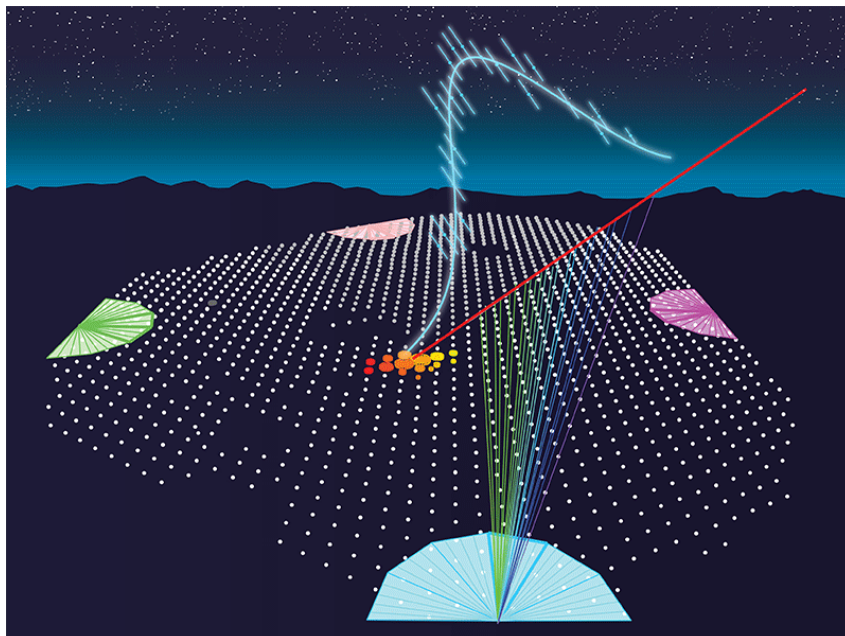




Conseil Scientifique de l'IN2P3

PARTICIPATION À L'EXPÉRIENCE PIERRE AUGER PROJET AUGERPRIME

Document rédigé par les équipes IN2P3 de la collaboration Pierre Auger



(credit : APS/Carin Cain)

4 Janvier 2017

Table des matières

1	L’Observatoire Pierre Auger : statut et principaux résultats	1
1.1	Le plus grand observatoire au monde pour la détection des rayons cosmiques ultra-énergétiques	2
1.2	Les principaux/derniers résultats	3
1.2.1	L’intensité des rayons cosmiques de haute énergie	3
1.2.2	Un alourdissement des rayons cosmiques aux plus hautes énergies ?	4
1.2.3	Déficit de muons dans les modèles d’interactions hadroniques	5
1.2.4	Auger à l’ère du multi-messenger	6
1.2.5	Les anisotropies des rayons cosmiques d’ultra-haute énergie	7
1.3	Auger France dans la collaboration Pierre Auger	9
2	Le Projet AugerPrime	10
2.1	« AugerPrime », enjeux scientifiques	10
2.2	La méthode	12
2.3	Description des nouveaux détecteurs de surface	13
2.3.1	Les détecteurs à scintillation	14
2.3.2	La nouvelle électronique embarquée	14
2.4	Coûts et planning	15
3	L’engagement de la France dans AugerPrime	16
3.1	Participation à la mise en oeuvre d’AugerPrime	16
3.1.1	Détecteurs de particules	16
3.1.2	Implication dans le renouvellement de l’électronique	16
3.1.3	Tests sur site des prototypes	17
3.1.4	Implication des IT des laboratoires IN2P3	18
3.1.5	Responsabilités dans le projet	19
3.2	Programme des activités de recherche des équipes IN2P3	19
3.2.1	Construction d’AugerPrime	19
3.2.2	Opération	19
3.2.3	Sélection des événements et reconstruction	20
3.2.4	Analyses de physique	21
3.3	Demande de soutien	22
4	Annexes	24
4.1	Equipes IN2P3 engagées dans le projet AugerPrime	24
4.2	Coûts et planning de construction d’AugerPrime	25
4.3	Performances de l’Observatoire Pierre Auger	26
4.4	Liste des publications produites avec une forte participation des chercheurs IN2P3	27

Ce document a pour objectif de convaincre le Conseil Scientifique de l'IN2P3 du bien fondé de la demande des collaborateurs français participant à l'expérience Pierre Auger de poursuivre leurs recherches sur les rayons cosmiques d'ultra haute énergie à l'Observatoire Auger en s'impliquant en particulier dans le projet AugerPrime.

