

EUSO : the Extreme Universe Space Observatory

Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie : la voie spatiale

Résumé :

La collaboration internationale JEM-EUSO s'est engagée depuis une dizaine d'années dans le développement de la voie spatiale pour la détection des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (UHECRs). Les enjeux scientifiques se situent au cœur de la physique des astroparticules et de l'astrophysique des hautes énergies, avec d'une part la recherche des sources des UHECRs et l'étude phénoménologique de l'un des quatre piliers de l'astronomie multi-messagers (avec les photons, les neutrinos et les ondes gravitationnelles), et d'autre part la modélisation des sources les plus énergétiques de l'univers et la compréhension des mécanismes d'accélération des particules dans le cosmos.

La voie spatiale apparaît comme une réponse naturelle aux limitations inhérentes aux observatoires terrestres (surface de déploiement limitée et couverture partielle du ciel) et aux nouveaux besoins observationnels (résultant de l'analyse des données actuellement disponibles). Cette voie spatiale est désormais crédible, compte tenu du succès de deux missions EUSO-Ballon (CNES) et EUSO-SPB (NASA), et des performances démontrées par la mission spatiale MINI-EUSO, actuellement en opération de façon nominale à bord de la station spatiale internationale (ISS).

Le développement du programme de la collaboration JEM-EUSO bénéficie d'un fort soutien international, à travers un ensemble de missions d'envergure et d'intérêt scientifique croissants, qui permettent de valider le concept instrumental et les choix technologiques, tout en consolidant la collaboration et en renforçant son expertise technique et opérationnelle.

Les *work packages* assumés par les équipes françaises sont centraux dans l'ensemble des missions EUSO, puisqu'ils concernent le design et la production des unités de détection et de leur électronique de front end, ainsi que leur assemblage (sous-traité à une société française) et la calibration complète de surface focale.

Ces responsabilités techniques assurent aux équipes de l'IN2P3 une très grande visibilité, encore renforcée par le rôle stratégique qu'elles assument au sein de la Collaboration (comité exécutif, coordinateur européen, co-responsable de la liaison avec l'ESA) et par l'historique du développement du programme (initié par la mission du CNES EUSO-Ballon, sous responsabilité française et avec chef de projet global à l'IN2P3).

Les principaux efforts actuels portent sur l'exploitation de la mission spatiale MINI-EUSO (ASI et ROSCOSMOS), en cours d'opération, et la préparation de la mission EUSO-SPB2 (*super pressure balloon*, pour un vol de très longue durée), sélectionnée et financée par la NASA, et pour laquelle les équipes françaises assument leurs responsabilités et *work packages* habituels.

Les caractéristiques de l'unité de détection développée et améliorée depuis près d'une décennie sont sans précédent en termes de sensibilité, de compacité, de faible consommation, etc. Ses performances uniques, ainsi que le mode d'opération des missions EUSO, permettent d'envisager de nombreuses synergies avec d'autres domaines scientifiques, déjà partiellement mises en œuvre au niveau international au sein des missions en cours. D'autres pistes de valorisation sont également explorées, notamment dans le cadre d'une R&T financée par le CNES. Enfin, l'expertise technique acquise par les équipes françaises leur permet d'interagir directement avec les ingénieurs de l'entreprise Hamamatsu, dans le cadre d'un partenariat, afin d'améliorer les performances des détecteurs primaires (tubes photomultiplicateurs multi-anodes).

1) Enjeux scientifiques et atouts de la communauté française

Présente sur toutes les « roadmaps » et dans tous les rapports de prospective depuis deux décennies, l'élucidation de l'origine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (UHECR), de leur nature et de leurs mécanismes d'accélération est reconnue à l'échelle internationale comme l'un des enjeux majeurs du domaine des « astroparticules », en liaison étroite avec l'ensemble de l'astrophysique des hautes énergies, notamment à travers la compréhension physique et la description astrophysique des sources les plus puissantes de l'univers connu. Les UHECRs constituent par ailleurs l'un des quatre piliers de la stratégie globale dite « multi-messagers » pour l'étude de l'univers, avec les photons, les neutrinos et les ondes gravitationnelles. Dans ces deux derniers domaines, des progrès décisifs ont été accomplis ces dernières années, avec l'ouverture historique d'une astronomie non-photonique dont le développement marquera les décennies à venir. Dans le domaine des UHECRs, les résultats de l'Observatoire Pierre Auger (Auger) et du *Telescope Array* (TA) ont fait progresser de manière considérable nos connaissances sur la partie la plus extrême du spectre d'énergie des rayons cosmiques, et stimulé de très nombreuses études à travers le monde.

La France, particulièrement à travers l'IN2P3, a largement contribué au succès d'Auger sur le plan expérimental et observationnel, ainsi qu'au profond renouvellement du domaine au niveau théorique et phénoménologique. Ce sont notamment les chercheurs de l'IN2P3 qui ont initié, dès avant les résultats d'Auger relatifs à la composition des UHECRs, les nouvelles études phénoménologiques prenant en compte les noyaux d'ultra-haute énergie et non plus seulement les protons (en s'appuyant d'ailleurs sur des modèles de Physique nucléaire développés au sein de l'institut), avec des conséquences majeures sur les modèles d'accélération et de propagation. Ce sont eux également, qui ont mis en lumière l'importance de l'étude de la transition Galactique/extragalactique pour le rayonnement cosmique (au niveau du spectre d'énergie, de la composition et des anisotropies), reconnaissant la richesse des contraintes qui peuvent en être tirées, tant pour la phénoménologie des UHECRs que pour les modèles de sources Galactiques. Enfin la prise en compte détaillée des déflexions des rayons cosmiques par les champs magnétiques a ouvert un vaste champ d'études à l'interface entre théorie, phénoménologie et observations.

Les modèles et les codes numériques développés au sein de l'institut nous permettent aujourd'hui de simuler des cartes du ciel réalistes, pour une grande variété de modèles astrophysiques (incluant des modèles d'accélération, pour des sources de divers types, transitoires ou non, de densités, de distributions spatiales et d'évolutions cosmologiques variées), de les contraindre à l'aide des observations actuelles, et de comparer leurs prédictions pour les *data sets* plus larges et/ou plus riches et/ou plus uniformes que fourniront les observatoires de prochaine génération. En outre, les modèles de propagation détaillés permettent de calculer les flux de particules secondaires, photons et neutrinos, produites par interaction des UHECRs primaires avec le fonds diffus cosmologique (CMB) et autres fonds de photons intergalactiques (notamment infra-rouges). Ceci permet d'établir de manière explicite un lien entre les différents messagers, et de tirer parti des contraintes offertes par l'étude des divers rayonnements diffus sur les modèles de sources. Cet élément, potentiellement très précieux, constitue une part encore trop peu exploitée de l'astronomie multi-messagers, qui, si elle se concentrait trop exclusivement sur l'observation simultanée des sources à travers différents canaux, laisserait de côté les rayons cosmiques chargés qui parviennent sur Terre avec un délai trop important, et priverait cette astronomie nouvelle d'une partie importante de son potentiel.

Or, compte tenu de son expérience et de ses atouts spécifiques, la communauté française peut mettre à profit sa forte capacité de recherche et d'innovation dans ce domaine majeur pour les astroparticules, en conservant une position équilibrée entre les versants théorique, instrumental et d'analyse des données, héritage d'une longue histoire nationale remontant à Pierre Auger lui-même. Comme l'on sait, ce domaine des astroparticules est en plein essor au niveau international, et la France y jouit d'une position tout à fait privilégiée, avec d'une part un investissement institutionnel important dès les premières étapes de cet essor (cf. la création, à un moment crucial, de la « Section 47 » du CNRS, la forte participation à l'APPEC, la création de l'APC, etc.), d'autre part un savoir-faire expérimental renforcé par une participation très

importante à Auger, avec le soutien décisif de l'IN2P3, et enfin une grande reconnaissance de ses chercheurs au sein de la communauté internationale. À ces atouts doit être ajouté le rôle majeur joué par la communauté française dans la mise en œuvre des nouvelles voies de développement du domaine, avec notamment la détection radio des gerbes atmosphériques géantes et la transposition dans le domaine spatial de la technique dite de fluorescence. Ces travaux s'inscrivent dans une vision stratégique à moyen terme, qui a été portée par les équipes et assumée très en amont. Il convient à présent d'en tirer les bénéfices et d'en récolter les fruits scientifiques, ce qui sera l'un des enjeux de la décennie qui s'ouvre dans le domaine des UHECRs, afin de poursuivre le développement du versant « rayons cosmiques » de la stratégie multi-messagers.

S'il est clair, sur le plan théorique, que ce développement impliquera l'approfondissement coordonné de nombreux domaines de l'astrophysique et des astroparticules, la direction à suivre sur le plan observationnel devra également s'appuyer sur la complémentarité de plusieurs approches.

2) État de l'art et nouveaux besoins observationnels

Si l'on se base sur les attentes de la communauté des UHECRs formulées il y a plus d'une vingtaine d'années, l'absence de détection de sources ponctuelles par les observatoires Auger et TA peut sembler décevante. Elle ne doit toutefois pas être vue comme un échec : bien au contraire, puisque les données recueillies se sont avérées d'une très grande qualité (notamment celles de l'Observatoire Pierre Auger, qui permettent d'ailleurs d'ouvrir également des questions potentiellement très importantes relatives à la physique des gerbes de particules de très haute énergie), qu'elles ont conduit à modifier très largement notre compréhension du phénomène des UHECRs, et qu'elles portent en elles la raison même de cette absence de détection, à savoir la présence apparemment dominante, aux plus hautes énergies, de noyaux plus lourds que les protons, et donc davantage défléchis par les champs magnétiques (notamment dans la Galaxie).

