

AVEC NOS ÉLÈVES

e-PÉRON : un laboratoire virtuel pour (re)découvrir la nature du rayonnement cosmique depuis les classes

Cyrille Baudouin, ex-coordonateur d'e-PÉRON pour l'Institut de physique de l'Univers d'Aix-Marseille Université

Damien Dornic, responsable scientifique d'e-PÉRON, chargé de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille, dornic@cppm.in2p3.fr

Olivier Espagnet, coordination d'e-PÉRON au Pic du Midi, Service éducatif de l'Observatoire Midi-Pyrénées, olivier.espagnet@obs-mip.fr

Les auteurs proposent d'utiliser un laboratoire virtuel permettant de faire l'étude des rayons cosmique au sein des établissements scolaires en utilisant des valeurs scientifiques réelles enregistrées à l'Observatoire du Pic du Midi.

Comment sait-on que le rayonnement cosmique est constitué principalement de particules chargées ? Comment identifier l'existence de gerbes de particules ? Quelle est la nature des particules du rayonnement cosmique qui parviennent jusqu'au sol ? Se poser ces questions, c'est suivre le cheminement des physiciens du 20^e siècle qui se sont interrogés sur la nature du rayonnement cosmique. L'ambition de la Plateforme Éducative sur les Rayons cosmiques et les muONS est de fournir aux élèves de l'enseignement secondaire et de l'enseignement supérieur les outils pour répondre à ces questions. Grâce à une palette d'expériences installées à l'Observatoire du Pic du Midi et accessibles en ligne, il est possible de « re »découvrir la nature du rayonnement cosmique depuis les classes, en menant sa propre enquête grâce à des données scientifiques réelles !

De l'hypéron à e-PÉRON

Installée au Pic du Midi, la plateforme expérimentale e-PÉRON s'inscrit dans une histoire déjà riche. Dans les années 1930-1950, les physiciens cherchaient à caractériser la nature du rayonnement cosmique en installant des expériences en altitude, là où le flux de rayonnement cosmique est plus important. Leurs expériences utilisaient notamment les énergies produites par le rayonnement cosmique pour sonder les tréfonds de la matière et de nombreuses particules furent découvertes de cette manière : positron, muon, kaon. À 2 877 m d'altitude, avec 4 fois plus de flux de rayonnement cosmique qu'au niveau de la mer, le Pic du Midi devint ainsi un lieu d'étude privilégié par les cosmiciciens. Des physiciens prestigieux s'y

succédèrent, comme Patrick Blackett, Cecil Powell, Pierre Auger ou Giuseppe Occhialini. Une nouvelle particule composite y fut découverte en 1949 : l'hypéron... comme e-PÉRON !

Bien qu'entièrement dédié à des objectifs pédagogiques, e-PÉRON constitue un trait d'union entre l'aventure de ces cosmiciciens et les recherches actuelles. Initié dans le cadre du Labex OCEVU, e-PÉRON est en effet porté par des laboratoires de recherche travaillant sur la problématique toujours très actuelle de la recherche des sources du rayonnement cosmique (Centre de physique des particules de Marseille / CPPM, Institut de recherche en astrophysique et planétologie / IRAP, Observatoire Midi-Pyrénées / OMP) en partenariat avec le Syndicat mixte pour la valorisation du Pic du Midi et le dispositif ministériel Sciences à l'école. L'objectif initial du projet était de fournir des données de qualité « recherche » pour former les étudiants en licence et de master au traitement et à l'analyse de données réelles sur cette thématique. Mais l'idée de rendre accessible ces données à des publics de lycées sous une forme adaptée a rapidement émergé.

Laboratoire virtuel

La plateforme expérimentale d'e-PÉRON consiste en un réseau de détecteurs de rayons cosmiques installés à l'Observatoire du Pic du Midi. La disposition et la forme de ces détecteurs sont adaptées à chacune des expériences, mais ils sont tous conçus selon le même principe : un scintillateur (plastique ou liquide) est couplé à un photomultiplicateur pour détecter le passage de particules chargées (muons,

électrons) issues des gerbes de particules atmosphériques provoquées elles-mêmes par la collision des rayons cosmiques avec les noyaux atomiques des constituants atmosphériques (azote et oxygène) figure 1.