Les rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE) constituent un moyen unique pour étudier la physique et l'astrophysique fondamentale à des énergies extrêmes, très largement supérieures à celles disponibles auprès des accélérateurs terrestres. Cependant, ces études sont rendues difficiles d'une part parce que l'intensité des RCUHE est très faible, et d'autre part parce qu'on ne peut observer directement les rayons cosmiques primaires mais seulement la cascade de particules secondaires qu'ils produisent dans l'atmosphère.

Lors de la conception de l'Observatoire Pierre Auger il y a près d'un quart de siècle, les connaissances sur les RCUHE étaient très limitées. Leur intensité au-dessus de 10 EeV était indéterminée, suscitant nombre de modèles exotiques sur leur origine et leur propagation ; leur nature était complètement inexplorée ; à cause de leur trop faible nombre, l'observation de leur directions d'arrivée était à la source d'interprétations contradictoires sur des possibles anisotropies. De plus, deux expériences sous-dimensionnées pour explorer cette gamme d'énergie, AGASA et HiRes, rendaient publiques leurs observations contradictoires sur l'intensité des RCUHE il y a une quinzaine d'années : continuité ou suppression de l'intensité au-delà de 100 EeV. La suppression observée par HiRes s'accordait bien avec la rupture d'intensité prédite par Greisen, Zatsepin et Kuz'min en 1966 : faisant suite à la découverte du fond diffus cosmologique (CMB), ils établirent immédiatement qu'une telle rupture était attendue aux environs de 60 EeV en raison de l'interaction entre les RCUHE et le CMB (coupure GZK) [1]. En revanche, la continuité du spectre au-delà de 100 EeV observée par AGASA ouvrait nombre de spéculations sur la possibilité de sonder l'Univers primordial par le biais de ces particules. Un des objectifs de l'Observatoire Pierre Auger était ainsi, *a posteriori*, de départager les résultats contradictoires de ces deux expériences.

La collaboration internationale Pierre Auger a conçu, construit et exploité l'Observatoire éponyme, ensemble instrumental performant situé dans la pampa Argentine, qui détecte les rayons cosmiques sur plus de trois décades en énergie. Les premières données ont été enregistrés en 2004, et le réseau de détecteurs a été déployé jusqu'en 2008. La première partie de ce document est consacrée à cet Observatoire, et présente les résultats les plus importants parmi ceux qui ont permis d'améliorer les connaissances sur les RCUHE en soulignant le rôle joué par les collaborateurs français, dès la conception de l'Observatoire, de la construction jusqu'à l'interprétation des résultats.

La vaste surface de collection et la stratégie de détection hybride de l'Observatoire ont permis des avancées considérables de nos connaissances des RCUHE, à la hauteur des attentes initiales. Ces progrès ont à leur tour bouleversé notre perception conventionnelle de la nature et de l'origine des RCUHE. Pour aboutir à une description cohérente de l'ensemble des observations, il reste des aspects à éclaircir sur l'origine de ces RCUHE, leurs mécanismes d'accélération et leur propagation dans l'espace extragalactique. Ces questions sont abordées dans la deuxième partie. Dans cette même partie est décrite le projet d'amélioration de l'Observatoire, AugerPrime, destiné à mieux caractériser les grandes gerbes atmosphériques.

La troisième partie présente la façon dont AugerFrance compte s'engager dans AugerPrime, en exploitant au mieux les compétences acquises dans les groupes français au cours des années passées à travailler au sein de la collaboration Auger, que ce soit dans la conception d'une nouvelle électronique, dans l'étalonnage des détecteurs du réseau de surface, dans la reconstruction des données, leur analyse et leur interprétation.

1 L'Observatoire Pierre Auger : statut et principaux résultats

Au delà de quelques dizaines de TeV, l'intensité (flux par stéradian) des rayons cosmiques est trop faible pour permettre des études par détection directe au-delà de l'atmosphère. Les particules cosmiques de haute énergie sont donc observées au travers des cascades de particules secondaires qu'elles génèrent dans l'atmosphère. En particulier, l'intensité ne dépassant pas $\simeq 1 \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ au-delà de 10 EeV, il est nécessaire de couvrir des surfaces de détection gigantesques pour collecter un grand nombre d'événements.

