

Document préparatoire (CS du LPSC)

Équipe DARK (11/2023)

TABLE DES MATIÈRES

I. L'équipe DARK.....	3
Membres (au 1 ^{er} novembre 2023).....	3
Membres passés (2017-2023).....	3
Bref historique et évolution des activités depuis 2017.....	3
II. Thèmes de recherche autour de LSST.....	5
Observatoire Rubin, relevé LSST et énergie noire.....	5
Cosmologie avec les amas de galaxies du LSST.....	5
Cisaillement gravitationnel : des images à l'analyse statistique.....	6
Courants d'étoiles et contraintes sur la matière noire.....	7
Ciel transitoire et le « broker » d'alertes FINK de Rubin.....	8
II. Aspects techniques : de la construction jusqu'à l'analyse des données.....	9
Chargeur de filtre.....	9
CCOBs.....	9
Le « commissioning » Rubin.....	10
Enjeux du « computing ».....	11
IV. Conclusions et quelques directions pour le futur.....	12
Exploitation scientifique du relevé LSST.....	12
Possibles synergies et implications dans d'autres expériences.....	12
Annexes.....	14
A.1. Synthèse des activités RCG et détection indirecte matière noire (2017-2023).....	14
A.2. FTE, responsabilités, accueil de stagiaires, etc.....	15
A.3. Contributions des services techniques sur LSST (2019-2023).....	17
A.4. Principales publications (2019-2023).....	18
A.5. Ressources en ligne (pour aller plus loin).....	18

I. L'équipe DARK

Membres (au 1^{er} novembre 2023)

- Johan Bregeon, CR (HDR) : caméra, sursauts gamma orphelins, broker d'alertes FINK
 - Céline Combet, DR (HDR) : cosmologie avec les amas, détection indirecte matière noire
 - Cyrille Doux, CR : lentillage gravitationnel, blending, statistiques et machine learning
 - Marine Kuna, MCF (HDR) : blending, streams matière noire
 - **David Maurin**¹, CR (HDR) : rayonnement cosmique, détection indirecte de matière noire
 - Marina Masson, PhD (2022-2025, dir Bregeon) : sursauts gamma orphelins et FINK
-
- Manon Ramel, PhD (2022-2025, dir. Kuna/Doux) : blending et stat. non-gaussienne
 - Juan Mena Fernández, Post-doc (2023-2025) : pipeline amas, simulations lentillage

Membres passés (2017-2023)

- 2011-2017 : Jean-Stéphane Ricol, CR : AMS-02, Rubin/CCOB, photo-z
- 2000-2019 : Aurélien Barrau, Prof. (HDR) : Rubin/CCOB, gravité quantique à boucle
- 2015-2021 : Cécile Renault, DR (HDR) : BAO, photo-z, médiation scientifique
- 2000-2022 : Laurent Derome, Prof. (HDR) : AMS-02, rayonnement cosmique galactique
- 2020-2022 : Calum Murray, Post-doc : cosmologie avec les amas
- 2020-2023 : Constantin Payerne, PhD (dir. C. Combet) : cosmologie avec les amas

Bref historique et évolution des activités depuis 2017

Historiquement et pendant de longues années, les activités de l'équipe DARK (dénommée AMS-CREAM avant 2016) ont été centrées sur le rayonnement cosmique galactique — activité à la fois expérimentale (construction et analyse) et phénoménologique. En particulier, ces dix dernières années, un des objectifs principaux de l'équipe a été d'assurer le retour scientifique de l'expérience AMS-02, installée sur l'ISS en 2011. Les membres de l'équipe DARK ont été leaders des premières analyses noyaux et isotopes dans AMS-02, et également de nombreux travaux d'interprétation incluant des limites sur les candidats matière noire via les antiprotons. Ce volet phénoménologie a également inclus une forte activité en lien avec la détection indirecte de matière noire en γ , dans le contexte des expériences Fermi-LAT et CTA. Ces activités sont devenues aujourd'hui minoritaires dans l'équipe (~ 0.7 ETP/an) et vont continuer leur déclin. C'est la raison pour laquelle nous n'en ferons qu'une synthèse très courte, donnée en annexe A.1. Synthèse des activités RCG et détection indirecte matière noire (2017-2023).

En parallèle à ces thématiques, l'équipe a eu aussi une activité autour de la gravité quantique à boucles, portée par A. Barrau et nombre de ses étudiant.e.s., et arrêtée en 2019 lors de son départ pour l'équipe de *physique théorique* au LPSC ; ces activités ne sont plus présentes dans DARK et nous n'en parlerons donc pas dans ce document.

L'équipe DARK a aussi une longue histoire avec Rubin-LSST qui a débuté au milieu des années 2000 sous l'impulsion d'A. Barrau et L. Derome. L'implication des services techniques du LPSC

¹ Responsable d'équipe.

dans LSST a elle débuté en 2008 pour les « Camera Calibration Optical Benches » (sous la responsabilité d'A. Barrau et M. Migliore), avec la conception du CCOB-WB (faisceau large) livré à SLAC fin 2017 et du CCOB-NB (faisceau fin) livré à SLAC en septembre 2021². Une seconde contribution majeure a débuté en 2011 autour de la conception et construction du chargeur de filtre (sous la responsabilité de F. Vezzu), et dont les derniers ajustements/livraisons auront lieu début 2024. La synthèse de ces contributions techniques jusqu'à fin 2018 est détaillée dans le [document préparatoire](#) du dernier CS, et nous nous concentrerons dans ce document sur la période 2019-2023. En ce qui concerne les thèmes scientifiques abordés par l'équipe dans LSST, nous pouvons schématiquement les séparer en deux volets :

- *2008-2021 : conception/construction du CCOB, photo-z et « Baryon acoustic oscillations » (BAO³)*. Ces activités ont impliqué ~1.5 FTE/an en moyenne, avec 2 thèses, 2 stages M2, 1 Masterarbeit et 1 postdoc, encadrés par A. Barraud, J.S. Ricol et C. Renault ; ces travaux se sont traduits par les publications [Burke et al. \(2010\)](#), [Gorecki et al. \(2014\)](#) et [Ansari et al. \(2019\)](#). Si les BAO et le photo-z ont été les premières thématiques scientifiques abordées dans l'équipe (en lien avec LSST), celles-ci ont été abandonnées suite au décès tragique de notre collègue C. Renault en 2021. Cécile, qui était arrivée dans l'équipe en 2015 (après avoir été dans *Planck*), avait fortement contribué à la visibilité de ces activités au sein de LSST-France, avec en particulier l'encadrement de nombreux stages, jouant aussi un rôle crucial pour finaliser les travaux de thèse d'A. Choyer dans la publication de 2019 ; ce travail avait permis de quantifier la précision à laquelle pouvait être reconstruite l'échelle BAO étant donnée la précision des redshifts photométriques de LSST. Elle avait commencé à encadrer un stagiaire de M2 (C. Hanser) pour une poursuite en thèse à la rentrée 2021, sur un financement qu'elle avait obtenue de l'université. Suite à son décès, ces thématiques n'ont pas été reprises dans l'équipe et nous n'y reviendrons donc pas dans ce document.
- *2017-2023 : exploitation/analyse du CCOB, cisaillement des amas, sursauts gamma orphelins, « blending »...* Entre 2017 et aujourd'hui, les activités scientifiques autour du futur relevé LSST ont cru au fil des nouvelles arrivées dans l'équipe, avec le recrutement CR de C. Combet en 2014 (d'abord dans *Planck* puis dans DARK à partir de 2016), la mutation de J. Bregeon en 2019 (ex-*Fermi-LAT/CTA* au LUPM), l'arrivée de M. Kuna en 2021 (en provenance de l'équipe *ATLAS* du LPSC), et le recrutement CR de C. Doux en 2022 (post-doc sur *DES*). L'ensemble de ces activités est décrit dans la suite du document.