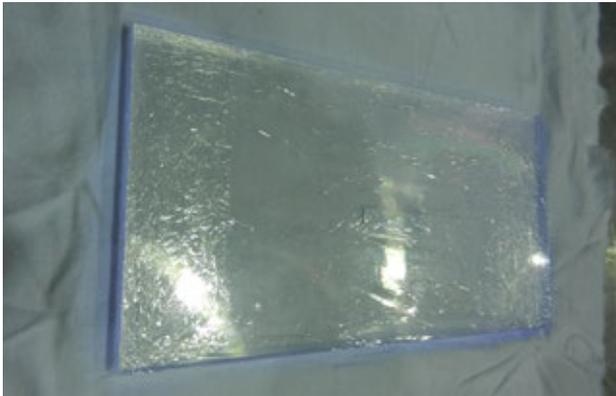


Fig.1. Scintillateur plastique utilisé sur les expériences d'e-PERON pour détecter le passage de particules chargées. Selon les expériences, il peut être rectangulaire ou cylindrique.

Le principe de détection est basé sur le fait que lorsqu'une particule chargée dépose une partie de son énergie dans le scintillateur, celui-ci la restitue par scintillation sous forme de photons. Ces derniers sont détectés par un photomultiplicateur qui les convertit en électron et donc en courant électrique. Le comptage des signaux de chaque détecteur se fait alors par une carte d'acquisition QuarkNet pilotée par un Raspberry Pi (figures 2 et 3).



Fig.2. Détecteurs en cours de montage : ici on voit les photomultiplicateurs disposés sur les scintillateurs.

L'intégralité des données recueillies par les expériences sont stockées dans une base de données. Par l'intermédiaire du site internet, les utilisateurs ont ainsi accès à l'expérience de leur choix, et peuvent sélectionner l'intervalle de temps qui les intéresse. De plus, un accès par niveau d'utilisateur est proposé : un niveau de traitement avancé et une visualisation des données (enseignement secondaire),

l'accès aux données brutes non traitées (enseignement universitaire).

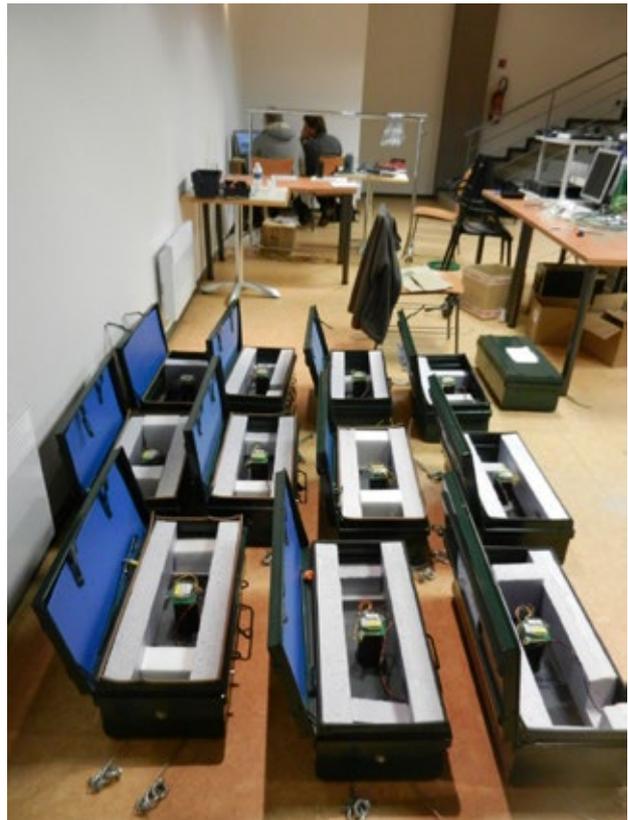


Fig.3. Fin du montage : les scintillateurs sont disposés dans des caisses. Ici, il s'agit des détecteurs utilisés dans l'expérience à la Auger comptant un réseau de 12 détecteurs.