1.1 Le plus grand observatoire au monde pour la détection des rayons cosmiques ultra-énergétiques

L'Observatoire Pierre Auger est un ensemble de détecteurs répartis sur une surface de 3000 km² sur la plaine des hauts plateaux de la Pampa Amarilla, en Argentine [2]. Cet observatoire illustré Fig. 1 allie deux techniques complémentaires de détection des grandes gerbes atmosphériques : un réseau de détecteurs de particules au niveau du sol afin d'échantillonner le profil latéral des gerbes, c'est-à-dire le nombre de particules traversant une surface donnée à une certaine distance du pied de gerbe, et des télescopes à fluorescence échantillonnant leur profil longitudinal, c'est-à-dire le nombre de particules en fonction de l'altitude.

Les détecteurs de particules sont des cuves remplies d'eau utilisant l'effet Cherenkov, sensibles avec un cycle de service quasi-permanent aux particules chargées et (indirectement) aux photons. Ce rayonnement est détecté par des photomultiplicateurs, ou PM, placés dans les cuves. Ces détecteurs constituent le "Surface Detector" (SD) : 1600 sont espacés tous les 1.5 km (SD-1500), tandis qu'une cinquantaine de détecteurs additionnels sont intercalés tous les 750 m pour former un réseau plus dense de 25 km² (SD-750) permettant de diminuer le seuil en énergie jusqu'à environ 0.1 EeV. Les signaux enregistrés sont naturellement exploitables pour déterminer la géométrie des gerbes (position du coeur et direction d'arrivée) et pour estimer leurs tailles (la taille d'une gerbe est un indicateur de l'énergie du rayon cosmique primaire).

L'autre technique de détection des gerbes repose sur des matrices de plusieurs centaines de capteurs photosensibles qui, grâce à un jeu de miroirs de télescope, surveillent chacun une petite portion du ciel. Ces capteurs détectent la fluorescence provoquée par la désexcitation des molécules d'azote à la suite de leur excitation par les nombreux électrons d'ionisation créés lors du passage dans l'atmosphère de la cascade électromagnétique des gerbes. Cette désexcitation donne lieu à un rayonnement ultraviolet très faible (équivalent à l'énergie émise par une lampe de quelques dizaines de watts), mais que l'on arrive à déceler jusqu'à 30 ou 40 kilomètres de distance pendant des nuits sans lune. Au total, 24 télescopes à fluorescence (FD) sont répartis sur 4 sites, et sont orientés de manière à surplomber le réseau de détecteurs de particules. Un ensemble de 3 télescopes supplémentaires (HEAT, High Elevation Auger Telescope)

surplombe le réseau SD-750 avec un champ de vue en élévation allant de 30° à 60°, ce qui permet de descendre le seuil en énergie FD à environ 0.1 EeV. L'intégrale du profil longitudinal permet d'obtenir l'énergie du primaire de manière calorimétrique alors que l'altitude à laquelle la gerbe atteint son maximum de développement, X_{max} , est reliée à la composition du primaire.

L'utilisation combinée des détecteurs au sol et des détecteurs de fluorescence permet d'étalonner la mesure des tailles de gerbes sur une échelle d'énergie indépendante de toute hypothèse sur la masse des primaires. En effet, la mesure de l'énergie calorimétrique par le FD [3] est utilisée comme référence en énergie pour les événements mesurés avec le SD, étalonnés grâce à un lot d'événements hybrides (détectés simultanément par les deux modes de détection). L'échelle en énergie ainsi adoptée est aussi quasi-indépendante des modèles hadroniques modélisant les gerbes, incertains en raison des paramétrages opérés à partir des données prises sur accélérateurs à des énergies jusqu'à trente fois inférieures dans le centre de masse à celles qui se réalisent dans les premiers étages des gerbes. Au final, les incertitudes systématiques sur l'énergie, communes au SD et FD, sont de 14%.

Récemment, l'Observatoire a été enrichi de plusieurs dispositifs d'antennes pour détecter l'émission radio liée au développement des gerbes dans le but de tester des observables complémentaires. Après