Comme le souligne cette rapide introduction, la composition de l'équipe et les thèmes étudiés ont très fortement évolués ces dernières années. Nous discutons et montrons dans l'annexe A.2. FTE, responsabilités, accueil de stagiaires, etc. une vue synthétique de l'évolution du nombre de FTE dans l'équipe, les responsabilités prises par les membres de DARK (de l'échelle locale jusqu'à l'internationale), et notre implication forte dans la formation (encadrement de stagiaires du L1 au M2) et la diffusion des connaissances.

² En réalité, le CCOB-NB a été envoyé début 2021, mais a été bloqué au port d'Oakland de longs mois (pour des raisons d'assurance) après un feu dans la cale du bateau qui le transportait.

³ Cette échelle BAO caractérise la distance maximale sur lesquelles les ondes acoustiques se sont propagées dans l'Univers primordial, avant le découplage. Cette distance a été initialement mesurée dans le fond diffus cosmologique. Une mesure dans l'Univers récent, via l'agrégation préférentielle des galaxies à cette échelle, permet de donner des informations cruciales sur l'origine de l'expansion accélérée de l'Univers.

II. Thèmes de recherche autour de LSST

Observatoire Rubin, relevé LSST et énergie noire

La cosmologie observationnelle, et en particulier les observations de supernovæ lointaines, a montré que l'Univers était en expansion accélérée. Cette accélération peut être expliquée par l'ajout d'une composante énergétique de pression négative, semblable à une constante cosmologique, mais d'origine encore inconnue. Pour mieux comprendre la nature de cette composante (appelée énergie noire) et l'ensemble du modèle cosmologique, le « Legacy Survey of Space and Time » (LSST), qui sera mené à l'Observatoire Vera C. Rubin, va permettre de tracer l'histoire de l'expansion de l'Univers via un certain nombre de sondes cosmologiques. Ce télescope de 8m de diamètre situé dans le désert d'Atacama au Chili (voir figure 1), va observer près de la moitié du ciel, deux à trois fois par semaine, pendant dix ans, et détectera des centaines de milliers de supernovae et des milliards de galaxies. La « Dark Energy Science Collaboration » (DESC), où nous sommes largement impliqués, coordonne l'exploitation cosmologique des données du LSST.

Cosmologie avec les amas de galaxies du LSST

Les amas de galaxies représentent l'ultime étape de formation des structures de l'Univers. Leur distribution en fonction de la masse et du redshift est sensible au contenu en matière et énergie noires, et à leurs propriétés. Utiliser le comptage d'amas comme sonde cosmologique requiert donc d'en connaître leur masse. Dans le domaine visible couvert par Rubin, l'effet de lentille gravitationnelle faible est la méthode de choix pour la reconstruire. Cet effet consiste en une déformation de l'espace-temps due au potentiel gravitationnel de l'amas (donc de sa masse). Il se traduit par une déformation de l'image des galaxies d'arrière-plan (cisaillement) et par une augmentation de leur brillance (« magnification »).

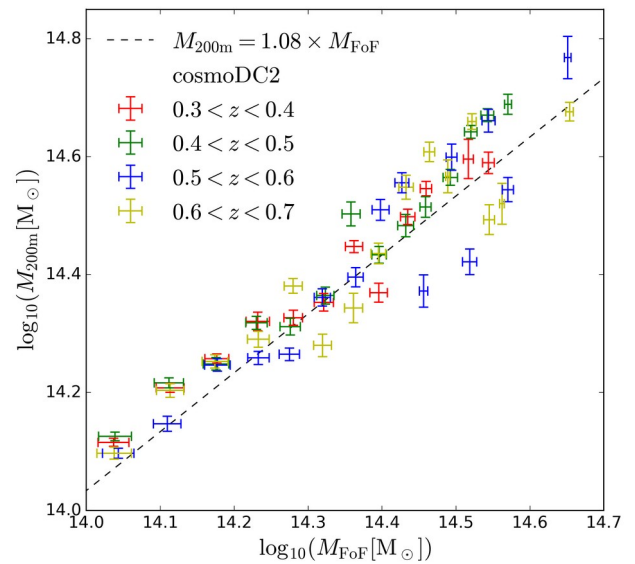
Figure 1. Photo (prise en avril 2022) de l'observatoire Vera C. Rubin, en construction au Cerro Pachón, au Chili, à 2,682 m d'altitude (crédit : Rubin Obs/NSF/AURA).

L'équipe DARK travaille à la préparation de l'analyse *amas de galaxies* au sein de DESC⁴. Sur la période couverte par ce rapport, cette activité a été coordonnée par C. Combet, accompagnée d'un doctorant (C. Payerne, 2020-2023), d'un postdoc (C. Murray, 2020-2022) et d'un doctorant brésilien visiteur (E. Barroso, 10/2022-07/2023). Nous avons largement contribué au développement du code DESC [CLMM](#) (« Cluster Lensing Mass Modeling ») permettant la reconstruction de la masse grâce au cisaillement gravitationnel. Nous avons aussi coordonné ce développement entre 2020-2022, impliquant une quinzaine de membres internationaux de la collaboration ; le code CLMM a été publié dans [Aguena et al. \(2021\)](#). La thèse de C. Payerne nous a par ailleurs permis d'exploiter les données simulées de DESC (DC2), pour étudier les systématiques liées à la reconstruction de la masse par effet de lentille (voir la figure 2 ci-dessous). Ce travail a été publié en partie dans l'article DESC [Kovacs et al. \(2020\)](#) et a donné lieu à deux notes internes référées (Payerne et al. 2021a,b). Nous sommes maintenant fortement impliqués dans le développement du « pipeline » d'analyse DESC (codes publics, documentés et

⁴ C. Combet est actuellement *co-conveneur* du groupe de travail *amas de galaxies* de DESC.

unit-testés) permettant l'estimation des paramètres cosmologiques grâce au comptage d'amas. Il s'agit là d'un travail de longue haleine du « working group » *amas* de DESC, dont les premières briques ont été posées par C. Payerne et E. Barroso, et auquel nous contribuons toujours.