D'une manière générale, les données d'Auger et de TA plaident fortement pour la mise en place de moyens d'observation accrus à l'extrême limite du spectre d'énergie, au-delà de $5 \cdot 10^{19}$ eV. L'un des enjeux de ce domaine d'énergie est d'exploiter l'effet d'horizon GZK, dû à l'interaction des UHECRs avec le fonds diffus cosmologique (CMB et infrarouge), afin de réduire considérablement (jusqu'à moins d'une dizaine, voire quelques unités) le nombre de sources potentielles contribuant significativement au flux observé, et de surmonter la confusion angulaire des sources, même en présence de déflexions non négligeables.

Les récentes données fournies par les observatoires au sol montrent que l'entreprise n'est pas vaine, puisque les premières anisotropies significatives, aux moyennes et grandes échelles angulaires, ont pu être établies. Toutefois, leur amplitude reste relativement faible, et ne permettent pas de trancher quant à l'origine des UHECRs, et *a fortiori* leur mode d'accélération. Il est clair qu'un accroissement du rapport signal-sur-bruit de ces anisotropies sera l'un des enjeux majeurs des futurs développements. L'une des options, suivie par *Auger Prime*, vise en quelque sorte, à défaut d'accroître le signal, à réduire le bruit, en obtenant une résolution en masse des gerbes cosmiques telle qu'il serait possible d'isoler, dans la carte du ciel, les UHECRs les plus légers, et donc les moins défléchis par le champ magnétique. En éliminant ainsi le « bruit » (plus) isotrope fourni par les noyaux plus lourds, et sous l'hypothèse que la composante de protons ne chute pas trop rapidement à haute énergie, un signal d'anisotropie devrait pouvoir apparaître de manière plus significative, probablement à des échelles angulaires plus petites, ce qui représenterait un pas significatif.

L'autre option, complémentaire et particulièrement intéressante aux énergies extrêmes, consiste à accroître le signal en augmentant notablement la statistique. Une telle approche ne peut être suivie avec les moyens traditionnels, car multiplier par dix la surface de détection d'Auger ($3\,000 \text{ km}^2$) est aujourd'hui jugé inaccessible. Une option possible pourrait être le recours à la technique de détection radio : c'est l'approche suivie notamment par le projet GRAND. Une autre approche, particulièrement avantageuse sur le plan conceptuel et le plan logistique, consiste à conserver la technique éprouvée de détection et de reconstruction des gerbes cosmiques à partir du signal de fluorescence, mais à la porter dans l'espace. Un instrument unique, observant depuis une orbite basse (comme celle de l'ISS) avec un champ de vue de $\pm 30^\circ$

couvre en effet à lui seul environ 200 000 km². En outre, l'opération depuis une orbite spatiale permet d'observer, avec le même instrument, l'ensemble du ciel avec une couverture proche de l'uniformité.

Enfin, les développements récents ont fait apparaître un avantage supplémentaire de l'option spatiale dans la perspective multi-messagers, avec la possibilité d'orienter l'instrument vers le limbe de la Terre, afin d'observer des gerbes de neutrinos montantes (conversion d'un neutrino tau en particule tau dans la croûte terrestre, puis décroissance du tau initiant une gerbe observable par la lumière Tcherenkov directe reçue par l'instrument). Le seuil en énergie pour un tel processus est nettement plus bas, autour de 10¹⁷ eV, voire en-deçà, ce qui permet de détecter les neutrinos cosmogéniques (produits en vol par les UHECRs) dont la mesure du flux et du spectre en énergie est un enjeu très important. En effet, ces neutrinos donnent également accès à des sources de rayons cosmiques situées au-delà de l'horizon GZK, et donc à l'histoire cosmologique des sources. Par exemple, l'absence possible de sources de protons visibles aux énergies extrêmes n'empêche pas qu'il en existe derrière l'horizon (situé à seulement quelques dizaines de Mpc), ou que de telles sources aient été plus actives ou aient accéléré à plus haute énergie par le passé. L'effet GZK n'affectant pas les neutrinos, eux seuls seraient capables de donner accès à de telles informations. Cette technique d'observation de la lumière Tcherenkov en provenance du limbe, initialement pensée dans un contexte de vols ballon, a été reprise au sein de la Collaboration JEM-EUSO comme une composante importante de la mission POEMMA (cf. ci-dessous).

3) La voie spatiale : le programme JEM-EUSO et la visibilité des équipes françaises

Comme évoqué ci-dessus, le développement de la voie spatiale pour l'étude des UHECRs présente le double avantage de permettre un accroissement considérable de la statistique, et d'assurer une couverture complète du ciel avec un seul et même instrument. Ceci permet, d'une part, d'éclairer le conflit actuel entre les données recueillies dans l'hémisphère nord (TA) et dans l'hémisphère sud (Auger), notamment en ce qui concerne le spectre d'énergie au-delà de 5 10¹⁹ eV (jusqu'à 7σ), irréconciliables sous l'hypothèse d'un flux globalement isotrope. Un instrument spatial permettra de déterminer si ces différences doivent être attribuées à des erreurs systématiques différentes dans les mesures effectuées, ou si elles sont réelles, c'est-à-dire d'origine astrophysique, ce qui fournirait des indications extrêmement précieuses et des contraintes très fortes sur les modèles de sources. D'autre part, une couverture complète du ciel donne accès à une caractérisation plus précise (même à statistique égale) des anisotropies à grande échelle, ainsi qu'à une étude exhaustive des points chauds dans le ciel vu en UHECR. Enfin, elle permet d'accroître la significativité des études de corrélation entre les directions d'arrivée des UHECRs et différents types de sources, ainsi que leur pouvoir discriminant.

Ces caractéristiques, et la perspective d'un accroissement majeur de la statistique, ont conduit une large communauté internationale à s'engager pleinement dans le développement de cette voie spatiale pour les UHECRs, dont la pleine maturité sera atteinte dans les toutes prochaines années. Il s'agit de la collaboration internationale JEM-EUSO (16 pays, 350 membres, dont environ 120 chercheurs et ingénieurs pleinement actifs), qui vise à installer en orbite basse un télescope UV observant l'atmosphère terrestre afin d'y détecter la lumière de fluorescence des gerbes atmosphériques géantes induites par les UHECRs.

La mise en œuvre dans un environnement spatial de la technique « de fluorescence », aujourd'hui bien maîtrisée au sol, requiert des développements instrumentaux importants, qui ont justifié la mise en place, par la collaboration JEM-EUSO, d'une série d'expériences et de missions intermédiaires, permettant de valider les différents aspects du protocole et leur intégration, et de les mettre en œuvre au sein de missions scientifiques opérationnelles. Ces missions ont eu pour but non seulement de caractériser le détecteur et de valider ses performances, notamment pour la reconstruction des gerbes atmosphériques, mais aussi de recueillir des données scientifiques précieuses concernant l'émissivité du ciel en UV, de déterminer les seuils de détection et de définir les paramètres d'observation optimaux pour une mission de grande envergure. En outre, elles permettent de recueillir des données inédites sur les petits corps du système solaire via l'observation des météores avec un seuil en luminosité extrêmement bas (comptage de photons

uniques), d'observer d'une manière nouvelle les phénomènes atmosphériques nommés « elfes », d'accroître de plusieurs ordres de grandeur la capacité de détection des *strangelets* ou *q-balls*, ou encore d'aborder de façon innovante la problématique des débris spatiaux de petite taille et de leur désorbitation. Cette opportunité fait d'ailleurs l'objet d'une collaboration prometteuse entre les équipes de JEM-EUSO et l'équipe de Gérard Mourou (Prix Nobel de Physique 2018), qui vient de déboucher sur la sélection et le financement d'une mission spatiale au Japon, dont les équipes de l'IN2P3 sont partenaires.

La stratégie d'EUSO s'est ainsi déployée via une série de missions ballons et spatiales : EUSO-Balloon (CNES, 2014), EUSO-TA (au sol, depuis 2015), EUSO-SPB (NASA, 2017), Mini-EUSO (ASI et Roscosmos, 2019) et EUSO-SPB2 (NASA, 2022), avec en vue la mission K-EUSO, inscrite dans le « long term program » de l'agence RosCosmos (2024), et la *Probe mission* POEMMA, avec des objectifs scientifiques étendus aux neutrinos, sélectionnée en tant que « Probe study » par la NASA en mars 2017, et actuellement en cours d'étude pour le prochain *Decadal Survey*.

Comme le démontrent ces activités, le programme JEM-EUSO s'est considérablement développé au niveau international, avec le soutien continu des principales agences spatiales (CNES, ESA, ASI, NASA, JAXA, ROSCOSMOS), ainsi que des instituts nationaux des 16 pays participants. Nous donnons ci-dessous quelques précisions supplémentaires sur ces développements.