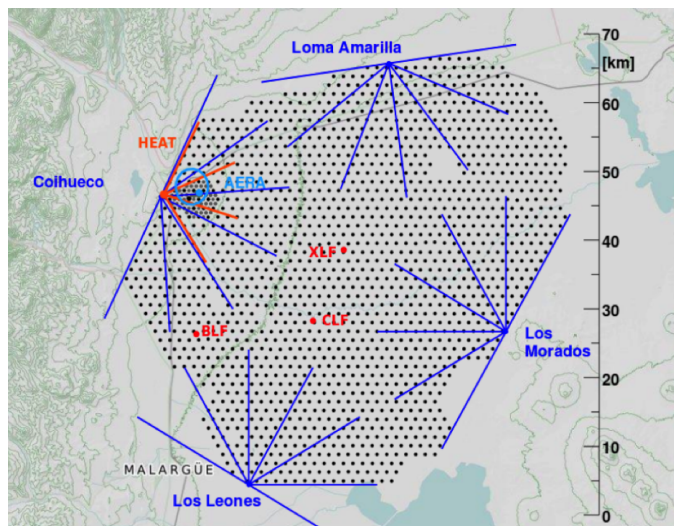


FIGURE 1 – Site de l'Observatoire Pierre Auger en Argentine. Chaque point représente un détecteur de particules au sol. Les champs de vue couverts par les télescopes sont matérialisés en bleu.

des phases de R&D avec différents instruments, un réseau de 17 km² de 153 antennes dans le domaine du MHz est actuellement exploité par la collaboration [4].

1.2 Les principaux/derniers résultats

L’Observatoire Pierre Auger est opérationnel depuis 2004. Les principaux enseignements tirés au cours de ces années de fonctionnement sur l’origine et la nature des RCUHE sont résumés ci-après.

1.2.1 L’intensité des rayons cosmiques de haute énergie

Le spectre en énergie des rayons cosmiques correspond à leur intensité différentielle en fonction de l’énergie. La mesure de ce spectre a été le premier résultat présenté par Auger en 2005 [5], réalisée à l’époque avec 1750 km² an sr d’exposition. La collaboration française a joué un rôle essentiel dans toutes les étapes (concernant la composante SD) qui ont conduit à ce spectre, de la sélection et reconstruction des événements jusqu’à l’évaluation de l’exposition du détecteur. Encore aujourd’hui, les mises à jour reposent toujours sur ces outils.

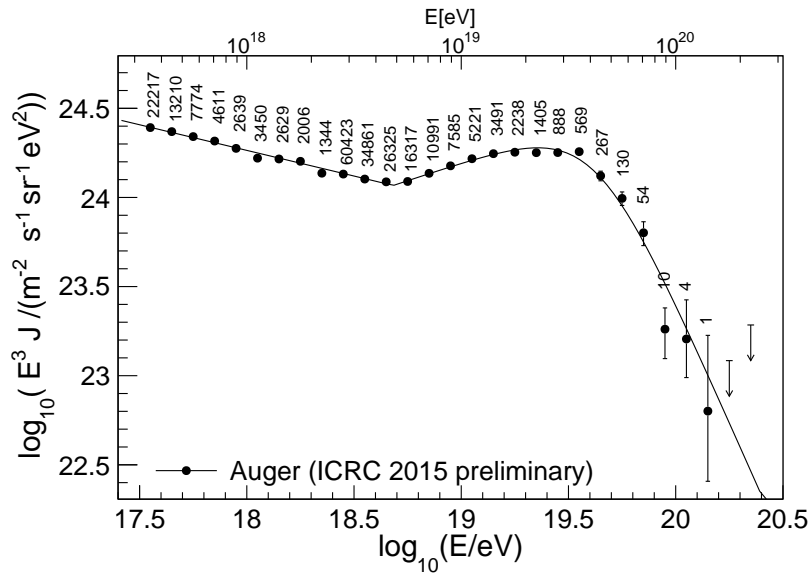


FIGURE 2 – Le spectre en énergie (multiplié par l’énergie au cube) mesuré par Auger, résultant de la combinaison de 4 flots de données de l’Observatoire [6]. Seules les incertitudes statistiques sont représentées, et les limites supérieures correspondent à 84% de niveau de confiance.

Le dernier spectre en date, d’une précision sans précédent (obtenu notamment avec une exposition totale de 50 000 km² an sr au-delà de 3 EeV), est le résultat de la combinaison de quatre flots de données complémentaires : les données du réseau SD-750 permettent de déterminer le spectre dès 0.3 EeV, les données du SD-1500 donnent une mesure depuis 3 EeV jusqu’aux plus hautes énergies au travers de deux flots différenciés selon l’angle zénithal des gerbes (car la reconstruction des gerbes d’angle zénithal inférieur à 60° est très différente de celle des gerbes d’angle zénithal supérieur à 60°), et les données hybrides permettent d’assurer une transition entre les deux réseaux SD, entre 1 EeV et 40 EeV. La précision des mesures actuelles est limitée par les incertitudes systématiques, hormis aux énergies au-delà de $\simeq 70$ EeV. Ce spectre est représenté Fig. 2, multiplié par l’énergie au cube afin de mettre en exergue deux caractéristiques essentielles : une rupture de pente autour de 5 EeV (la *cheville*), et une suppression de l’intensité une décade en énergie plus haut. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer ces caractéristiques, et la mesure de la composition en fonction de l’énergie est nécessaire pour discriminer les scénarios possibles. En particulier, la connaissance de la composition aux plus hautes énergies est cruciale pour comprendre l’origine de la suppression : extinction des sources ou réduction de l’horizon des particules en raison des pertes d’énergie (effet GZK [1]).