Nous avons également travaillé sur des projets extérieurs à DESC. Une collaboration fructueuse entre C. Murray et C. Payerne nous a permis d'évaluer la robustesse et les limitations des « likelihoods » généralement utilisés pour le comptage d'amas (Payerne, Murray *et al.*, 2023), dans le cadre des futurs relevés comme LSST ou *Euclid*. Nous nous intéressons également aux effets de projection dus à la non-sphéricité des amas de galaxies et à comment en limiter l'impact (Payerne *et al.*, en préparation). Enfin, C. Murray (maintenant post-doc à l'APC) a proposé une nouvelle méthode, moins bruitée, permettant l'exploitation de la magnification pour reconstruire la masse des amas, et nous finalisons actuellement ce travail (Murray *et al.*, en préparation).



reconstruits par effet de lentille faible en fonction de la vraie masse. Figure de C. Payerne publiée dans Kovacs *et al.* (2020).

Cisaillement gravitationnel : des images à l'analyse statistique

Avec l'arrivée récente dans l'équipe de deux nouveaux membres (M. Kuna en avril 2021 et C. Doux en janvier 2022), l'équipe peut s'intéresser à un ensemble de thématiques plus large, et en particulier à l'étude du cisaillement gravitationnel comme sonde cosmologique⁵.

Une problématique importante et commune à l'étude des amas est celle du « blending » des galaxies, c'est-à-dire la superposition des galaxies sur la ligne de visée, du fait de la profondeur inégale du relevé LSST. S'il n'est pas corrigé, cet effet pourrait impacter toute la chaîne d'analyse jusqu'à la reconstruction des paramètres cosmologiques. Un groupe de travail sur cette problématique existe au sein de la collaboration DESC, coordonné par C. Doux. La thèse de M. Ramel, encadrée par M. Kuna et C. Doux, porte sur l'impact de l'effet de blending sur l'estimation de masse des amas par lentille gravitationnel et sur la cosmologie.

À l'autre bout de la chaîne d'analyse, les méthodes d'extraction de l'information cosmologique contenue dans les données de lentillage sont aussi abordées. Pour cela, C. Doux a pris la responsabilité de la génération de simulations cosmologiques pour l'équipe de *statistiques non-gaussiennes* dans DESC. Ces simulations seront utilisées conjointement avec des outils statistiques novateurs (exploitant le « deep-learning ») pour des analyses « simulation-based » des données de LSST. Des prévisions montrent que ces méthodes, pourvu que les simulations atteignent la précision suffisante, peuvent être quatre fois plus informative que l'analyse standard basée sur les fonctions de corrélation à deux points. Ces aspects sont d'ores et déjà mis en œuvre

⁵ Il s'agit ici du cisaillement gravitationnel dû aux galaxies et utilisé directement comme sonde cosmologique, et non du cisaillement induit par les amas et utilisé pour reconstruire leur masse ; la physique sous-jacente reste néanmoins la même.

par C. Doux dans l'analyse des données du « Dark Energy Survey » (DES), précurseur de Rubin-LSST. En particulier, M. Ramel travaillera dans la deuxième moitié de sa thèse sur l'analyse topologique des données existantes de DES, projet qui servira de banc d'essai pour les outils statistiques et leurs effets systématiques. Simultanément, J. Mena, nouveau post-doc dans l'équipe, contribuera à la génération des simulations et la préparation de ces analyses dans LSST.

Courants d'étoiles et contraintes sur la matière noire

Si le télescope Rubin est généralement pensé comme un outil pour contraindre la nature de l'énergie noire, il a été démontré que les grands relevés de galaxies fournissent également d'excellents et multiples moyens de contraindre la nature de la matière noire ([Drlica-Wagner et al., 2019](#)). En particulier, les modèles actuels de matière noire prédisent une formation hiérarchique de halos jusqu'aux masses sub-galactiques. L'étude de l'interaction gravitationnelle entre les halos de matière noire et les courants d'étoiles est l'un des rares moyens de détecter les halos sombres (sans baryons) à ces échelles.

Les courants d'étoiles sont des amas globulaires ou des galaxies naines satellites de la voie lactée, qui ont été étirés par effets de marée, jusqu'à former des traînées d'étoiles en orbite autour de notre Galaxie. En passant à leur proximité, les halos sombres de matière noire dévient et arrachent gravitationnellement des étoiles. L'analyse des fluctuations de densité des courants stellaires donnent des informations sur ces halos les ayant perturbés. La détection et la caractérisation de ces courants d'étoiles représentent donc un moyen de tester les prédictions des modèles dominants de matière noire, de type WIMP ou axion, et de les comparer aux modèles alternatifs comme ceux de matière noire chaude, floue ou auto-interagissante.

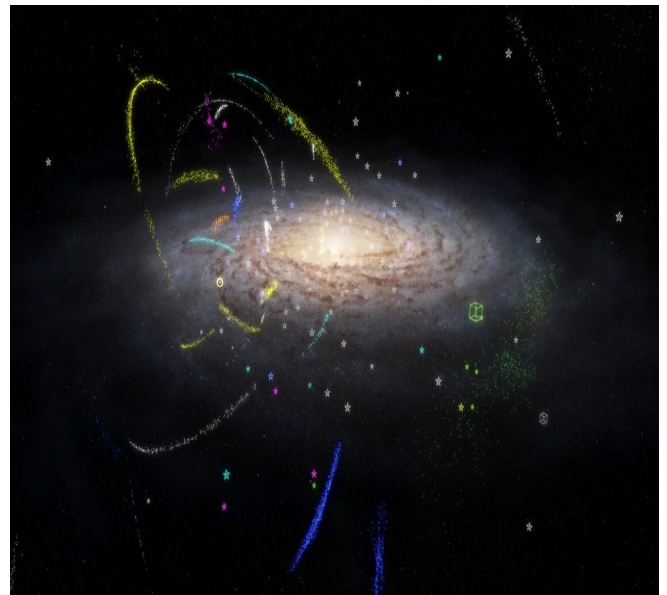


Figure 2. Vue d'artiste de la Voie Lactée et de ses courants stellaires (points colorés), amas globulaires (symbole 'étoile') et galaxies naines sphéroïdes (petits cubes). © S. Payne-Wardenaar / K. Malhan, MPIA

Rubin/LSST observera en dix ans vingt milliards d'étoiles qui permettront de découvrir de nouveaux courants stellaires sous les seuils de détection actuels, et d'augmenter la statistique des étoiles dans les courants déjà connus. Cette thématique est portée dans l'équipe DARK par M. Kuna, qui a déjà encadré plusieurs stagiaires pour le développement de cette analyse. Un stage M2, suivi d'une thèse, devrait débuter en février 2022. La responsabilité de coordination du projet « stellar stream » dans la collaboration DESC est aussi portée par M. Kuna. Ces travaux se feront en collaboration très étroite avec des membres de DESC, comme A. Drlica-Wagner qui a séjourné au LPSC cet été.