Les expériences

Depuis 2015, les expériences d'e-PÉRON collectent des données en continu. Il y a d'une part les reproductions d'expériences historiques qui ont permis de caractériser la nature du rayonnement cosmique :

- « effet est / ouest » : influence du champ géomagnétique et mesure de la charge des rayons cosmiques ;
 - « expérience à la Auger » : distribution latérale des gerbes et estimation de leur énergie ;
 - « expérience à la Rossi » : mise en évidence des gerbes de particules ;
 - « télescope à muons » : mesure de la distribution angulaire du rayonnement cosmique, tomographie muonique ;
 - « expérience vie moyenne du muon » : mesure de la durée de vie moyenne du muon, effets relativistes.
- D'autre part, une expérience de physique des particules (bien connue des enseignants du secondaire) permet d'étudier les muons et d'aborder les notions de relativité restreinte.

Enfin, les utilisateurs ont également accès à un ensemble de données pouvant affecter les mesures du rayonnement cosmique en lien étroit avec l'environnement du Pic du Midi et les activités de recherches qui y sont menées : l'activité solaire (en lien avec le coronographe CLIMSO), les données atmosphériques du laboratoire d'aérodologie, les effets du radon.

Intéressons-nous ici plus particulièrement à deux expériences historiques exploitables dans l'enseignement secondaire (« effet est/ouest » et « expérience à la Rossi »), ainsi qu'à un dispositif expérimental original (« télescope à muons »).

« Effet est/ouest »

L'objectif de cette expérience est de tester l'existence d'une asymétrie entre les flux de rayons cosmiques provenant de l'est et ceux provenant de l'ouest. Une telle asymétrie doit révéler deux aspects de la nature du rayonnement cosmique :

- le fait que le rayonnement cosmique est influencé par le champ magnétique terrestre et donc qu'il est constitué majoritairement de particules chargées ;
- le sens de l'asymétrie indique le signe de la charge des rayons cosmiques (un taux plus élevé venant de l'ouest est compatible avec des particules majoritairement de charges positives).

Historiquement, en 1932-1933, plusieurs expériences sont parvenues à mettre en évidence l'effet est/ouest à des latitudes censées permettre de le mesurer sans ambiguïté : Thomas Johnson et Jabez Street (à Washington puis à Mexico) ; Arthur Compton et Luis Alvarez (à Mexico) ; Bruno Rossi (en Érythrée). Leurs résultats montraient un excès de rayonnement venant de l'ouest et étaient donc compatibles avec un rayonnement cosmique composé majoritairement de particules chargées positivement.

Ici au Pic du Midi, l'objectif est de mesurer directement le flux de muons cosmiques (ceux produits dans les gerbes atmosphériques) provenant respectivement de l'est et ceux provenant de l'ouest avec deux paires de détecteurs en coïncidence. Les 4 détecteurs cylindriques (scintillateurs) sont disposés par couple de 2 tubes : tube 1 / tube 2 et tube 3 / tube 4. L'objectif est de détecter les coïncidences au sein de chaque couple dans une direction fixe donnée (azimut + inclinaison) : le couple T1/T2 regarde vers l'est avec une inclinaison d'environ 53° par rapport au plan horizontal, le couple T3/T4 regarde vers l'ouest avec une inclinaison d'environ 53° par rapport au plan horizontal. Les directions des détecteurs sont fixes, à la fois en azimut, et en inclinaison (figure 4).

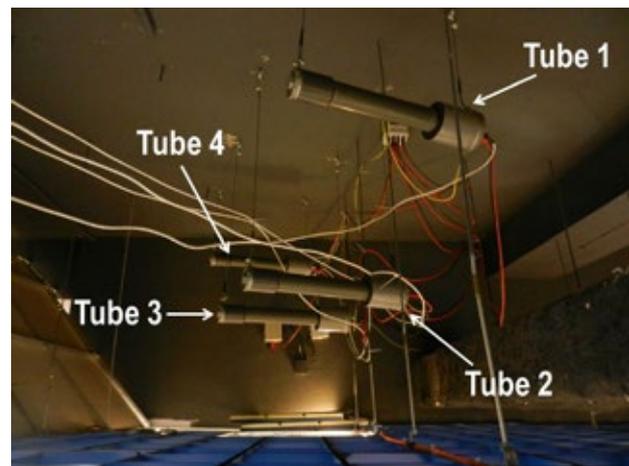


Fig.4. Disposition des détecteurs dans l'expérience « Effet est/ouest ».