Il faut noter que le spectre produit depuis l'hémisphère nord par la collaboration Telescope Array (TA)¹ dans la même gamme en énergie montre des différences s'inscrivant au-delà des incertitudes systématiques. La collaboration française est fortement impliquée dans un groupe de travail commun avec TA qui cherche à comprendre si ces différences sont d'origine expérimentale ou si elles traduisent des observations de sources astrophysiques différentes dans les deux hémisphères.

1.2.2 Un alourdissement des rayons cosmiques aux plus hautes énergies ?

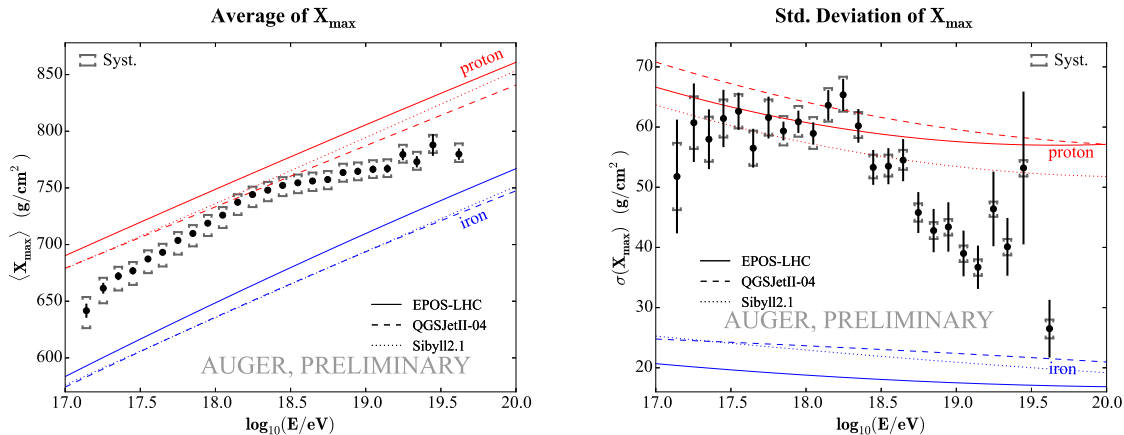


FIGURE 3 – Moyenne (à gauche) et déviation standard (à droite) des distributions mesurées de X_{\max} en fonction de l'énergie, comparées à des simulations de gerbes de proton et de fer [7].

Pour mesurer la composition, l'observable la plus sensible est la position du maximum de développement de la gerbe, X_{\max} , directement obtenue à partir de la reconstruction du profil longitudinal des gerbes détectées par le FD avec une précision de l'ordre de 20 g cm^{-2} . Les analyses les plus récentes, reproduites Fig. 3, fournissent une mesure de la masse moyenne $\langle X_{\max} \rangle$ et des fluctuations associées $\sigma(X_{\max})$ à partir de 0.1 EeV (grâce à l'utilisation de HEAT) jusqu'à 40 EeV . Ces quantités sont comparées aux prédictions des modèles hadroniques (EPOS-LHC [8], QGSJetII-04 [9], Sibyll 2.1 [10]) utilisés dans les simulations de gerbes. Jusqu'à $\simeq 2 \text{ EeV}$ l'augmentation de $\langle X_{\max} \rangle$ est plus importante qu'attendue dans le cas d'une composition pure, indiquant que la masse moyenne des éléments devient plus légère. Autour de $\simeq 2 \text{ EeV}$, les données deviennent compatibles avec une intensité contenant une fraction importante de protons. Au delà de $\simeq 2 \text{ EeV}$, la variation de $\langle X_{\max} \rangle$ avec l'énergie devient moins marquée, indiquant que la masse moyenne devient plus lourde. Les fluctuations autour de $\langle X_{\max} \rangle$ diminuent à partir de la même énergie, de manière compatible avec cet alourdissement.