Ciel transitoire et le « broker » d’alertes FINK de Rubin

Le monitoring profond d’une très large partie du ciel, répété environ tous les trois jours par l’observatoire Rubin, révélera un grand nombre d’objets transitoires. Les alertes, générées via un traitement des images en ligne et destinées à la communauté astronomique, seront traitées par sept « brokers » d’alertes, dont FINK, développé au sein de l’IN2P3 depuis 2020.

Parmi les millions d’alertes générées chaque nuit, l’équipe DARK s’intéresse à celles qui pourraient révéler l’existence d’émission rémanente en provenance de sursauts gamma orphelin, c’est-à-dire des sursauts vus à grand angle par rapport à l’axe du jet. Dans cette configuration, les modèles prévoient que l’émission à plus basse énergie (domaines optique et radio) soit observable sous la forme de phénomène transitoire lent et de faible luminosité.

Cette thématique est portée par J. Bregeon au LPSC, avec pour objectif des développements de modules spécifiques *sursauts orphelins* pour FINK. La thèse de Marina Masson a démarré en octobre 2022 sur un financement obtenu en réponse à un appel d’offre de l’UGA. Le travail se déroule au niveau français dans le cadre du broker FINK, ce qui permet des contacts avec la communauté des transitoires en France, et notamment les experts en sursauts gamma de l’INSU (p.ex. F. Daigne de l’IAP). Au niveau international, un projet a été déposé dans le cadre du « Time Domain working group » de DESC : les collaborations sont pour le moment limitées mais amenées à s’amplifier, notamment dans le cadre des « data challenge ».

Identifier ne serait-ce que l’un de ces sursauts orphelins serait déjà une belle découverte. Si plusieurs dizaines peuvent être caractérisés, il sera possible de mieux contraindre les populations de sursauts gamma, la structure du jet, etc. Ces informations seront complémentaires aux observations dans le domaine gamma au sol et dans l’espace, mais aussi aux observations d’ondes gravitationnelles associées avec *LIGO/Virgo*. A moyen terme, l’idée est de rechercher des signaux d’ondes gravitationnelles sous le seuil aux localisations et dates des sursauts orphelins détectés dans les données du LSST, amenant à la découverte de nouvelles sirènes standard pour la mesure de la constante cosmologique H_0 .

II. Aspects techniques : de la construction jusqu'à l'analyse des données

Chargeur de filtre

Avec plus de trois milliards de pixels, la caméra placée au foyer du télescope de l'observatoire Vera C. Rubin est la [plus grande caméra CCD jamais construite](#). En plus des CCD du plan focal, la caméra intégrée possède trois lentilles permettant la focalisation de la lumière et un système mécanique complexe (*changeur de filtres*) permettant de changer le filtre optique placé devant la caméra sans intervention humaine.

L'IN2P3 a la responsabilité de la construction et de la mise en service du système changeur de filtres. Les services techniques du LPSC ont contribué à cet effort, en développant le *changeur de filtre* (sous-système du changeur de filtre) et les appareillages permettant la gestion des filtres hors caméra. Ce dispositif permet de transférer les filtres depuis leur boîte de stockage vers la caméra (opération répétée régulièrement en fonction de la cadence d'observation). Ces équipements ont été livrés à SLAC, aux États-Unis, en 2021. Pour leurs contributions, E. Lagorio (service électronique) et F. Vezzu (service mécanique) ont été récipiendaires du [Cristal collectif du CNRS 2021](#). Plusieurs missions à SLAC ont été effectuées depuis la livraison et une étape importante a été accomplie lorsque les filtres optiques ont été chargés pour la première fois dans la caméra grâce à ce dispositif, en juillet 2023. La livraison du second chargeur de filtres (copie du premier) vient d'avoir lieu et les personnels des services techniques se préparent maintenant à de nouvelles missions, tout d'abord à SLAC pour sa réception et les dernières vérifications, puis au Chili pour la mise en service *au sommet* en 2024 de l'ensemble des équipements. Sur le plus long terme, les accords DOE-IN2P3, en cours de renouvellement, prévoient que les laboratoires impliqués dans la construction fournissent l'expertise nécessaire à la maintenance du système sur la durée du grand relevé.

CCOBs

L'équipe DARK, avec le soutien des services techniques, a eu la responsabilité du développement de deux projecteurs (CCOB pour « camera calibration optical bench ») dédiés à la caractérisation de la caméra ainsi que des codes d'analyse pour leur exploitation scientifique.

Le CCOB *faisceau large* (CCOB-WB dans la suite) visait à la mesure de la réponse relative de l'ensemble des CCD du plan focal (en l'absence des lentilles) dans chacune des bandes optiques, avec une précision de l'ordre de 1%. Son utilisation et son exploitation sur la caméra n'ont malheureusement été que partielles : en effet, un problème sur le cryostat de la caméra début 2022 a fait glisser le calendrier et a contraint le projet Rubin à abandonner la prise de données du CCOB-WB (une déception pour l'équipe DARK et les personnels des services du LPSC concernés). Les personnels de SLAC ont depuis démantelé le CCOB-WB pour en récupérer les LEDs et leur carte électronique, afin de les réutiliser dans la caractérisation de la caméra intégrée. Nous ne sommes néanmoins pas impliqués dans cette utilisation.

Le CCOB *faisceau fin* (CCOB-NB) permet, quant à lui, de mesurer l'alignement du système optique de la caméra (lentilles et filtre), ainsi que la transmission totale de l'optique dans chacune des longueurs d'ondes de l'instrument, grâce à un faisceau monochromatique de 2,5 mm de diamètre. Le faisceau permet de scanner l'ensemble de la pupille de la caméra sous n'importe quel angle (voir la figure 4 ci-contre). Le CCOB-NB a été opéré pour la première fois en juin 2023 pour le Run 6a des tests électro-optiques : le système a tenu toutes ses promesses en terme de fiabilité et de flexibilité (J. Bregeon était présent à SLAC pour cette mise en route). Le système est de nouveau en action en ce moment même alors que le Run 6b est en cours jusqu'en février 2024. J. Bregeon est responsable des simulations et de l'analyse des données pour la vérification de l'alignement des éléments optiques de la caméra (voir le code [lsst-camera-dh/ghosts sur github](https://github.com/lst-camera-dh/ghosts)) : les résultats sont attendus pour le printemps prochain.

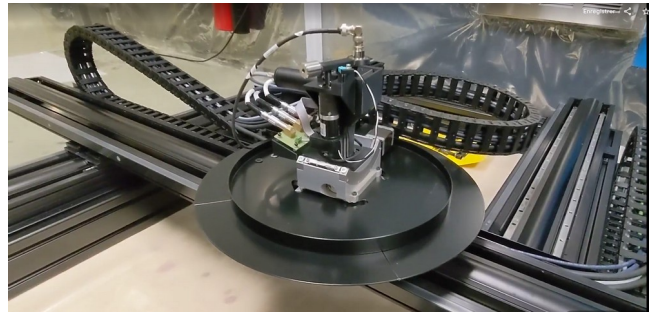


Figure 3. Photographie du banc d'étalonnage optique faisceau fin (CCOB-NB) de la caméra du Rubin. Le banc est composé d'une table de translations de 3m sur 3m, d'un berceau et d'un pivot au bout duquel est disposé l'élément optique d'émission du faisceau de lumière. Le dispositif permet d'envoyer la lumière en tout point de la caméra sur une vaste gamme d'angles d'incidence (crédit : LPSC).