Une coïncidence détectée entre les tubes 3 et 4 signifie que le muon détecté provient de l'ouest et que la gerbe qui l'a généré (et donc le rayon cosmique) vient globalement de l'ouest. Pour une coïncidence entre les tubes 1 et 2, le rayon cosmique provient globalement de l'est. On considère qu'il y a une coïncidence entre 2 tubes lorsque les signaux sont quasiment simultanés (durée < 100 ns), ce qui signifie alors que chaque détection est due à la même particule.

Ces coïncidences sont à analyser a posteriori car tous les signaux des détecteurs individuels, qu'il y ait coïncidence ou non, sont stockés dans une base de données. Les utilisateurs de l'enseignement secondaire ont accès à des données déjà traitées. Pour la période sélectionnée, ils peuvent ainsi visualiser directement les taux de coïncidence (ou les nombres d'événements) pour chacun des 4 couples de détecteurs et ainsi observer une différence notable entre le flux provenant de l'ouest et celui provenant de l'est (cf courbe figure 5).

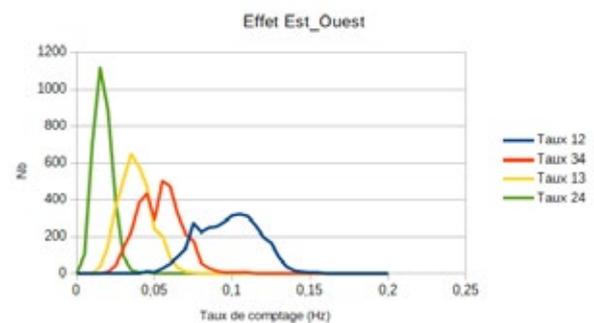


Fig.5. Taux de coïncidences entre les différents couples de tubes dans l'expérience « Effet est/ouest ». On voit que le flux provenant de l'ouest (taux 12) est plus important que le flux provenant de l'est (taux 34).

« Expérience à la Rossi »

L'objectif de cette expérience est de caractériser la nature du rayonnement cosmique en étudiant son interaction avec la matière. Plus précisément, il s'agit d'identifier l'existence de cascade de particules produites lors de cette interaction.

Lorsqu'une particule chargée possède suffisamment d'énergie, son interaction avec la matière va produire la création de nouvelles particules dans lesquelles l'énergie initiale est transférée. Si elles ont suffisamment d'énergie, ces particules secondaires vont à leur tour produire de nouvelles particules en interagissant elles aussi avec la matière selon le même processus. Une cascade de particules se développe donc jusqu'à ce que l'énergie de chaque particule ne soit plus suffisante pour engendrer de nouvelles particules. Ce phénomène de gerbes de particules est observable par exemple sur la photo ci-dessous (figure 6) lors de l'interaction d'un rayon cosmique secondaire avec une superposition de plaques de plomb.