Une connaissance plus précise de la composition, au-delà de la composition moyenne déduite de $\langle X_{\max} \rangle$, requiert la modélisation des distributions complètes de X_{\max} . Au-delà de $\simeq 1 \text{ EeV}$, cette modélisation a été effectuée en ajustant les distributions observées à celles prédites par différents modèles (QGSJetII-04, Sibyll 2.1 et EPOS-LHC) pour quatre types différents de primaire (p, He, N, Fe) [11]. Parmi les différents modèles testés, seul EPOS-LHC fournit des prédictions pouvant reproduire les distributions observées de manière satisfaisante. Sur la gamme d'énergie explorée, il faut principalement noter *i*) l'absence de noyaux lourds à toute énergie, *ii*) une composition dominée par des protons et des noyaux de masse intermédiaire (CNO) autour de l'énergie de la cheville, la fraction de protons chutant au-delà², et *iii*) une composition dominée par des noyaux CNO entre $\simeq 10$ et $\simeq 30 \text{ EeV}$. Notons qu'un travail effectué en collaboration avec la collaboration TA a souligné la compatibilité des mesures de X_{\max} des deux expériences³.

1. Telescope Array est le deuxième Observatoire de RCUHE situé dans l'Utah, aux Etats Unis, et couvrant une superficie de 700 km^2 .

2. Pour s'affranchir au maximum des modèles dont les prédictions à haute énergie sont incertaines, la corrélation entre X_{\max} et $S(1000)$ a été étudiée en détail [12], $S(1000)$ étant le signal à 1000 m du cœur de la gerbe (la taille). En utilisant les événements hybrides entre 3 et 10 EeV , la corrélation mesurée confirme la présence de plusieurs types de noyaux.

3. Si les mesures de cette observable sont compatibles, notons toutefois que leur interprétation diffère du fait de l'utilisation exclusive des modèles QGSJetII-04 et Sibyll 2.1 par la collaboration TA afin de comparer $\langle X_{\max} \rangle$ aux prédictions, modèles incapables de reproduire les distributions observées à l'Observatoire Auger.

La combinaison du spectre en énergie et de la composition des RCUHE permet d’apporter des éclairages importants (et inattendus) sur les mécanismes d’accélération œuvrant dans les sites astrophysiques produisant ces particules, sur lesquels nous reviendrons dans la section 2.1. Citons ici que les mesures de composition défavorisent les scénarios dans lesquels la cheville résulte de la perte d’énergie des protons par production de paires e^+/e^- lors des interactions avec les photons du CMB, car ce scénario requiert une fraction de protons ultra-dominante au-delà de $\simeq 10$ EeV.

L’observable la plus sensible à la masse est mesurée de manière directe par le FD, dont le cycle de service est de l’ordre de 14%. La statistique collectée au-delà de 30 EeV est insuffisante pour procéder à ces mesures. La collaboration a donc développé des analyses pour obtenir des estimateurs de la masse à partir du SD, mais celles-ci sont fortement dépendantes des modèles hadroniques.

1.2.3 Déficit de muons dans les modèles d’interactions hadroniques

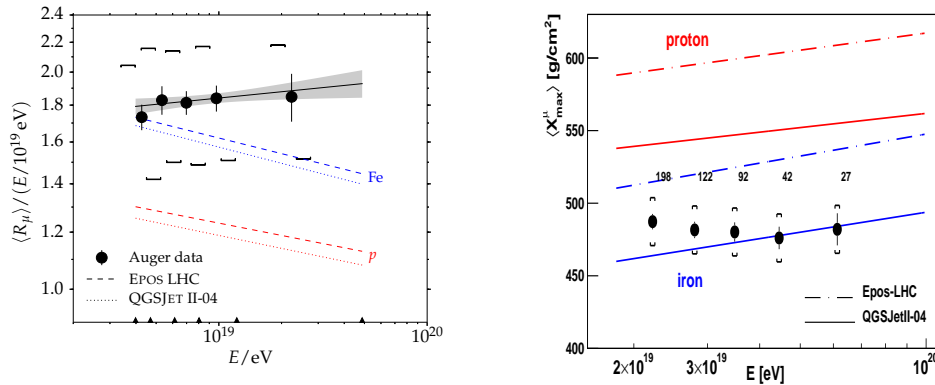


FIGURE 4 – À gauche : $\langle R_\mu \rangle$ en fonction de l’énergie du RC primaire, comparé aux résultats des simulations de gerbes atmosphériques [13]. À droite : $\langle X_{\text{max}}^\mu \rangle$ en fonction de l’énergie [14]. Les symboles indiquent les valeurs pour des masses représentatives des RCs primaires ; les crochets montrent les incertitudes systématiques, dominées par l’incertitude sur l’échelle d’énergie.