Le détail des contributions des services techniques pour le chargeur de filtre et les CCOBs sont données dans l'annexe A.3. Contributions des services techniques sur LSST (2019-2023).

Le « commissioning » Rubin

Le commissioning Rubin implique les États-Unis, le Chili et la France. Il est organisé en « science units » qui regroupent des contributions pour la vérification du hardware (télescopes principal et auxiliaire, caméra et autres) et la validation du pipeline qui traitera les images brutes pour produire les catalogues d'objets. Ces « science units » ont été mises en place courant 2023, et certaines émanent de DESC, en particulier pour la validation du pipeline. Seules les personnes identifiées par le « Rubin commissioning » auront accès aux données de commissioning. La communauté LSST-France s'est saisie de cette question pour définir un ensemble de contributions basées sur l'expertise de l'IN2P3 (e.g., « data processing », « pipeline development », « computing », calibration, etc.). Dans ce contexte, l'équipe DARK est impliquée (et s'impliquera encore plus largement en 2024) selon les axes suivants :

- *Plan focal, qualité des données et calibration sur le ciel* : le travail effectué au sein de l'équipe DARK sur la caractérisation de la caméra à SLAC, via le CCOB-NB, se poursuivra au Chili, puisqu'il faudra de nouveau vérifier l'alignement des optiques et la transmission une fois la caméra installée sur le site. Plus largement, LSST-France a proposé de s'investir au niveau des analyses proches des pixels, forte de son expertise reconnue sur les CCD, ainsi que sur l'évaluation de la qualité des toutes premières données *sur le ciel* de l'instrument. Ce travail, auquel nous souhaitons contribuer (J. Bregeon et C. Combet), pourra démarrer en amont de l'arrivée de la caméra, grâce à la ComCam (« Commissioning Camera », avec 9 CCD seulement) qui devrait être installée sur le télescope mi-2024.

- *Détection d'objets, cisaillement et blinding* : C. Doux est co-responsable d'une « science unit » dédiée à la calibration des mesures de cisaillement gravitationnel et de l'effet de blinding. Cette « science unit » a démarré un travail de réflexion sur les tests à réaliser et les données sur ciel à recueillir pour cela. Le travail de développement de ces tests, en particulier sur le blinding, en collaboration avec d'autres laboratoires IN2P3 (APC, LPNHE) dans LSST-France, démarrera courant 2024.

Enfin, mentionnons que la collaboration DESC a également proposé plusieurs contributions au commissioning, dont une en lien avec l'effet de blinding dans les champs d'amas de galaxies. C'est évidemment un sujet important pour DARK et nous avons indiqué notre volonté de nous impliquer dans cet effort ; en effet, le statut de « commissioners » permet d'accéder à l'ensemble des données de la phase de commissioning.

Enjeux du « computing »

La question du computing est centrale au succès de l'exploitation des données du LSST, et l'équipe DARK bénéficie de l'expertise de J. Bregeon sur certains aspects.

- *Projet Dirac (outil pour l'utilisation des ressources informatiques distribuées)* : Dirac est un logiciel libre (sous licence GPL V3) de type *intergiciel* pour gérer des ressources de calcul distribuées (traitement et stockage des données). Il est utilisé par de nombreuses expériences dans lesquelles l'IN2P3 est impliqué, dont CTA, ILC, Belle II, BES et LHCb au CERN. Initié il y a près de 20 ans par l'expérience LHCb, Dirac est constitué depuis 2014 en Consortium qui associe l'ensemble des partenaires contributeurs internationaux. J. Bregeon a été responsable technique du projet au niveau de l'IN2P3 de 2017 à 2023, et continue à contribuer au développement et à la promotion du logiciel auprès des communautés d'utilisateurs ([Arrabito et Bregeon, 2020](#)).
- *Computing LSST* : Rubin va produire une quantité astronomique de données, de l'ordre de 20 PB par an, ce qui implique des infrastructures adaptées et des coûts significatifs pour le projet. Le « computing model » de Rubin prévoit que 40% des données du LSST soient traitées au CC-IN2P3 à Lyon, 35% à SLAC et 25% au Royaume-Uni. Le coût du calcul pour l'institut sera à régime de l'ordre de 600 k€ par an. Au-delà du traitement des données, les analyses scientifiques seront elles aussi gourmandes en ressources de calcul : l'équipe DARK est très impliquée dans la caractérisation de ces besoins en calcul, en lien avec les responsables scientifiques et techniques du computing LSST France.
- *Projet RubinOP* : J. Bregeon est PI du projet *RubinOP*, financé par la MITI du CNRS au printemps 2023 à hauteur de 20 k€. Ce projet vise à l'optimisation de la pipeline de traitement des données du LSST, dans le but de réduire à la fois les coûts et l'empreinte environnementale du calcul. Les contributeurs viennent de plusieurs laboratoires de l'IN2P3 (CC-IN2P3, APC, LAPP et LPSC) et des informaticiens de l'INS2I-LIRMM de Perpignan. Les premiers mois de travail ont été dédiés au profilage du code avec l'exploration des outils à disposition pour ce type de logiciel codé en divers langages (C, C++ , python). Nous espérons un renouvellement du financement MITI pour 2024, ainsi que l'arrivée d'un CDD IR au LPSC.

IV. Conclusions et quelques directions pour le futur

Exploitation scientifique du relevé LSST

L'équipe DARK et les services du LPSC sont impliqués depuis une quinzaine d'année dans la construction et la mise en service (de certains aspects) de l'Observatoire Rubin. La première priorité de l'équipe dans la décennie à venir est donc avant tout d'assurer le retour scientifique du relevé LSST, qui débutera en 2025 pour une durée de 10 ans. Nous planifions ce travail de longue haleine selon les axes de recherche évoqués plus haut. Les amas de galaxies et le cisaillement gravitationnel des galaxies nous permettront de contraindre le modèle cosmologique, dont les paramètres de croissances des structures et d'énergie noire. Les propriétés de la matière noire pourront quant à elles être explorées par l'étude des « stellar streams », que les sous-structures de matière noire de la Voie Lactée seront venues perturber. Enfin, le ciel transitoire exploré par LSST sera un outil complémentaire pour l'astrophysique multi-messenger, notamment pour mieux comprendre les mécanismes derrière les sursauts gamma.

Possibles synergies et implications dans d'autres expériences

Avec plusieurs expériences majeures, la décennie à venir s'annonce très prometteuse sur le plan de la cosmologie observationnelle ; LSST n'en est qu'un aspect. Les thématiques de recherche décrites plus haut s'inscriront donc dans un contexte expérimental riche et pourront bénéficier d'analyses jointes à d'autres jeux de données.