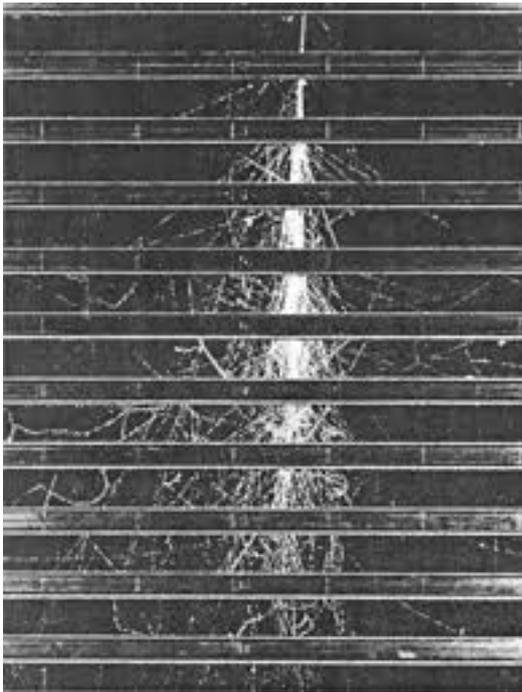


Fig.6. Chambre à brouillard vue par la tranche : on y distingue le développement d'une gerbe de particules initiée par le rayonnement cosmique, et se développant au cours de la traversée successive de plaques de plomb.

Pour identifier l'existence d'une gerbe de particules, on peut donc imaginer « sonder » le flux de particules produites à chaque étage dans une section donnée, par exemple dans l'axe de propagation de la cascade. Un tel sondage verrait d'abord une augmentation du flux de particules, puis une lente diminution.

Le dispositif choisi est une reproduction de l'expérience historique réalisée par Bruno Rossi dans les années 1930. Il s'agit d'une véritable expérience de physique des particules : on observe le produit du bombardement d'une cible par une source inconnue dont on cherche à déterminer la nature.

La source est « naturelle » puisqu'il s'agit d'une particule du rayonnement cosmique secondaire (produit de l'interaction du rayonnement cosmique primaire avec l'atmosphère).

La cible est constituée de couches de plomb dont l'épaisseur varie au cours du temps.

La détection des gerbes de particules est faite avec 3 détecteurs individuels disposés en « pyramide » (figure 7).

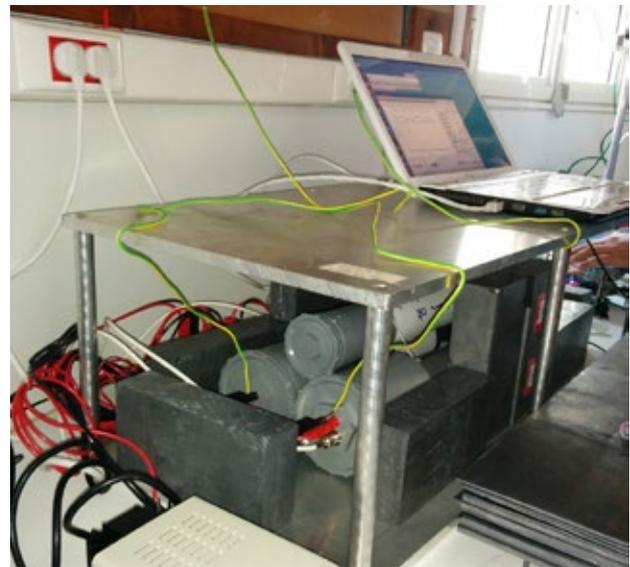


Fig.7. Disposition des détecteurs dans l'expérience à la Rossi pour mesurer les triples coïncidences.

Avec une telle configuration, une triple coïncidence ne peut pas être provoquée par une particule unique, mais bien par le passage simultané de 2 particules. Cette simultanéité ne peut être provoquée que par un seul événement à l'origine des 2 particules, soit un « échantillon » de la cascade de particules. Le fait de faire varier la quantité de plomb, revient à aller sonder la cascade de particules évoquées plus haut à différentes hauteurs.

Là aussi, les coïncidences sont analysées a posteriori. Les utilisateurs de l'enseignement secondaire accèdent à un jeu de données déjà traitées et ils peuvent directement visualiser l'évolution du taux de triple coïncidence en fonction du temps ou en fonction de l'épaisseur de plomb (figure 8).

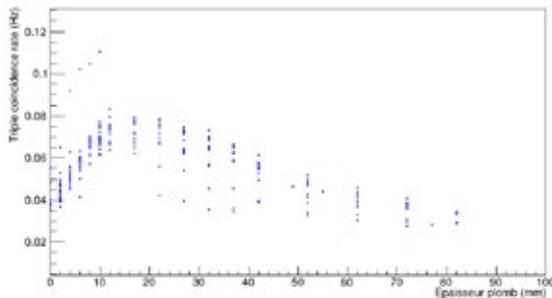


Fig.8. Courbe dite de « transition de Rossi ». On voit le flux augmenter rapidement avant de s'atténuer progressivement. Chaque courbe correspond à un cycle d'ajout et de retrait des plaques de plomb, ici sur une période de 2015 à 2020.

