lumière étant attendu pour 2030 au mieux, cette activité sera menée en parallèle des analyses cosmologiques auxquelles nous souhaitons participer dans SO. Nous envisageons par exemple de proposer des thèses SO/CMB-S4 ou des offres de postdocs combinant analyse de SO et préparation de CMB-S4.

Pour mener à bien ces projets ambitieux, l'équipe a une politique volontariste en termes de financement. Nous avons prouvé par le passé notre capacité à obtenir des financements (ERC, ANR, labex). Nous préparons l'avenir avec la même stratégie. Ainsi, deux postdocs (ERC Radioforegrounds+ et Enigmass) rejoindront l'équipe dans les prochains mois. Une ERC starting grant a été déposée en nov. 2023 avec le soutien de l'équipe, qui se trouverait ainsi

enrichie d'un porteur de projet (B. Bolliet), de 3 postdocs et un doctorant, tous sur SO et CMBS4. Une demande de financement ANR pour l'exploitation scientifique de Concerto a été déposée (1 postdoc). Nous préparons des demandes locales de postdocs (Enigmass sur la cosmologie avec CMB-S4/SO, Focus sur les KIDS) et nationales (CNES sur Euclid). Nous regrettons de ne pas avoir eu de renfort de permanents depuis 2011. A court terme, l'équipe dispose de plusieurs opportunités, sans toutefois de garantie d'être effectivement renforcée par un recrutement directement dans l'équipe. Une Chaire CPJ CNRS est obtenue pour 2024 sur la thématique cosmologie avec des instruments KIDS. Elle concerne trois laboratoires de trois instituts différents (IPAG, Neel, LPSC). Quel que soit le laboratoire d'affectation, ce recrutement bénéficiera à tous les acteurs de la synergie grenobloise sur cette thématique. Un poste de maître de conférences UGA (section 29) sera publié en 2024. Le profil de recherche sera sur la thématique cosmologie au LPSC. Cela concerne les équipes DARK et COSMO-ML et plus précisément les projets Rubin, Euclid, SO, CMB-S4 et LiteBIRD. Nous espérons qu'au moins une de ces personnes recrutées rejoindra effectivement l'équipe.

Au niveau local, il existe pour des raisons historiques deux équipes travaillant sur la cosmologie observationnelle (DARK et COSMO-ML). Elles sont impliquées dans des collaborations internationales différentes. Une partie des objectifs scientifiques est commune. Il s'agit de la cosmologie avec des amas et plus généralement avec les grandes structures. Des échanges scientifiques existent, par exemple : dans le cadre des Cosmo-café organisés conjointement par les deux équipes, avec des séminaires conjoints et plus généralement de l'échange d'information. Certains membres de l'équipe DARK ont par ailleurs déclaré une participation officielle à CMB-S4. On peut donc affirmer que les deux équipes sont déjà proches. Il est par exemple tout à fait possible d'envisager une thèse co-dirigée sur la thématique des corrélations croisées Rubin-SO ou Rubin-Euclid. Cependant, cette possibilité ne deviendra pertinente que lorsque les données en question seront disponibles et sous réserve de disponibilité des membres des équipes qui ont des engagements forts par ailleurs. La question d'une fusion des deux équipes nous est explicitement posée. Elle mérite discussion entre les membres actuels, notamment pour savoir quel serait le gain de bâtir une grande équipe Cosmologie. En conclusion, l'équipe COSMO-ML a joué un rôle majeur en cosmologie multi-longueurs d'onde dans les années précédentes. Elle ambitionne de continuer sur cette lancée et prépare des contributions importantes pour les grands projets de cosmologie du présent et du futur.

Composition de l'équipe au 1/11/23

- **Permanents** : A. Catalano (CR), F. Mayet (PU), J. F. Macías-Pérez (DR), L. Perotto (DR)
- **Doctorants** : D. Cherouvrier, C. Hanser, A. Moyer-Anin, S. Savorgnano

Contributions services techniques LPSC

- **Electronique** : J. Bounmy, O. Bourrion, O. Choulet, C. Hoarau, E. Lagorio, N. Ponchant, F. Rarbi, D. Tourres, C. Vescovi, J. Waquet
- **SDI** : J. Marpaud, M. Marton, P. Stassi
- **Informatique** : N. Achbak, G. Alguero, J. Fulachier, F. Lambert, J. Odier
- **Mécanique** : R. Bourroux, M. Kusulja, J. Menu, S. Roni, S. Roudier, F. Vezzu,
- **Administration** : A. Colas, C. Martin, J. Paquien, F. Petiot, C. Vannier

Liste des publications de l'équipe depuis 2015 : [cliquez](#)