- *Possibles synergies avec Euclid.* Le satellite *Euclid* offrira des observations complémentaires à celles de LSST, bien que moins profondes, dans l'infrarouge. Les principales synergies entre Rubin/LSST et *Euclid* concernent (i) l'estimation des redshifts photométriques, grâce à la combinaison des bandes infra-rouges d'*Euclid* aux bandes visibles de Rubin ; (ii) la détection et la mesure des formes des galaxies, grâce à la plus haute résolution d'*Euclid* (qui ne souffre pas de l'atmosphère) ; (iii) la détection d'amas et la calibration de leur masse à haut redshift par effet de lentille faible, grâce à la qualité accrue des redshifts photométriques venant de la combinaison des deux expériences, mais aussi la qualité des formes mesurées par *Euclid* et la photométrie profonde de LSST. Ces trois aspects sont centraux aux activités LSST de l'équipe et une implication dans *Euclid* sur le court/moyen terme est fortement envisagée. Il s'agirait également de développer une synergie locale avec certains collègues de l'équipe cosmo-ML, également intéressés par la cosmologie avec les amas de galaxies et impliqués dans *Euclid*. Des discussions en ce sens ont débuté entre les personnes concernées.
- *Contributions dans Roman.* Les mêmes synergies évoquées pour *Euclid* s'appliquent au « Roman Space Telescope » de la NASA, qui prendra des données à partir de 2027. Ces synergies pourront être poussées encore plus avant avec Roman car la profondeur de son relevé cosmologique photométrique (« High Latitude Survey », HLS) sera similaire à celle de LSST. C. Doux a rejoint en 2023 la « Project Infrastructure Team » (PIT), soutenue par la NASA, pour le développement et l'application du pipeline d'analyse du HLS. Cette PIT, nommée pour cinq ans (2024-2029) renouvelable, analysera les

premières données de Roman (2027-2032) et inclut cinq collaborateurs français. Le CNES soutient une partie de l'activité pré-existante sur Roman, et des discussions vont démarrer pour demander des financements plus importants (notamment des postdocs). Il est donc envisagé des contributions à ce pipeline pour l'analyse du lentillage (incluant statistiques non-gaussiennes) et la mitigation du « blending », via des postdocs CNES et autres (ANR, ERC).

- *Possibles synergies avec les expériences CMB.* En plus de la complémentarité des instruments Rubin, *Euclid* et Roman, les observations du fond diffus cosmologique par les futures expériences Simons Observatory et CMB-S4 vont fournir des sondes cosmologiques de l'Univers récent grâce aux anisotropies secondaires : lentillage du CMB, effets Sunyaev-Zeldovich (thermique et cinétique), fond diffus infrarouge. Une implication de moyen terme dans des efforts inter-collaborations est donc fortement envisagée par C. Doux pour l'étude des corrélations croisées entre les sondes galaxies et CMB.

Annexes

A.1. Synthèse des activités RCG et détection indirecte matière noire (2017-2023)

Analyse des données de l'expérience AMS-02. L'expérience AMS-02 est un spectromètre⁶ installé sur l'ISS depuis mai 2011, pour répondre aux grandes questions du RCG (sources, transport dans la Galaxie, détection ou contraintes sur les candidats matière noire). Les flux des particules $Z=1-26$, électrons, positrons et anti-protons de la centaine de MeV au TeV ont été mesurés, avec plus de 200 milliards d'événements recueillis à ce jour. Autour de L. Derome, l'équipe DARK a été leader de l'analyse des flux pour les éléments $Z=1-5$ (p, He, Li, Be et B), puis de l'analyse des flux et rapports isotopiques (pour $Z=1-5$) dont des résultats préliminaires ont été présentés à de grandes conférences internationales (COSPAR et ICRC) en [2019](#), [2021](#) et [2022](#). Cette dernière analyse, dont la publication est en préparation, sera vraisemblablement la dernière contribution majeure aux analyses AMS-02 (L. Derome étant devenu directeur du LPSC en 2022).

Phénoménologie du RCG et détection indirecte de matière noire. Autour de D. Maurin et en collaboration avec des membres du LAPTh, LAPP et LUPM (dans le cadre du LabEx ENIGMASS et du projet IN2P3 PHENOD 2016-2019), les efforts se sont concentrés sur l'interprétation des mesures de précision d'AMS-02 (détermination des paramètres de transport, mise à jour de contraintes sur les candidats matière noire, recommandations sur les sections efficaces de fragmentation à mesurer en lien avec l'expérience NA61 au CERN, etc.). Depuis 2016, ces travaux ont conduit à une quinzaine de publications dans des journaux de rang A et de nombreux « proceedings » de conférences internationales. Des outils à destination de la communauté ont aussi été fournis, comme la première version publique du code de propagation [USINE](#) (2019) et deux mises à jour de la base de données du RCG [CRDB](#) (en 2020 et en 2023).

Les aspects détection indirecte de matière noire ont aussi été explorés via les γ , avec des études systématiques menées par D. Maurin et C. Combet (et collaborateurs extérieurs) pour classer les cibles les plus prometteuses (halos sombres, dSph, amas de galaxies et diffus extragalactique) pour les observatoires Fermi-LAT et CTA. Ces activités ont baissé d'intensité ces cinq dernières années, mais nous avons néanmoins fourni une 3^e version du code public [CLUMPY](#) en 2019 (pour les signaux matière noire en γ et ν)⁷ et cinq publications dans des journaux de rang A, dont deux récentes (en collaboration avec le LUPM) proposant une classification des cibles matière noire dans le cas d'annihilations dépendants de la vitesse. Pour le futur très proche, une 4^e version du code CLUMPY est en préparation pour la fin de l'année, mais cette activité va continuer son déclin dans l'équipe.

Par ailleurs, J. Bregeon est contributeur de l'ANR Frano-Allemande Micro (03/2020-03/2024), portée par C. Bérat du LPSC. Il a contribué au développement du code [micro combined fit](#)

⁶ AMS-02 est constitué d'un aimant permanent et 8 plans de silicium pour reconstruire la trajectoire. Des détecteurs à scintillation (TOF) encadrent l'aimant et signalent le sens de parcours de particules. Le cylindre intérieur est tapissé de veto pour rejeter les particules détruites sur le détecteur. Un détecteur à radiation de transition (TRD) permet d'identifier les leptons, un imageur Cherenkov RICH (développé au LPSC) les isotopes, et un calorimètre électromagnétique mesure l'énergie des particules chargées.