Il est important de noter que les équipes françaises impliquées ont acquis une position centrale au sein de la Collaboration JEM-EUSO, grâce :

- à leur expertise scientifique, avec notamment la responsabilité du *science case* et une influence importante sur la hiérarchie des objectifs et les compromis instrumentaux et observationnels ;
- à leur maîtrise du domaine de la photo-détection, qui leur assure une position centrale au sein de la collaboration, avec la responsabilité du développement de la surface focale et de son étalonnage précis ;
- à leur expertise technologique en électronique, avec la responsabilité de l'électronique de front-end, s'appuyant sur le développement d'un ASIC original, SPACIROC, par OMEGA ;
- au soutien et au financement par le CNES de la mission EUSO-Balloon.

Cette mission CNES sous ballon stratosphérique, qui a volé de façon nominale en août 2014, a offert à la Collaboration internationale la possibilité cruciale de démontrer le principe et les performances du concept expérimental, ainsi que sa capacité collective à développer l'instrumentation requise. Cette mission a marqué la première étape du déploiement international de la stratégie EUSO, qui se poursuit depuis avec la mission EUSO-SPB de la NASA ("super-pressure-balloon"), qui a volé en avril/mai 2017, la mission Mini-EUSO (désormais à bord de l'ISS, depuis la fin août 2019 – et qui a donné lieu à un Communiqué de presse de l'IN2P3), et la mission K-EUSO, qui a passé avec succès la revue de *Conceptual Design* (phase A) en avril 2019.

Grâce à cet investissement inaugural du CNES, la composante française de la collaboration JEM-EUSO jouit aujourd'hui d'un rayonnement scientifique et technique de premier plan. Le PI français est membre du Comité Exécutif restreint et Coordonnateur européen de la collaboration internationale. Il est également responsable de la Topical Team financée par l'ESA autour de ce programme, et récemment renouvelée. En outre, l'expertise technique des équipes de l'IN2P3 (APC et OMEGA) en photodétection et en électronique est non seulement reconnue à l'échelle internationale, mais jugée cruciale pour tous les développements la collaboration. C'est en effet l'unité de détection développée par la France (et assemblée à La-Croix-Saint-Ouen par l'entreprise Matra Electronique) qui est utilisée dans l'ensemble des missions de la collaboration (passées, présentes et futures), du fait de ses caractéristiques techniques uniques. Ceci garantit aux équipes de l'IN2P3 une très grande visibilité, et leur permet d'explorer d'autres types d'applications, tout en développant ses performances, notamment via un projet de R&T qui vient d'être accepté par le CNES (2020).

Cette position privilégiée au sein de la collaboration internationale JEM-EUSO résulte des efforts consentis au cours des dix dernières années, qui ont permis de porter la voie spatiale pour l'étude des UHECRs à un niveau de maturité tel qu'elle offre désormais une voie de développement non seulement crédible, mais particulièrement prometteuse pour faire franchir à ce domaine scientifique un pas décisif, et lui permettre de se joindre pleinement au développement à l'échelle internationale des astroparticules et de l'astronomie multi-messagers. Et c'est parce qu'elle est en mesure, en outre, de garantir une participation effective et centrale des équipes françaises à cet effort international, non seulement au programme scientifique, mais encore à l'instrumentation proprement dite, que nous pensons utile et judicieux de soutenir, au niveau national, le développement de ce programme scientifique et expérimental, capable en effet d'assurer l'équilibre évoqué plus haut entre théorie, phénoménologie, expérimentation et instrumentation.

4) Concept instrumental des missions EUSO

Le concept instrumental des missions EUSO repose sur la détection de la lumière de fluorescence des gerbes atmosphériques induites par les UHECRs. Lorsqu'une particule de très haute énergie pénètre dans l'atmosphère terrestre, son interaction avec une molécule de l'air conduit à la production de nombreuses particules secondaires, elles-mêmes de très haute énergie et interagissant avec l'atmosphère pour produire de nouvelles particules, et ainsi de suite. La cascade hadronique et électromagnétique qui en résulte (appelée « gerbe atmosphérique ») peut contenir des centaines de milliards de particules relativistes, traversant l'atmosphère et excitant au passage les molécules de l'air, notamment les molécules d'azote qui, en se dés excitant promptement, émettent un rayonnement de fluorescence principalement sous forme de raies UV. Ce sont ces photons UV qu'il convient d'observer, avec une précision spatiale et temporelle permettant de reconstruire *a posteriori* le développement de la gerbe, afin de déterminer la direction d'arrivée du rayon cosmique incident. En outre, la mesure de l'intensité lumineuse au cours du développement de la gerbe permet de reconstruire l'énergie de la particule incidente, ainsi que sa nature nucléaire, via l'observable indirecte appelée « X_{\max} », qui correspond au grammage (en g/cm^2) du point de développement maximum de la gerbe dans l'atmosphère, au-delà duquel le nombre de particules décroît, les pertes d'énergie l'emportant sur la génération de nouvelles particules au sein de la cascade.

Comme indiqué plus haut, cette technique de détection est bien maîtrisée au sol, et le principal enjeu, pour un instrument spatial, est de la mettre en œuvre au sein d'un système embarqué, de faible consommation, observant la gerbe de beaucoup plus loin que les instruments au sol, et avec une précision suffisante pour réaliser les objectifs scientifiques. Ces contraintes ont conduit à un design original consistant en un télescope UV à grand champ, placé en orbite basse (compatible avec une installation sur l'ISS) et orienté vers l'atmosphère, couvrant une surface au sol de l'ordre de $200\,000\text{ km}^2$. La surface focale est composée de tubes photomultiplicateurs multi-anodes (MAPMT) de 64 pixels, pour un total de plus de 300 000 pixels, imageant l'atmosphère avec un temps d'intégration de $1\ \mu\text{s}$ (ou $2.5\ \mu\text{s}$ pour les premières missions) et une résolution de 750 m au sol au centre du champ de vue. À cet élément principal s'ajoutent une caméra infrarouge et un LIDAR permettant de connaître l'état de l'atmosphère (présence et altitude des nuages, transparence), et ainsi d'assurer une reconstruction fiable des gerbes et une détermination précise de l'acceptance. La période active pour la détection des UHECRs a été estimée à 14%, à partir des données relatives à la couverture nuageuse moyenne sur les zones survolées, et en tenant compte du fait que l'instrument ne peut opérer efficacement que de nuit, sous faible lune [*Astropart. Phys.* 44, 76, (2013)].

L'optique mise à part, l'instrumentation d'EUSO est essentiellement modulaire, sa surface focale consistant en la juxtaposition d'éléments appelés « modules de photo-détection » ou PDM (*photo-detection module*), formant des unités de détection indépendantes. En partant des photodétecteurs eux-mêmes, les MAPMTs sont d'abord groupés par 4 (matrice 2x2) pour former des « cellules élémentaires » ou EC (*elementary cell*), intégrant l'alimentation haute tension et l'électronique de front-end, dont le cœur est constitué par des ASICs spécialement développés par l'UMS Oméga (modèle SPACIROC). Neuf ECs sont ensuite groupés en une matrice 3x3 pour constituer le PDM, qui inclut l'électronique de plus haut

niveau, incluant le *housekeeping* et l'ensemble du système d'acquisition et de traitement du signal, avec l'implémentation des différents niveaux de trigger.

NB : le monitoring permanent de l'atmosphère réalisé par l'instrument, ainsi que les caractéristiques techniques, permettent d'étendre les objectifs scientifiques principaux à d'autres domaines scientifiques que l'astrophysique, notamment la physique de l'atmosphère (et plus particulièrement des zones orageuses, avec la détection des TLEs et TEBs avec une résolution spatiale et temporelle sans précédent) et la physique des petits corps du système solaire, avec la possibilité de reconstruire la trajectoire, de déterminer la vitesse et de mesurer l'intensité lumineuse UV des météores dans le champ de vue de l'instrument. Cette importante synergie a fait l'objet en 2017–2018 d'une proposition dans le cadre de l'appel européen « ERC Synergy », qui n'a malheureusement pas été sélectionnée, mais qui a établi des contacts très utiles avec les communautés concernées, aujourd'hui mis à profit dans le cadre de l'analyse des données EUSO.

Les caractéristiques techniques de l'instrumentation d'EUSO et de ses différents sous-systèmes, ainsi que leur mode de fonctionnement et leurs performances, ont été présentées en détail dans les articles de la Collaboration JEM-EUSO, notamment dans le numéro spécial du journal *Experimental Astronomy* consacré à JEM-EUSO (vol. 40, 2015). De même, les performances globales de JEM-EUSO ont été évaluées au moyen de simulations, et présentées notamment dans *Exp. Astron. 40, 183 (2015)*. La confiance générale en ces évaluations a été renforcée par leur conformité aux mesures effectuées lors des missions préliminaires développées par la Collaboration (cf. ci-dessous).

5) Développement du programme EUSO : passé, présent, futur

La mise en œuvre du programme EUSO a conduit les membres de la Collaboration internationale à proposer des missions intermédiaires, qui ont reçu l'appui des institutions et agences spatiales concernées, et ont permis d'attester la viabilité de la méthode de détection, une fois portée dans l'espace, ainsi que l'ensemble des éléments permettant d'établir ses performances (efficacité de détection et seuil en énergie).