La composante muonique des gerbes est une des observables sensible à la composition du primaire. Dès le début de l’expérience, nous nous sommes impliqués dans la recherche d’algorithmes pour évaluer le nombre de muons dans les traces des signaux des cuves, traces qui contiennent à la fois la densité de particules et leur distribution temporelle. Les détecteurs Cherenkov étant sensibles aux composantes électromagnétique et muonique, la difficulté est de pouvoir extraire cette dernière. Actuellement, certaines analyses finalisées permettent d’une part d’évaluer un indicateur du nombre de muons dans les gerbes inclinées⁴ normalisé à des prédictions de modèles⁵ R_μ [13], et d’autre part d’estimer la profondeur du maximum de développement des muons dans les gerbes, X_{max}^μ en utilisant leur distribution temporelle [14]. Mais ces études sont limitées à un domaine d’application restreint en angle zénithal (incliné, voire très incliné car la composante électromagnétique est alors absorbée dans l’épaisseur d’atmosphère traversée) et/ou en énergie (autour de typiquement 10 EeV). Les résultats, pointent d’une part une sous-estimation du nombre de muons par les modèles (de 30 à 80% en fonction des modèles) comme montré en Fig. 4-gauche, et d’autre part l’incapacité des modèles à pouvoir décrire simultanément le maximum de développement électromagnétique et le maximum de développement des muons comme montré en Fig. 4-droite (pour un angle zénithal de 67°).

Une autre façon d’étudier la composante muonique consiste à utiliser des simulations sélectionnées afin de reproduire, pour un lot d’événements hybrides d’une énergie donnée, le profil longitudinal observé. Ces simulations sont menées pour différents types de primaires et pour différents modèles d’interactions hadroniques. Pour chacun des événements, l’ensemble des gerbes simulées reproduisant le profil longitudinal observé est utilisé pour comparer les signaux attendus dans les détecteurs SD avec ceux mesurés. Quelles que soient les hypothèses de composition et le modèle d’interactions hadroniques utilisé, ces

4. Notons que les algorithmes de reconstruction spécifiques aux gerbes inclinées ont été développés par les groupes français.

5. Par *modèle*, nous entendons ici primaire + modèle d’interactions hadroniques utilisé dans les générateurs Monte-Carlo.

études montrent un déficit de 30 à 60% dans les signaux simulés, déficit qui ne peut être attribué qu'à un déficit de muons, la partie électromagnétique étant contrainte par le profil et donc l'énergie du FD [15].

Ces études permettent d'améliorer les modélisations opérant dans les simulations des premières interactions hadroniques des gerbes, et ainsi de réduire les incertitudes/biais des prédictions portant sur $\langle X_{\max} \rangle$. Certaines études récentes ont en effet montré que la source principale d'incertitudes sur $\langle X_{\max} \rangle$ était imputable aux modélisations des collisions pion-air à haute énergie, et plus particulièrement aux sections efficaces inélastiques et aux spectres de production de mésons et d'anti-nucléons dans les interactions pion-nucléon [16]. L'observable nouvellement mesurée X_{\max}^{μ} se révèle extrêmement sensible à ces modélisations. Ainsi, en utilisant ces mesures, des changements dans les modélisations peuvent être opérés de sorte à ramener $\langle X_{\max}^{\mu} \rangle$ dans le domaine compatible avec les contraintes de composition déduites de X_{\max} . Avec les résultats actuels, la production de paires baryon/anti-baryon prédite par le modèle EPOS-LHC se révèle trop importante [16]. Grâce à ce jeu de ping-pong entre $\langle X_{\max} \rangle$ et $\langle X_{\max}^{\mu} \rangle$, les corrections apportées permettront à terme une description des gerbes satisfaisante.

L'ensemble de ces résultats montre que pour parvenir à une meilleure connaissance des interactions hadroniques et du développement des gerbes atmosphériques, il devient indispensable d'obtenir une mesure indépendante des composantes électromagnétique et muonique dans une large gamme d'angle zénithal et d'énergie.