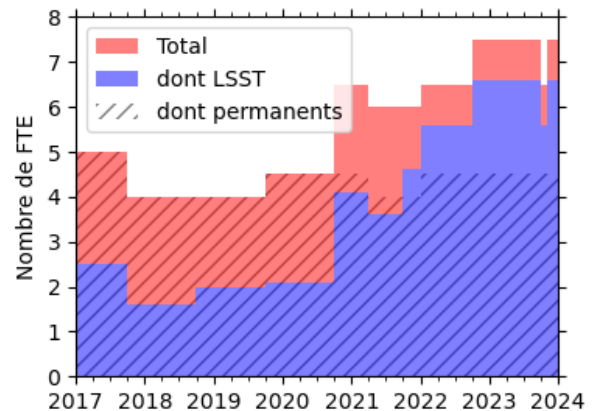
⁷ Ce code est très utilisé dans la communauté, en particulier dans des publications H.E.S.S., CTA, HAWC et ANTARES.

([zenodo](#)) qui permet d'ajuster de manière consistante le spectre en énergie, la distribution en masse et la direction d'arrivée des rayons cosmiques de ultra-haute énergie (publication sous peu).

A.2. FTE, responsabilités, accueil de stagiaires, etc.

FTE (dans l'équipe) et services à la communauté (2017-2023).

La première figure (à droite) illustre ce qui a été dit dans la sous-section « », à savoir que les thématiques de l'équipe ont beaucoup évoluées depuis 2017. En effet, alors que celles en lien avec LSST (en bleu) étaient au même niveau que les autres avant 2021 (les autres activités étant RCG, LQG et détection indirecte de matière noire), ces dernières ont quasi-disparu après 2022. Soulignons par ailleurs, que malgré les nombreux mouvements dans l'équipe, le nombre de permanents (en hachuré) est resté stable toutes ces années. L'augmentation du total (en rouge) est expliquée par la présence de doctorants et post-doctorants sur les thématiques en lien avec LSST.



La figure ci-contre montre les diverses responsabilités prises par les membres de l'équipe, en lien avec LSST, à l'international dans DESC (bleu foncé) ou français dans LSST-France (bleu clair), au niveau national (en rose) et en fin au niveau plus local (orange et cyan pour le LPSC). Nous voyons ici aussi la montée en puissance dans LSST à partir de 2021, en reconnaissance du rôle que nous jouons dans DESC. Cette visibilité et ce service à la communauté, qui va du local (LPSC, LabEx, Université) au national (IN2P3, INSU, CNES)



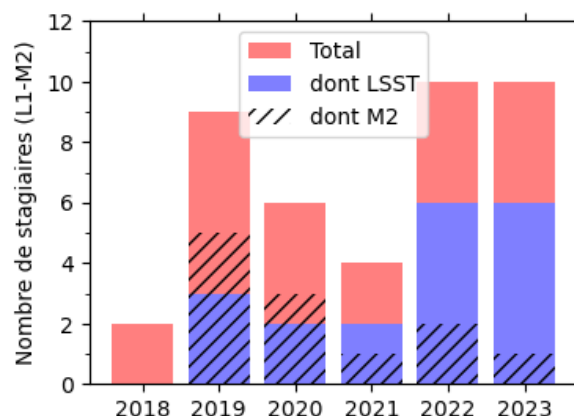
et international, sont très chronophages et se paient dans le nombre de FTE réellement disponibles pour faire avancer la science.

L'expertise des membres de l'équipe DARK est aussi illustrée par leurs sollicitations comme « referee » dans de nombreuses revues, comme évaluateurs pour des appels à projets (au niveau national et international), membres de jury de thèse/HDR, membres de comités de sélection de postdocs ou concours MCF, organisation de conférences.... que nous ne listerons pas.

Enseignements, stagiaires et écoles.

Notre équipe ne compte plus qu'une enseignante-chercheuse (M. Kuna), depuis les départs d'A. Barrau (en 2020) et de L. Derome (en 2022). Ces derniers ont longtemps été responsable du master PSC, qui est un grand pourvoyeur de doctorant.e.s au LPSC et dans d'autres laboratoires. Grâce aux cours dispensés par M. Kuna dans les filières de physique (jusqu'au niveau M2), nous gardons un contact avec ces étudiant.e.s, et en pratique, notre équipe est très attractive pour eux/elles :

nous recevons chaque année beaucoup plus de sollicitations que de places disponibles. La figure ci-dessus indique le nombre de stagiaires (de L1 à M2) encadré sur la période 2018-2023, avec les stages en lien avec LSST en bleu ; les hachures indiquent les stages au niveau M2, incluant en particulier un Masterarbeit (2019-2020). Plusieurs membres de l'équipe DARK contribuent aussi à la formation dans des écoles d'été (p. ex. à l'école internationale GRASPA à Annecy-le-veau), ou par le biais de participation à des comités d'organisation de ces écoles (p.ex. l'école IN2P3 « School Of Statistics »).



Communication scientifique.

Ces dernières années, les activités de communication scientifique ont été portées avec une énergie débordante et une grande originalité par C. Renault. Mentionnons le projet vidéo alliant science et humour avec Karim Duval (dans le cadre du LabEx ENIGMASS, en 2020), visualisé plus de 250 000 fois, le site web documentaire interactif pour découvrir la matière noire (mis en ligne sur lamatierenoire.in2p3.fr fin 2019), la toile cosmique en réalité virtuelle montrée en de nombreux lieux et occasions (« Dark Matter Day » au Musée de Grenoble en 2018, les « Oufs d'Astro » à Vaulx-en-Velin en 2019, etc.). Les membres de l'équipe qui l'ont côtoyée tiennent à rendre à Cécile un dernier hommage, pour tout ce qu'elle a apporté à l'équipe, et en particulier sur les actions de communication scientifique qui ont visé et touché un public extrêmement large et divers et dans lesquelles elle nous a impliqués.

Nos actions de communication scientifique continuent encore aujourd'hui, mais à un niveau moindre. Parmi nos activités récurrentes, mentionnons notamment l'encadrement et la coordination des stages de 3^e au sein du laboratoire et notre participation au « CERN French Teacher Program » à destination des enseignants de physique du secondaire.

A.3. Contributions des services techniques sur LSST (2019-2023)

Les services techniques du LPSC sont partie prenante de la construction de la caméra depuis plus de quinze ans, avec notamment la responsabilité de la conception, de la construction et de la livraison du chargeur de filtre pour Francis Vezzu, et la responsabilité des bancs de calibration optique (CCOB) pour Myriam Migliore. La période 2019-2023 (voir [ici](#) pour le détail des activités avant 2019) correspond à la fin de la construction proprement dite, puisque le premier chargeur de filtre a été livré à SLAC en 2019 et le second modèle a été livré le mois dernier. Les bancs de calibration optique ont, quant à eux, été livrés en 2018 et 2021.

Le tableau ci-dessous récapitule l'investissement du personnel des services techniques sur la période, soit au total plus de 12 ETP.ans sur une période de 5 ans.