Comme indiqué ci-dessus, les PDMs (*photo-detection modules*) représentent les briques élémentaires de la surface focale, entièrement fonctionnelles et indépendantes, qui sont ensuite juxtaposées pour couvrir le champ de vue global visé. C'est donc sur la conception, la réalisation et l'opération de ces PDM qu'ont porté les efforts de la Collaboration JEM-EUSO, afin de démontrer la faisabilité de la mission.

a) EUSO-Balloon

La première version complète d'un PDM a été développée à partir de 2012. C'est notamment le CNES qui a permis à la Collaboration de réaliser un pas décisif, grâce au financement de la mission EUSO-Balloon, sous ballon stratosphérique. Il s'agit d'une mission préparatoire utilisant un seul PDM, avec une optique de Fresnel adaptée pour l'observation des émissions transitoires UV dans un champ de vue de $11.5^\circ \times 11.5^\circ$, depuis une altitude de 38 km. Le succès de cette mission a été assuré grâce au vol de l'instrument en août 2014, au départ de Timmins (Ontario, Canada). Il a permis de valider la technique de détection et de mesurer avec une résolution spatiale sans précédent l'émissivité UV de la Terre au-dessus de différents types de sol (forêts) ainsi qu'au-dessus des nuages, ce qui fournit la base de référence pour le fonds UV au-dessus duquel se développent les gerbes cosmiques. Pour ce vol d'une nuit, la détection d'une telle gerbe était bien sûr très peu probable. C'est pourquoi la mission ne prévoyait pas, à ce stade, d'implémentation du trigger pour la détection des gerbes. Cependant, pour démontrer la possibilité de détecter et de reconstruire de telles gerbes, la mission prévoyait des tirs d'impulsions lumineuses effectuées à partir d'un laser embarqué sur un hélicoptère volant sous le ballon, dans le champ de vue d'EUSO-Balloon. La diffusion de la lumière dans l'atmosphère reproduit un signal dont la source se propage à la vitesse de la lumière dans le champ de vue, similaire à celui des gerbes de rayons cosmiques (NB : cette analogie est également utilisée par les détecteurs d'UHECRs au sol, Auger et TA). Plus de 200 de ces « gerbes artificielles » ont pu être observées par EUSO-Balloon lors de son vol, et reconstruites avec une précision angulaire de l'ordre de 2° , conforme aux attentes.

b) EUSO-TA

Parallèlement, un PDM de conception identique a été développé par la Collaboration JEM-EUSO pour une expérience au sol, EUSO-TA, sur le site du Telescope Array, détecteur d'UHECRs installé dans l'Utah (USA). Cet instrument a permis de détecter des gerbes de rayons cosmiques, conjointement avec TA (trigger externe), ainsi que des « gerbes laser » à différentes distances et de différentes intensités, pour explorer l'efficacité de détection en fonction de l'intensité équivalente de la gerbe.

c) EUSO-SPB

Après le succès de la mission CNES EUSO-Balloon, une version améliorée du PDM a été développée, avec notamment des EC (cellules élémentaires) plus compactes, une nouvelle version de l'ASIC (SPACIROC 3, de meilleure résolution temporelle et de plus grande dynamique de comptage), et l'implémentation complète de la chaîne d'acquisition et de traitement des données, y compris au niveau des triggers. Cela a donné lieu à la mission de la NASA EUSO-SPB, où SPB se réfère aux « Super Pressure Balloon » de la NASA, destinés aux vols de longue durée sous ballon pressurisé.

La mission, soutenue par le CNES pour la préparation des *work packages* français et à travers une participation à la campagne de vol, s'est également appuyée sur un système d'alimentation entièrement autonome utilisant des panneaux solaires (alors que la mission EUSO-Balloon, d'une durée d'une seule nuit, utilisait des batteries), ainsi qu'une télémétrie permettant l'envoi des données au sol. Le vol d'EUSO-SPB, au départ de Wanaka (Nouvelle-Zélande) a eu lieu en avril/mai 2017, et a été un succès total sur le plan instrumental. Malheureusement, le ballon a fait l'objet d'une fuite d'hélium, qui a empêché le maintien de l'instrument en altitude au cours de la nuit. Il a donc fallu lâcher du ballast chaque jour pour permettre à l'instrument de se maintenir en vol, et lorsque le ballast a été épuisé, l'instrument a finalement sombré dans l'océan au large des côtes chiliennes. Ainsi, le vol, initialement prévu pour une mission de 3 mois, avec détection de quelques gerbes, n'aura finalement duré que 12 jours, au cours desquels le fonctionnement nominal de l'instrument a pu être établi, mais sans permettre la détection d'une gerbe de rayons cosmiques.

Des mesures importantes de la variabilité de l'émissivité UV des nuages et de l'océan ont néanmoins pu être réalisées, très utiles pour préciser les performances attendues d'une future mission spatiale. Les tests préalables qui avaient été effectués sur le site d'EUSO-TA avaient en effet permis de valider les simulations effectuées à l'aide de l'outil ESAF (développé par la collaboration JEM-EUSO au fil des ans). L'efficacité de détection en fonction de l'énergie, telle que prédite par ESAF, s'est révélée en accord avec les résultats expérimentaux obtenus avec EUSO-SPB lors de la campagne au sol. Les performances d'une mission spatiale peuvent ensuite s'en déduire en ajustant le niveau de fonds UV mesuré en vol par EUSO-SPB. Le résultat de cet exercice crucial a permis de confirmer les estimations initiales de la Collaboration JEM-EUSO, et donc de renforcer la stratégie globale développée pour la détection des UHECRs depuis l'espace.

d) Mini-EUSO

Un autre exemplaire de PDM a été développé par les partenaires internationaux pour la mission spatiale Mini-EUSO. Il s'agit d'une mission des agences russe et italienne (ROSCOSMOS, ASI), actuellement en opération à bord de la Station Spatiale Internationale (lancement réussi en août 2019), avec des performances nominales. Cette mission fait partie intégrante de la Collaboration JEM-EUSO. L'instrument comporte une optique de Fresnel à deux lentilles et un PDM de génération 2, identique à celui ayant volé dans la mission EUSO-SPB, effectuant des observations à travers la fenêtre de quartz (transparente aux UV) du module russe Zvezda. Pour cette mission, une électronique nouvelle a été développée pour le traitement des données et la gestion globale du PDM (mais sans modification de l'électronique de front-end, sous responsabilité française). Outre l'augmentation des *Technical Readiness Levels* (TRL) de la technologie EUSO résultant d'une utilisation prolongée dans l'ISS, les objectifs de la mission Mini-EUSO sont nombreux. Elle fournira des informations nouvelles et très importantes grâce à la possibilité d'enregistrer un volume considérable de données sur les clés USB qui sont ramenées régulièrement sur Terre par les astronautes. Cette mission permet en outre d'implémenter de nouveaux

modes de prise de données, en *slow trigger*, essentiels pour développer les synergies scientifiques avec le domaine de la Physique de l'atmosphère et l'étude des météorites et petits corps du système solaire (voir ci-dessus), correspondant à des phénomènes beaucoup plus lents que le développement des gerbes atmosphériques.

À titre illustratif, nous montrons en annexe 2 quelques résultats préliminaires, tirés des premiers échantillons de données transmises par télémétrie depuis l'ISS.

e) **TUS**

Parallèlement à l'activité de la Collaboration JEM-EUSO, les chercheurs russes ont développé un programme de détection des UHECRs depuis l'espace. Il s'agit de la mission KLYPVE (qui signifie UHECR en russe latinisé). En 2016, un précurseur de cette mission, appelé TUS, a été lancé sur le satellite Lomonosov. Cet instrument a pu prendre des données pour la première fois depuis l'espace, et obtenu des données remarquables sur l'émissivité UV de la Terre ainsi que sur les TLEs, avec la détection de détails importants dans le phénomène des elfes, jamais observés auparavant. En outre, TUS a pu observer au moins un candidat UHECR particulièrement sérieux. Le succès de TUS a confirmé l'intérêt de la voie spatiale pour l'astrophysique des UHECRs, ainsi que la sélection de KLYPVE et son inscription dans le *long term program* de l'agence ROSCOMOS.

f) **K-EUSO**

À la suite d'un rapprochement stratégique entre la Collaboration JEM-EUSO et les collègues russes ayant développé TUS, désormais réunis au sein du programme EUSO, un nouveau design a été proposé pour la mission KLYPVE, s'appuyant sur la technologie développée au sein de EUSO via les missions mentionnées ci-dessus. Ce design, qui accroît de manière très notable les performances de l'instrument original KLYPVE, est intégré dans une nouvelle version de la mission, approuvée par ROSCOSMOS, qui se nomme désormais K-EUSO (pour KLYPVE-EUSO). Cette mission, dont la date de lancement est encore incertaine, car notamment conditionnée au prolongement officiel de l'ISS au-delà de 2024, sera la première mission spatiale majeure dans le domaine des UHECRs, d'une envergure suffisante pour accomplir une partie significative des objectifs scientifiques de la Collaboration. En effet, K-EUSO permettra pour la première fois de dresser une carte complète du ciel en UHECRs, avec une exposition globale double de celle d'Auger, dans chacun des hémisphères. L'instrument devrait consister en un télescope UV à optique de Schmidt, mais l'option réfractive avec lentilles de Fresnel est toujours ouverte. Ses détecteurs et la surface focale dans son ensemble seront calqués sur les modèles de la mission EUSO-SPB2, avec la version 3 du PDM (voir ci-dessous). Pour sécuriser son développement dans le cadre international, un partenariat formel reste à établir avec les partenaires européens (membres de la Collaboration JEM-EUSO), qui fourniront la cinquantaine de PDMs constituant la surface focale, probablement dans le cadre d'une Mission d'opportunité de l'ESA.