« Télescope à muons »

Comme son nom l'indique, ce dispositif a l'apparence d'un télescope optique mais au lieu de collecter des photons, il détecte des muons. Disposé sur une monture de télescope classique (de type C14), il est constitué de deux disques scintillateurs de 30 cm et espacés de 65 cm, tous deux équipés d'un photomultiplicateur. Lorsqu'une particule chargée (muon) passe à travers le scintillateur, un photon est émis, collecté puis amplifié par un photomultiplicateur, et le signal est transmis à la carte d'acquisition qui effectue ainsi le comptage des muons. Lorsqu'un signal est détecté quasi simultanément ($\Delta t \leq 100$ ns) dans les deux scintillateurs, alors on considère qu'il s'agit d'un seul muon et il est comptabilisé. Une interface informatique permet de visualiser les mesures effectuées dans la direction choisie et dans l'intervalle de temps sélectionné (figure 9).



Fig.9. Le télescope à muons est constitué de 2 scintillateurs circulaires chacun équipés d'un photomultiplicateur (embouts ronds visibles sur la photo). Cet instrument est relié à un PC et détecte le passage de particules chargées (muons, électrons, particules alpha).

Ce télescope à muons est transportable. Pour l'instant, il est alternativement installé au CPPM ou au Pic du Midi. Il a été conçu pour réaliser des activités pratiques dans le cadre des licences ou masters des universités de Toulouse ou d'Aix-Marseille, mais il peut être également utilisé lors de visites de publics scolaires au Pic du Midi pour visualiser ce qu'est le rayonnement cosmique.

Plusieurs types de mesures peuvent être réalisées avec le télescope à muons :

- un scan de la voûte céleste afin d'observer d'éventuelles différences de flux de rayonnement cosmique en fonction de l'azimut et de la hauteur dans le ciel ;
- la tomographie d'une montagne ou d'une construction humaine.

Exploitation pédagogique

Des données, rien que des données

L'étude du rayonnement cosmique implique de nombreuses problématiques et thématiques scientifiques : le milieu interstellaire, les objets astrophysiques, les constituants de la matière, le champ magnétique terrestre, l'atmosphère, la démarche scientifique, l'instrumentation, l'étude statistique de données. De plus, le rayonnement cosmique possède la particularité d'être disponible partout (ou presque) à la surface de la Terre puisqu'il nous bombarde en permanence et son origine constitue toujours une problématique scientifique d'actualité. Pour toutes ces raisons (et bien d'autres), son étude dans un contexte pédagogique suscite un vif intérêt de la part de nombreux enseignants du secondaire depuis quelques années.

Cependant, la conception et la conduite d'expériences sur le rayonnement cosmique directement en classe peut faire face à de nombreux obstacles : l'achat et l'installation du matériel nécessaire à l'expérimentation, la compétence nécessaire à l'analyse des données, les longues périodes d'acquisition nécessaires à l'obtention de résultats significatifs.

Or l'investissement (en temps, en compétences, financier) nécessaire à la bonne conduite du projet en regard du temps à y consacrer réellement en classe, n'est pas nécessairement considéré comme rentable par un grand nombre d'enseignants. L'objectif de la plateforme expérimentale d'e-PÉRON est de lever une partie de ces obstacles en permettant au plus grand nombre d'accéder à des données réelles sans instrumentation spécifique (autre que des ordinateurs

et une connexion internet) et/ou de venir en complément d'instruments déjà existants (comme le cosmo-détecteur du programme *Cosmos à l'École*) pour les utilisateurs les plus expérimentés.