	Qualité	Nom	Prénom	Catégorie	BAP	Quotité	ETP 2019 Total	ETP 2020 Total	ETP 2021 Total	ETP 2022 Total	ETP 2023 Total	ETP 2024 Total
16	M.	BOULY	Jean-Luc	IE	C	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
3	M.	DARGAUD	Guillaume	IR	E	100.0	20.0	20.0	20.0	20.0	3	2
19	M.	DE LAMBERTERIE	Pierre	IE	C	100.0	25.0	25.0	15.0	2.0	2	0
5	M.	ERAUD	Ludovic	IE	C	100.0	15.0	15.0	3.0	3.0	3	2
21	M.	FAURE	Remi	T	C	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
22	M.	FOMBARON	Dominique	T	C	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
7	M	KUSULJA	MILE	AI	C	100.0	0.0	60.0	60.0	40.0	40	15
8	M.	LAGORIO	Eric	IE	C	100.0	40.0	40.0	40.0	20.0	20	15
27	M.	MARTON	Marc	AI	C	100.0	20.0	8.0	8.0	8.0	8	0
28	M.	MENU	Johann	IE	C	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
12	Mme	MIGLIORE	Myriam	IR	C	100.0	70.0	70.0	30.0	30.0	5	2
31	M.	ODIEVRE	Yvan	T	C	100.0	10.0	15.0	0.0	0.0	0	0
32	M.	PERBET	Eric	T	C	80.0	60.0	50.0	20.0	0.0	0	0
36	M.	RONI	Samuel	T	C	100.0	15.0	15.0	5.0	0.0	0	0
38	M.	SCORDILIS	Jean-Pierre	T	C	100.0	35.0	35.0	20.0	0.0	0	0
39	M.	TOURBA	Emmanuel	T	C	100.0	10.0	10.0	0.0	0.0	0	0
40	M.	VESCOVI	Christophe	IR	C	100.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0	0
15	M.	VEZZU	Francis	IR	C	100.0	70.0	70.0	70.0	50.0	50	20
42	Mme	VIVARGENT	Lucie	AI	C	100.0	20.0	20.0	5.0	0.0	0	0

L'implication de F. Vezzu, de M. Kusulja du service mécanique mécanique et d'E. Lagorio du service électronique, reste primordiale en 2024 et 2025 pour les tests des chargeurs sur la caméra à SLAC, puis au Chili après l'envoi de la caméra sur site au printemps 2024. À plus long terme, il est nécessaire que l'expertise des personnes impliquées de longue date, en particulier F. Vezzu et M. Migliore, puisse rester disponible pour le début des opérations et les phases inévitables de maintenance. L'accord avec le projet Rubin prévoit une disponibilité de nos experts sous forme de « best effort ».

Il est à noter que la quasi-totalité des pièces mécaniques a été réalisée par l'atelier mécanique du LPSC, ce qui a été une chance formidable pour un projet comme celui-là. Nous tenons enfin à souligner l'importance du rôle du service administratif et financier pour assurer l'ensemble des achats liés à la construction, l'expédition du matériel, ainsi que le traitement de missions souvent difficiles à mettre en œuvre pour les États-Unis.

A.4. Principales publications (2019-2023)

Cosmologie

- Testing the accuracy of likelihoods for cluster abundance cosmology, [MNRAS \(2023\)](#)
- DES yr 3: cosmological constraints from cosmic shear in harmonic space, [MNRAS \(2022\)](#)
- Cosmology with the Roman Space Telescope - Synergies with CMB lensing, [MNRAS \(2022\)](#)
- Measuring weak lensing masses on individual clusters, [MNRAS \(2022\)](#)
- The effects of lensing by local structures on the dipole of radio source counts, [MNRAS \(2022\)](#)
- Validating synthetic galaxy catalogs for dark energy science in the LSST era, [OJAp \(2022\)](#)
- CLMM: a LSST-DESC cluster weak lensing mass modeling library for cosmology, [MNRAS \(2021\)](#)
- FINK, a new generation of broker for the LSST community, [MNRAS \(2021\)](#)
- The LSST DESC DC2 Simulated Sky Survey, [ApJSS \(2021\)](#)
- Lab measurements of instrumental signatures of the LSST camera focal plane, [SPIE \(2020\)](#)
- Impact of photo-z on the galaxy power spectrum and BAO scale in LSST, [A&A \(2019\)](#)

Rayonnement cosmique galactique (RCG) et matière noire

- Current status and desired accuracy of cross-sections for cosmic-rays II., [arXiv \(2023\)](#)
- A cosmic-ray database update : v4.1, [EPJC \(2023\)](#)
- The importance of Fe fragmentation for LiBeB analyses, [A&A \(2022\)](#)
- A simple determination of the halo size from $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ data, [A&A \(2022\)](#)
- Classification of γ -ray targets for ν -dep and subhalo-boosted annihilations, [JCAP \(2022\)](#)
- AMS-02 antiprotons and dark matter: Trimmed hints and robust bounds, [SciPost Physics \(2022\)](#)
- The rigidity dependence of GCR fluxes & connection with diffusion coefficient, [Front. Phys. \(2022\)](#)
- New min/med/max propagation models for dark matter searches with GCRs, [PRD \(2021\)](#)
- Cosmic-Ray Isotopes with the Alpha Magnetic Spectrometer, [ICRC \(2021\)](#)
- The AMS on the ISS: Part II - Results from the first seven years, [Physics Report \(2021\)](#)
- CRDV v4.0: ultra-high energy, ultra-heavy, and antinuclei cosmic Rays, [Universe \(2020\)](#)
- USINE: Semi-analytical models for Galactic cosmic-ray propagation, [CPC \(2020\)](#)
- Galactic halo size in the light of recent AMS-02 data, [A&A \(2020\)](#)
- Combined analysis of AMS-02 (Li,Be,B)/C, N/O, ^3He , and ^4He data, [A&A \(2020\)](#)
- AMS-02 antiprotons' consistency with a secondary astrophysical origin, [PRR \(2020\)](#)
- Fitting B/C cosmic-ray data in the AMS-02 era: a cookbook, [A&A \(2019\)](#)
- CLUMPY v3: γ -ray and ν signals from dark matter at all scales, [CPC \(2019\)](#)

Autres

- FINK, a new generation of broker for the LSST community, [MNRAS \(2021\)](#)
- A DIRAC-based prototype for the CTA data management, processing & simulations, [ASPC \(2020\)](#)
- Optimizing Cherenkov photons generation and propagation in CORSIKA for CTA Monte-Carlo simulations, [Computing and Software for Big Science \(2020\)](#)

A.5. Ressources en ligne (pour aller plus loin)

Outils publics (développés par les membres de l'équipe)

- Masse des amas reconstruite par cisaillement gravitationnel ([CLMM](#))

- Base de données du rayonnement cosmique ([CRDB](#))
- Code de propagation du rayonnement cosmique ([USINE](#))
- Code de calcul des flux γ et neutrinos matière noire ([CLUMPY](#))

Autres ressources

- LSST France (<https://www.lsst.fr/>)
- Collaboration DESC (<https://lsstdesc.org/>)
- Broker d'alertes FINK (<https://www.fink-broker.org/>)
- Expérience AMS-02 (<https://ams02.space/>)
- Intergiciel DIRAC (<https://dirac.readthedocs.io/en/latest/>)