NB : après divers contacts, une lettre d'intérêt et de soutien aux activités K-EUSO a été envoyée par le *Directorate of Human and Robotic Exploration Programme* de l'ESA (en charge de l'ISS) au directeur du STAC (Scientific and Technical Advisory Council) de ROSCOSMOS. Cette lettre est jointe en annexe 3. ROSCOSMOS a également reçu une lettre de soutien de Gérard Mourou, Prix Nobel 2018, faisant valoir l'intérêt de la mission K-EUSO pour d'autres objectifs scientifiques, notamment pour développer un programme de désorbitation de débris spatiaux utilisant la technologie EUSO associée à des lasers. Un financement important vient d'être obtenu au Japon, avec également la sélection d'une mission spatiale préparatoire qui utilisera nos unités de détection, et à laquelle les équipes françaises seront donc associées.

D'ores et déjà, un PDM prototype de K-EUSO a été fabriqué au sein de la collaboration, avec les unités de détection livrées par les équipes françaises (et assemblées par Matra Électronique). Il utilise le même ASIC que la version 2 du PDM (SPACIROC 3), mais légèrement plus compacte et plus intégrée au niveau des ECs. Par ailleurs, son électronique far end est identique à celle de la mission Mini-EUSO (cf. ci-dessus).

g) POEMMA

À plus long terme, et à plus grande envergure encore, la Collaboration JEM-EUSO s'est investie dans la conception et le développement d'une mission spatiale ambitieuse, permettant d'élargir ses objectifs scientifiques à la problématique des neutrinos de très haute énergie, qui est directement reliée à celle des UHECRs. En effet, au cours de leur propagation dans le milieu intergalactique, les UHECRs interagissent avec le fonds de photons (CMB et infrarouge) et produisent des particules secondaires, dont des neutrinos qui présentent l'avantage de se propager en ligne droite sur des distances cosmologiques. La détection de ces neutrinos, dits « cosmogéniques », est l'un des enjeux de l'astronomie multi-messagers. La technique utilisée par POEMMA est double : d'une part, la détection de « gerbes de neutrinos » montantes par la technique de fluorescence habituelle (cf. ci-dessus), et d'autre part la détection de la lumière Tcherenkov directe de ces mêmes gerbes. Ces « gerbes de neutrinos » consistent en réalité en des gerbes initiées par la décroissance dans l'atmosphère de leptons tau de très haute énergie créés par l'interaction d'un neutrino tau avec la croûte terrestre, après avoir traversé la Terre de manière rasante. Les caractéristiques et la probabilité de ce phénomène a fait l'objet de nombreuses études théoriques, qui permettent aujourd'hui de déterminer précisément la sensibilité d'un instrument spatial vis-à-vis d'un flux de neutrinos donné, qu'il soit de nature cosmogénique ou directement issu des sources astrophysiques des UHECRs. L'observation de ces gerbes de neutrinos à travers leur lumière de fluorescence se fait dans les mêmes conditions que celle des gerbes d'UHECRs. Le seuil en énergie résultant est toutefois trop haut pour la plupart des neutrinos attendus (dont l'énergie est inférieure à celle des UHECRs leur ayant donné naissance). Aussi est-il intéressant de pouvoir observer la lumière Tcherenkov produite directement le long de l'axe de la gerbe, avec une intensité très largement supérieure (en comparaison de la lumière de fluorescence, émise isotropiquement), et une échelle de temps plus courte. Un seuil en énergie beaucoup plus bas (jusqu'à 10^{17} eV, voire en deçà) peut ainsi être atteint, ce qui présente un intérêt majeur pour la détection des « flux garantis » de l'astronomie neutrinos, qui portent la signature directe de l'interaction des UHECRs avec les fonds photoniques, d'une manière qui dépend fortement de la composition de ces rayons cosmiques et permet donc de la contraindre. Mais ceci exige de pointer l'instrument vers l'horizon, pour observer les neutrinos rasants.

C'est ainsi qu'est né le concept hybride de la mission POEMMA : *Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics*. Son design allie la technique de fluorescence ordinaire d'EUSO à la technique Cherenkov pour l'observation dans l'axe des gerbes, en mode incliné vers l'horizon. La mission s'appuie également sur un couple de satellites volant en formation, ce qui permet d'éliminer le bruit de fond pour la détection des neutrinos (par redondance), et dans le même temps d'augmenter notablement la précision de la reconstruction du maximum de développement des gerbes pour les UHECRs, en mode fluorescence

La mission POEMMA est une mission de la classe *Probe missions* de la NASA. Elle a été proposée à la NASA en 2016 et a été l'une des 8 missions sur 27 sélectionnées et financées en tant que *Probe study* en mars 2017. Celle-ci a permis d'affiner le design et les simulations afin d'opérer les compromis optimaux pour la définition d'une mission au contour technologique et opérationnel entièrement validé par les ingénieurs de la NASA. Le rapport final avec les objectifs, le design complet et les objectifs de la mission a été remis à la NASA, qui l'étudie actuellement en vue d'une éventuelle inclusion dans son prochain *Decadal survey*.

h) EUSO-SPB2

Après la mission EUSO-SPB, et en vue de préparer les missions K-EUSO et POEMMA, la Collaboration JEM-EUSO a obtenu le financement d'une nouvelle mission ballon de longue durée par la NASA : EUSO-SPB2 (*super pressure balloon*). Cette mission est plus ambitieuse que la mission EUSO-SPB, en ceci qu'elle utilisera non plus 1, mais 3 PDM, et associera également, en plus de la détection des gerbes par fluorescence, le nouveau mode de détection visé par POEMMA pour les neutrinos de haute énergie, à savoir la détection directe de la lumière Tcherenkov (également accessible pour les gerbes de UHECRs). Toutefois, là où POEMMA pourra étudier les signaux Tcherenkov en coïncidence sur les deux

satellites, le détecteur Tcherenkov d'EUSO-SPB2 utilisera un système optique bifocal, dupliquant le signal sur la surface de détection.

Pour cette mission, les PDMs retenus sont les PDM de génération 3, identiques à celui développé pour le prototype de K-EUSO (cf. ci-dessus). Le vol d'EUSO-SPB2 se fera au départ de Wanaka (Nouvelle-Zélande), et devrait se poursuivre sur une durée d'environ 3 mois. Le dimensionnement de l'instrument est conçu de façon à garantir l'observation de plusieurs dizaines de gerbes de rayons cosmiques au-delà de 10^{18} eV. Il permettra également de valider le principe de la détection des gerbes de neutrinos par la lumière Tcherenkov directe, grâce à l'inclusion d'un autre type de détecteur (en plus des PDM mentionnés, mais sans contribution française) s'appuyant sur la technologie SiPM et une électronique plus rapide, et à son orientation vers l'horizon.

Nota Bene : l'inclinaison de l'instrument devrait permettre de détecter pour la première fois des gerbes de rayons cosmiques horizontales de haute altitude. Ces gerbes présentent un grand intérêt scientifique, car leur développement intervient entièrement dans un milieu de très faible densité. Or le développement des gerbes, et notamment leur contenu en particules, résulte d'une compétition entre la décroissance des particules secondaires générées, notamment les kaons et les pions, et la production de nouvelles générations de particules au sein de la gerbe, par interaction avec le milieu ambiant. Dans un milieu très peu dense, les interactions sont sévèrement réduites, et en particulier la part non électromagnétique de la gerbe s'en retrouve sensiblement amplifiée. La détection de ces gerbes et leur étude systématique, en fonction de l'énergie, offre ainsi des perspectives nouvelles pour contraindre les processus hadroniques à très haute énergie, au-delà du domaine couvert par le LHC.

Pour le vol d'EUSO-SPB2, l'électronique du PDM sera utilisée avec une unité de temps fondamentale plus courte (1 μ s au lieu de 2.5 μ s), permise par la conception de l'ASIC SPACIROC 3, afin d'optimiser le rapport signal/bruit et d'abaisser le seuil en énergie.

[NB : le lancement prévu au printemps 2022 pourrait se être repoussé à 2023 en raison du glissement général des calendriers résultant de la pandémie de COVID-19.]

6) Contributions françaises, réalisations et ressources impliquées

Comme indiqué plus haut, les contributions françaises à l'ensemble du programme EUSO sont essentielles, puisqu'elles concernent principalement les unités de détection et l'étalonnage de la surface focale. Les réalisations techniques principales sont les ASICs, les cartes PCB intégrées dans l'unité de détection et les unités de détection elles-mêmes, dont l'assemblage est sous-traité à l'entreprise Matra Électronique.

Pour mener à bien ces contributions, la collaboration française JEM-EUSO s'est appuyée sur les contributions de trois laboratoires de l'IN2P3 :

- APC (PI national, coordinateur européen, chef de projet, science case, responsabilité technique des *work packages*, design et production des unités de détection, photo-détection, calibration),
- le LAL (jusqu'en 2017 : design de l'ASIC et des cartes électroniques associées, design de l'unité de détection),
- OMEGA (électronique de front-end, design des ASICs et des cartes électroniques, production).