Ainsi, depuis le site web d'e-PÉRON, les utilisateurs accèdent à l'ensemble des ressources leur permettant d'exploiter les expériences : description du protocole expérimental, remise en contexte historique de l'expérience, visualisation des données sous forme de courbes directement exploitables (figure 10).

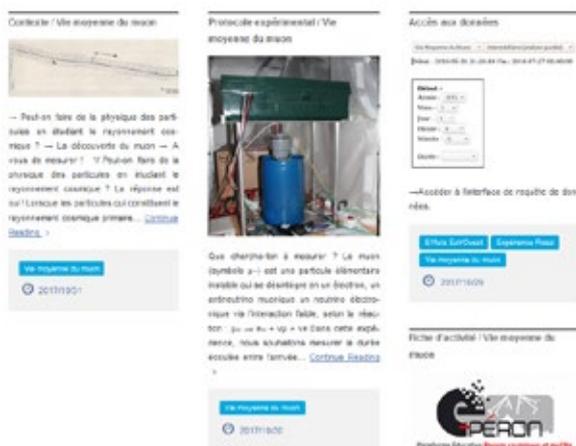


Fig.10. Sur le site web d'e-PÉRON, l'utilisateur a l'accès à des ressources pédagogiques pour l'aider à exploiter les expériences. Pour chaque expérience, un filtre permet d'accéder facilement aux ressources d'une même expérience (ici pour « la vie moyenne du muon »).

Pistes d'exploitation

Plusieurs modalités d'exploitation pédagogique peuvent être envisagées selon le temps que l'enseignant souhaite consacrer à cette activité. Le fait de s'affranchir des contraintes techniques liées au matériel expérimental offre ainsi un large éventail de possibilités depuis un temps court (2 h) jusqu'à des durées plus longues sur des projets exploratoires, sous forme d'activités dirigées ou plus libres.

Citons par exemple :

- la réalisation d'une activité « clé en main » en 2 h disponible grâce à une fiche de TP (expérience « vie moyenne du muon ») ;
- la réalisation d'activités complémentaires d'une « manip » réalisée en classe (cosmo-détecteur, chambre à brouillard, ballon sonde...) ; les données e-PÉRON permettent alors d'avoir des données stables sur des longues périodes de temps et de se concentrer sur l'analyse des données ;
- la réalisation d'activités complémentaires d'une visite (musée, Pic du Midi...) ou d'une intervention

d'un chercheur sur la thématique du rayonnement cosmique ou d'un sujet connexe (radioactivité par exemple) ;

- des projets de groupe plus exploratoires...

En guise de conclusion mais également d'ouverture, rappelons que l'exploitation pédagogique d'e-PÉRON dans l'enseignement secondaire reste largement à construire et à inventer. Car même si nous bénéficions de l'expérience acquise par le dispositif « Cosmos à l'école », e-PÉRON a la particularité de mettre à disposition des quantités de données sans les contraintes techniques et instrumentales.

Cela offre bien sûr la possibilité d'étudier le rayonnement cosmique pour lui-même en tant que phénomène physique présent dans notre environnement, mais cela offre aussi la possibilité de construire des projets plus interdisciplinaires dans lesquels le rayonnement cosmique n'est qu'un élément. En effet, le rayonnement cosmique a la particularité de « traverser » de nombreuses thématiques scientifiques et d'être aujourd'hui à la source de plusieurs applications ou enjeux de société.

En voici quelques exemples :

- en astrophysique, la problématique actuelle de recherche des sources du rayonnement cosmique de très haute énergie ;
- en sciences de la planète, la datation des roches en géomorphologie grâce aux cosmo-nucléides, l'étude de l'influence du rayonnement cosmique sur la formation des nuages et le changement climatique, la formation des éclairs lors des phénomènes orageux...
- le rayonnement cosmique utilisé comme sonde : production d'images des chambres magmatiques de volcans ou de l'intérieur d'un cœur de centrale nucléaire, ou encore en nivologie (mesure de la quantité de neige dans des régions de montagne) ;
- l'impact du rayonnement cosmique sur les activités humaines : santé pour les personnels navigants, effets sur les composants électroniques, impact sur les vols spatiaux habités...