Les ressources humaines associées comprennent aujourd'hui : 5 physiciens de l'APC (2.3 FTE), 4 ingénieurs/techniciens à l'APC (0.9 FTE), et 3 ingénieurs à OMEGA (0.7 FTE ?)

NB : L'implication était plus importante au moment de la préparation de la mission CNES EUSO-Balloon, puis, dans une moindre mesure, de la mission EUSO-SPB, avec notamment 6 thèses soutenues à l'IN2P3, au LAL et à l'APC, et 2 supplémentaires à l'IRAP).

Sur le plan financier, les coûts hors personnels ont été couverts jusqu'à présent par le CNES (total de l'ordre de 500 000 €, plus le coût de la campagne de vol de la mission EUSO-Balloon proprement dite). Un engagement de l'IN2P3 est toutefois très fortement souhaité, avec un soutien financier minimal permettant d'assurer l'accompagnement organisationnel du projet et d'assurer le retour scientifique des différentes missions, via la participation aux meetings d'analyse et aux conférences internationales du domaine.

7) Calendrier

Pour rappel, la proposition initiale de création d'une contribution française à la mission spatiale JEM-EUSO a été examinée par le Conseil Scientifique de l'IN2P3 en juin 2009. Elle a été évaluée positivement et validée par l'IN2P3, avec un soutien financier de l'ordre de 20 k€ qui a été attribué pendant plusieurs années, puis s'est interrompu sans explication autre que le fait que le montant de la contribution financière de l'IN2P3 était trop faible (sic !) pour que JEM-EUSO soit considéré comme un programme prioritaire.

La mission JEM-EUSO initialement envisagée avait été présélectionnée par l'agence spatiale japonaise JAXA, et devait être déployée sur la plateforme d'expérience du module japonais de l'ISS (d'où la signification initiale de l'acronyme JEM : *Japanese Experiment Module*). À la suite du séisme et du tsunami de mars 2011 et de la catastrophe de Fukushima qui en est résultée, les priorités de financement ont été réévaluées, et la JAXA a abandonné son leadership sur la mission JEM-EUSO, réduisant sa participation aux seuls *work packages* instrumentaux (à l'exclusion de la responsabilité globale de la mission, et donc de son lancement). Cet événement a conduit à une réorganisation complète de la mission, et à la mise en place d'un programme de développement en plusieurs étapes, avec des financements locaux plus progressifs, en accompagnement des missions intermédiaires portées successivement par différentes agences spatiales.

Cette organisation s'est avérée très efficace et a permis à la collaboration JEM-EUSO de rester unie dans la poursuite de son objectif scientifique, et même d'accroître de nouvelles équipes, qui ont enrichi le projet. Le nom de la collaboration internationale a été conservé, mais l'acronyme JEM-EUSO doit à présent être compris comme signifiant *Joint Experiment Missions of the Extreme Universe Space Observatory*.

Le calendrier du programme a été donné plus haut. Nous rappelons simplement ici, de façon schématique, la succession des missions développées :

- 2013 : EUSO-TA version 1
- 2014 : EUSO-Balloon (mission CNES, responsabilité française)
- 2015 : EUSO-TA version 2
- 2016 : TUS (mission ROSCOSMOS)
- 2017 : EUSO-SPB (mission NASA)
- 2019 : K-EUSO prototype
- 2019 : MINI-EUSO (mission ASI et ROSCOSMOS)
- 2021 : EUSO-TA version 3
- 2022–2023 : EUSO-SPB2 (mission NASA)
- 2023–2024 : K-EUSO
- ~2030 : POEMMA

Un tableau résumant les caractéristiques de chaque mission, ses apports spécifiques et le retour scientifique attendu est proposé en annexe 1 ci-dessous.

NB : Dans la mesure où la collaboration JEM-EUSO regroupe l'ensemble des chercheurs impliqués dans le développement de la voie spatiale pour l'étude des UHECRs dans le monde, accordés sur un programme commun, il n'y a pas de « concurrence » internationale. En outre, les *work packages* français n'ont pas de concurrents connus au niveau mondial, même en dehors de la collaboration, compte tenu de l'expertise et de l'avance acquise à travers le développement des missions précédentes.

8) Retour scientifique et technique et valorisation technologique

Le retour scientifique des missions EUSO déjà effectuées est important, tant sur le plan scientifique que sur le plan technique. Le tableau de l'annexe 1 ci-dessous en donne les grandes lignes, et nous ne le détaillerons pas ici. Nous signalons simplement ici 30 articles de rang A publiés dans la période 2014–2019 (voir annexe 4), une dizaine en préparation, et de très nombreuses publications dans des proceedings à comité de lecture (notamment plus de vingt contributions de la collaboration JEM-EUSO à chaque conférence ICRC – *International Cosmic Ray Conference*). De nombreuses thèses ont été également soutenues dans les différents instituts des 16 pays participants, dont 8 en France.

Nous signalons également des retombées importantes de notre travail en photo-détection, avec notamment un partenariat avec l'entreprise japonaise Hamamatsu, qui fabrique les détecteurs MAPMTs des missions EUSO. Suite à l'étude fine de ces tubes photomultiplicateurs au laboratoire APC, nous avons pu mettre en évidence des phénomènes indésirables de comptage multiple sur certains pixels de bord, que nous avons pu caractériser avec suffisamment de précision intéresser l'entreprise Hamamatsu. C'est ainsi que nous avons pu nous rendre au Japon et présenter nos mesures aux ingénieurs de Hamamatsu, qui ont reconnu la valeur de cette caractérisation à haute précision (à laquelle ils ne peuvent accéder). Nos discussions ont permis d'identifier des pistes pour corriger les défauts présentés, et nous sommes à présent engagés dans un partenariat avec Hamamatsu, qui nous a prêté des prototypes d'un modèle corrigé, avec que nous puissions les tester. Les premiers résultats étant encourageants, l'entreprise va produire une seconde génération de prototypes corrigés, qu'elle nous fournira à nouveau pour caractérisation.

Ce travail privilégié au plus près de l'entreprise Hamamatsu est très intéressant sur le plan technologique, et nous place également dans une position privilégiée pour envisager de futures applications. C'est pourquoi nous avons souhaité tenter de le mettre à profit à travers un projet de R&T avec le CNES. Il s'avère que cette R&T vient d'être acceptée par le CNES (mars 2020). Son contour exact est en cours de finalisation.

Cette R&T CNES comporte également un volet important d'exploration des applications possibles dans d'autres domaines scientifiques de notre unité de détection, unique par ses caractéristiques :

- 2304 canaux
- ultra-sensible (comptage de photons uniques)
- UV et visible
- rapide (unité de temps de 1 μ s, avec résolution de comptage à 6 ns)
- ultra-compacte (55×55×60 mm, avec alimentation haute-tension, ASIC et cartes front-end incluses)
- basse consommation (350 mW)
- spatialisable
- reproductible et étalonnée

Ce travail de valorisation pourrait déboucher sur des synergies significatives (sciences de l'atmosphère, météores..., cf. paragraphe 4 ci-dessus) et des avancées importantes dans des domaines d'intérêt général.

En particulier, une possibilité de d'application à la problématique des débris spatiaux est apparue fin 2014, sitôt après la démonstration des capacités de principe de notre instrumentation, faite par le vol de la mission CNES EUSO-Ballon. La détection (par réflexion de la lumière solaire rasante ou d'une source

embarquée) des débris de taille intermédiaire (1 à 10 cm) par la caméra d'EUSO (depuis l'espace), et la reconstruction rapide de leur trajectoire, rend envisageable la focalisation d'un laser de faible énergie mais forte puissance pour provoquer l'ablation d'une partie de ces débris et les désorbiter. Les calculs montrent que la technique est en effet envisageable, et c'est pourquoi nous avons développé à ce sujet un partenariat avec Gérard Mourou, spécialiste des lasers et prix Nobel de Physique 2018, ainsi qu'avec nos partenaires d'EUSO au Japon. Nous avons d'ailleurs co-signé un article démontrant la faisabilité de principe en 2015 (avec Gérard Mourou, son équipe et ces collègues japonais). Le concept a également été présenté lors de conférences internationales, notamment les deux conférences organisées par le CNES (Christophe Bonnal) sur la problématique des débris spatiaux. Preuve de l'intérêt de cette perspective, un financement conséquent vient d'être obtenu par les collègues Japonais pour développer l'approche. Nous devrions pouvoir y assurer notre participation technique, qui représente une valorisation de la technologie EUSO.

9) Analyse "SWOT"

Strengths :

- position privilégiée des équipes françaises au sein de la collaboration JEM-EUSO (sur le plan à la fois scientifique, technique, stratégique et organisationnel)
- maîtrise technique d'un work package central (non remplaçable à court ou même moyen terme)
- programme cohérent et progressif, soutenu par un grand nombre d'agences et une collaboration internationale ayant fait preuve de son efficacité
- soutien du CNES
- crédibilité technique et institutionnelle, grâce au succès de 2 missions en ballon stratosphériques et une mission spatiale actuellement en opération dans l'ISS

Weaknesses :

- relative indifférence de la part de l'IN2P3 et méconnaissance partielle par l'IN2P3 de nos réalisations techniques et scientifiques (pourtant largement reconnues au niveau international, et ayant déjà conduit à 2 missions en ballon stratosphérique, du CNES et de la NASA, et 1 mission spatiale actuellement en opération dans l'ISS, et rayonnant au-delà de la communauté directement concernée)
- absence d'une véritable réflexion stratégique de l'IN2P3 sur le domaine des UHECRs, pourtant au cœur des astroparticules et de la stratégie multi-messagers

Opportunities :

- percée scientifique majeure en cas de détection des neutrinos cosmogéniques
- nombreuses synergies scientifiques avec d'autres domaines de la Physique
- valorisation technologique de l'unité de détection aux caractéristiques uniques
- consolidation d'un réel savoir-faire spatial au sein de l'IN2P3

Threats :

- manque d'intérêt de la part de l'IN2P3, voire pénalisation de l'investissement des chercheurs et ingénieurs sur un programme ayant pourtant fait les preuves de son dynamisme et de sa fécondité.

ANNEXE 1

Table résumant les étapes du programme EUSO et leurs principaux objectifs scientifiques et techniques :

Mission Name	Operation/Flight	Comments	Milestones	Results
EUSO-TA	since 2013	Ground-based	first trigger implementation, shower detection, meteors	Establishment of the sensitivity of JEM-EUSO prototypes to EAS detection of different energies as a function of energy. Observation of slow events such as meteors, lightning and stars. Detection of laser events up to 100 km distance.
EUSO-Balloon	2014 (CNES)	First in flight (1 night)	stand-alone operation of all subsystems (except internal trigger and power generation: use of batteries)	Raising of the TRL of the EUSO components. Measurement of UV emissivity, laser event detection/reconstruction. Experimental application of the methodology to determine the exposure.
TUS	2016–2017 (RosCosmos)	First in space, free-flyer, Fresnel mirror	Operation in space. Determination of the sensitivity to UHECR from space.	UHECR shower candidate. Lightning, meteors and slow events detection from space. Limits on strange quark matter. Detection of laser events, airplane lights. Definition of the methodology to assess the exposure determination from space.
EUSO-SPB	2017 (NASA)	12 nights (aborted due to a carrier failure: leaking balloon)	First in-flight operation with complete system (incl. trigger modes and solar panels: no battery)	System stability assessment. Emissivity measurement above ocean and clouds. Definition of the methodology to assess the exposure determination from space including the assessment of the role of clouds. Observation of clouds in UV. Determination of the energy threshold to EAS. Confirmation of the sensitivity extrapolation obtained with EUSO-TA. First extrapolation of JEM-EUSO sensitivity from space.
Mini-EUSO	2019 (ASI, RosCosmos)	Inside the ISS	Multi-mode trigger (incl. slow mode for meteors), long timescale monitoring of UV light, etc.	Expected results. Cross-check of TUS results with improved technology, higher duty cycle, and wider FoV. Confirmation of the UHECR candidates detected by TUS. Atmospheric science (meteors, lightning, airglow, bioluminescence emission). Proof of principle of the detection for remediation of space debris. Most stringent limit on nuclearites.
EUSO-SPB2	2022–2023 (NASA)	3 Telescopes, Direct Cherenkov signal (for neutrinos)	First UHECR showers between 10^{18} – 10^{19} eV, Assessment of neutrino sensitivity/exposure	Expected results. First observation of UHECRs from the edge of space using fluorescence technique. Proof of principle of the observation of Cherenkov light from CRs. Raising of TRL of Cherenkov detector. First use of a Schmidt camera for UHECR observation from space.
K-EUSO	2024 (Roscosmos)	UHECR detection from space onboard the ISS (Russian module)	UHECR observation with large statistics and full-sky coverage. First full-scale mission with nearly uniform exposure > ground-based instruments	Expected results. Determination of the UHECR flux at the highest energies. Study of the discrepancy of the UHECR spectrum between TA and Auger. Study of the UHECR anisotropy at large and middle scale. Evaluation of hinted TA hot spot. Limits on Lorentz invariance violation. Neutrino detection or best limits. Search for strange quark matter.
POEMMA	2030–(NASA)	2 satellites in formation, with stereo and view to the limb of the Earth. UHECR and neutrino detection	Multimessenger observation of the UHE sky: UHECR observation with largest statistics + unprecedented neutrino detection above 10^{17} eV	Expected results. Determination of the UHECR and neutrino fluxes at the highest energies. Study of the discrepancy of the UHECR spectrum between TA and Auger. Study of the UHECR exposure at large and middle scale. Evaluation of hinted TA hot spot. Study of the CR spectrum recovery. Study of Lorentz invariance. Neutrino detection. Search for strange quark matter.

ANNEXE 2

Figures illustratives des premières données reçues de MINI-EUSO



Fig. 1 : MINI-EUSO en position de « run », devant le hublot de quartz du module Zvezda de l'ISS.

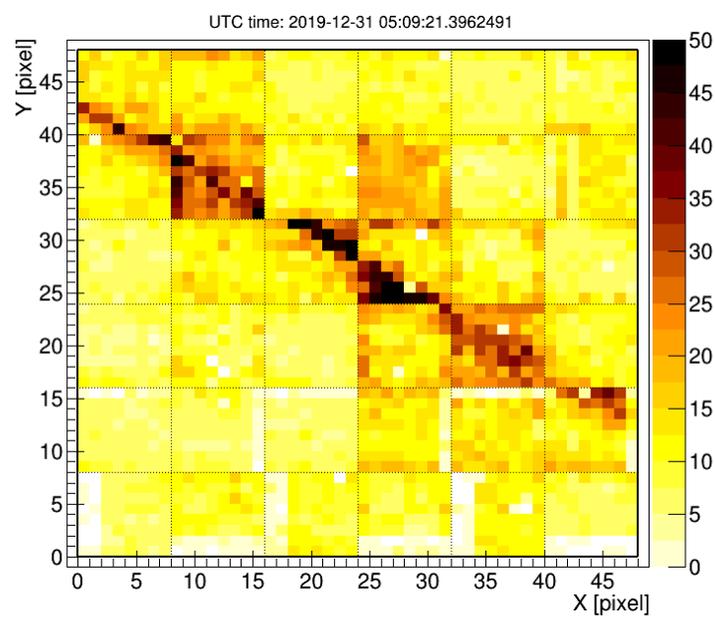


Fig. 2 : Trace d'un rayon cosmique interagissant directement dans la surface focale de MINI-EUSO.

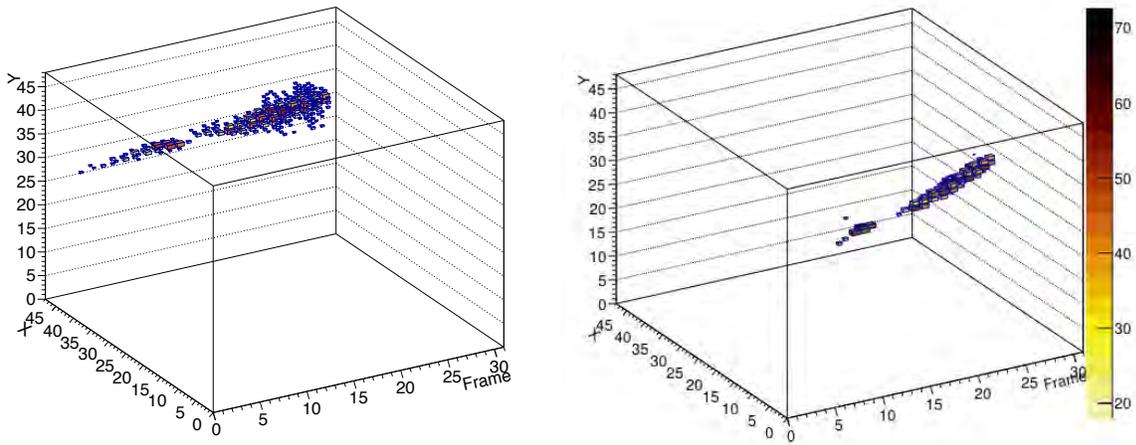


Fig. 3 : Développement de météores sur la surface focale, avec le temps comme troisième dimension.

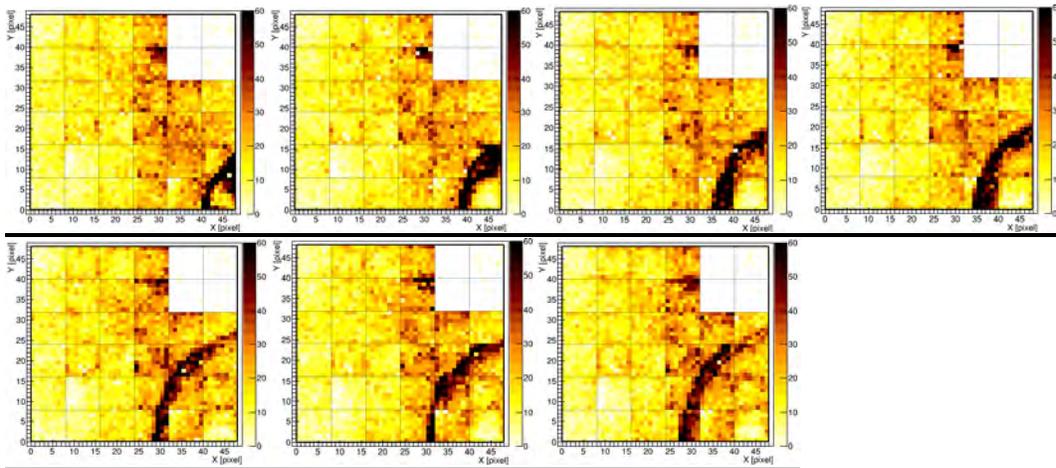


Fig. 4 : Images successives, sur la surface focale, d'un anneau lumineux généré dans la haute atmosphère et correspondant à un elfe, avec une vitesse de développement supraluminique. NB : l'unité de détection située en haut à droite se trouve temporairement en mode de protection automatique (sensibilité réduite d'un facteur 100 environ), en raison d'un flash de grande intensité (probablement dû à un éclair) ayant précédé l'apparition de l'elfe.

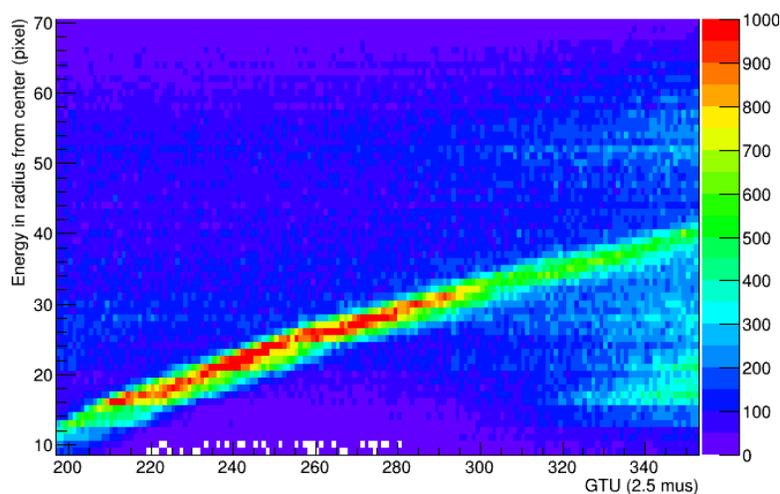


Fig. 5 : Évolution du rayon de l'elfe de la Fig. 4 sur la surface focale (en nombre de pixels) en fonction du temps.

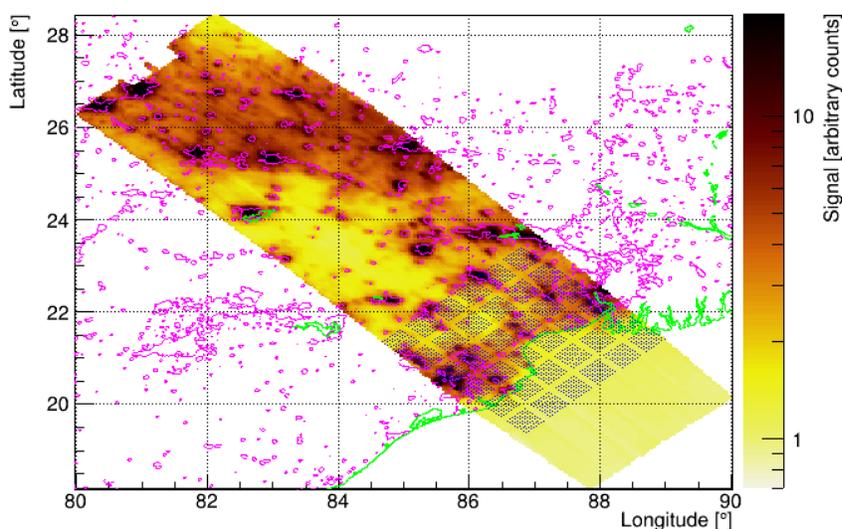


Fig. 6 : Carte d'émissivité reconstruite à partir des observations de MINI-EUSO le long de son orbite. Le réseau de points bleus en bas à droite représente schématiquement la position visée par le centre des $36 \times 64 = 2304$ pixels de la surface focale, pour une position instantanée. La région correspond à la côte Nord-Est de l'Inde : les contours verts et violets superposés marquent respectivement les côtes (y compris pour les lacs importants), et des niveaux de lumière visible associées à diverses agglomérations. Les contours coïncident largement avec l'émissivité UV mesurée pour la première fois par MINI-EUSO. À droite se trouve Calcutta. En haut à gauche Allahabad et un peu plus à droite Bénarès.

ANNEXE 3

Lettre de l'ESA à ROSCOSMOS au sujet de K-EUSO

ESA UNCLASSIFIED - For Official Use



estec

European Space Research
and Technology Centre
Keplerlaan 1
2201 AZ Noordwijk
The Netherlands
T +31 (0)71 565 6565
F +31 (0)71 565 6040
www.esa.int

Dr. Alexander Vitalievich Bloshenko
Head of Scientific & Technical
Advisory Council (STAC)
42, Schepkina Street
GSP-6, 107996 Moscow
RUSSIA

Noordwijk, 13/02/2020
Ref. ESA-HRE-RS-LE-0208

Subject: KLYPVE-EUSO

Dear Dr. Bloshenko,

I am writing this letter to you, as you are the head of Scientific & Technical Advisory Council (STAC) of ROSCOSMOS.

ESA has for many years supported European scientists to collaborate in the EUSO program, investigating UHECR (Ultra-High Energy Cosmic Rays) in space. Specific technologies have been developed to this purpose: i) ground-based telescope (EUSO-TA), ii) two balloon payloads (EUSO-Balloon and EUSO-SPB), iii) a detector active on board the International Space Station since 2019 (Mini-EUSO/UV atmosphere). The Mini-EUSO precursor mission is currently operated on board the International Space Station, addressing EUSO topics and validating the principle of the detector technology.

For the future, European scientists wants to participate in the KLYPVE-EUSO (K-EUSO) experiment, led by Russia, possibly through a Mission of Opportunity. For this end, they are performing crucial work both in the various mission leadership and in the development of novel technologies toward the future realization of its ultimate scientific goals.

ESA continues to promote the collaboration of the European Scientists with the K-EUSO programme, in particular through a dedicated Topical Team, noting the important scientific field and strong potential of the experiment.

Yours sincerely,

Thu Jennifer Ngo-Anh, MD, PhD
SciSpace Team Leader
Directorate of Human and Robotic Exploration Programme (HRE-RS)

Copy: Prof. Christer Fuglesang, coordinator of the Topical Team EUSO

Page 1/1

ANNEXE 4

30 Articles de rang A sur la période 2014–2019:

- The JEM-EUSO Mission: **15 articles** : Special Issue of Experimental Astronomy: vol. 40, Nov. 2015 (voir ici: <https://link.springer.com/journal/10686/40/1>)
- On-line and off-line data analysis for the EUSO-TA experiment: Piotrowski, L. W., et al., NIM A 773, 164 (2015)
- The EUSO-Balloon pathfinder: Adams, J. et al. (The JEM-EUSO Collaboration), Exp. Astron., DOI 10.1007/s10686-015-9467-9, (2015)
- Design and implementation of the Photo-Detector electronics for the EUSO-Balloon: Jung, A., Journal of Instrumentation, Volume 10, Issue 08, C08014 (2015).
- The readout electronic of EUSO-Balloon experiment: Ahmad, S.; Barrillon, P.; Blaksley, et al, Journal of Instrumentation, Volume 9, Issue 03, C03050 (2014).
- The data processor of the EUSO-Balloon experiment: Scotti, V.; Osteria, G., Journal of Instrumentation, Volume 9, Issue 03, C03034 (2014).
- A balloon-borne prototype for demonstrating the concept of JEM-EUSO: von Ballmoos, Peter, Adv. Space Res., Volume 53, Issue 10, Pages 1544–1550 (2014)
- A setup for the precision measurement of multianode photomultiplier efficiency: Blaksley, C., Gorodetzky, P., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 764, 198-205. (2014)
- Meteor studies in the framework of the JEM-EUSO program: G. Abdellaoui et al. (JEM-EUSO Collaboration), Planetary and Space Science 143 (2017) 245–255
- Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger : G. Abdellaoui et al. (JEM-EUSO Collaboration), NIM A 866 (2017) 150–163
- The EUSO program: Imaging of ultra-high energy cosmic rays by high-speed UV-video from space: C. Fuglesang for the JEM-EUSO Collaboration, NIM A, (2017) 873, 1
- First observations of speed of light tracks by a fluorescence detector looking down on the atmosphere: G. Abdellaoui et al. (JEM-EUSO Collaboration), JINST 13 (2018) P05023
- EUSO-TA: First results from a ground-based EUSO telescope: The JEM-EUSO Collaboration, Astropart. Phys. (2018) 102, 98
- Mini-EUSO: A high resolution detector for the study of terrestrial and cosmic UV emission from the International Space Station: The JEM-EUSO Collaboration, Advances in Space Research (2018) 62, 2954
- The integration and testing of the Mini-EUSO multi-level trigger system: The JEM-EUSO Collaboration, Advances in Space Research (2018) 62, 2966
- Ultra-violet imaging of the night-time earth by EUSO-Balloon towards space-based ultra-high energy cosmic ray observations: The JEM-EUSO Collaboration, Astropart. Phys. (2019) 111, 54