1.2.4 Auger à l'ère du multi-messager

La recherche de photons et de neutrinos d'ultra-haute énergie constitue un autre volet de recherches poursuivies à l'Observatoire extrêmement important à l'heure où frémit l'astrophysique multi-messager, volet dans lequel les groupes français ont été fortement impliqués et ont notamment produit le premier article publié dans *Physical Review Letters* par la collaboration en 2008 [17].

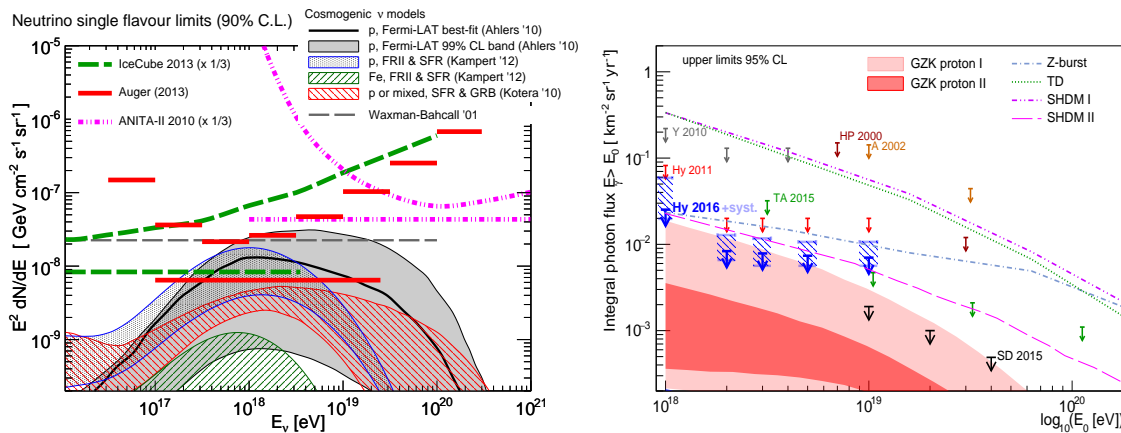


FIGURE 5 – À gauche : limites supérieures à 90% de niveau de confiance (en rouge) sur l'intensité (totale et différentielle) diffuse de neutrinos d'ultra haute énergie. Les limites sont comparées avec les prédictions des modèles de neutrinos cosmogéniques, la limite Waxman-Bahcall, et les limites obtenues par IceCube and ANITA (voir [18]) (Limites et intensité sont ici converties en une saveur unique) [18]. À droite : limites supérieures à 95% de niveau de confiance sur l'intensité diffuse de photons d'ultra haute énergie [19]. Les limites obtenues par d'autres expériences ainsi que les prédictions de modèles « top-down » et de modèles de photons cosmogéniques sont indiquées (références dans [19]).

Le principe de détection des gerbes de photons et de neutrinos repose sur l'analyse de la structure en temps des signaux des détecteurs Cherenkov au sol (WCD). Pour les neutrinos, on exploite les gerbes à grand angle zénithal en recherchant des signaux dispersés en temps de manière anormale, car la composante électromagnétique des gerbes initiées par des primaires hadroniques est alors absorbée dans l'épaisse couche d'atmosphère traversée tandis que celle des gerbes initiées par des neutrinos peut être en plein développement au sol si l'interaction neutrino-air s'est produite à basse altitude. Les recherches ont été effectuées pour des neutrinos de toute saveur pour des angles zénithaux supérieurs à 60° ainsi

que pour des neutrinos de saveur tau pour des angles zénithaux⁶ entre 90 et 95°. Pour les photons, des recherches similaires sont effectuées pour des angles zénithaux entre 30 et 60° afin de sélectionner des gerbes totalement développées. Au critère de sélection portant sur la structure temporelle des signaux s’ajoute une coupure sur le développement latéral des gerbes qui doit décroître plus rapidement que celui des gerbes hadroniques. Pour ces deux types d’étude, le bruit de fond n’est pas simulé mais estimé sur une fraction de données utilisée comme échantillon-test. Pour une intensité différentielle décroissant comme l’inverse de l’énergie au carré (cas d’un flux d’énergie constant en fonction de l’énergie, très populaire dans le contexte multi-messager), les limites supérieures obtenues sont présentées Fig. 5, gauche et droite pour les neutrinos [18] et les photons [19] respectivement.

Ces limites excluent que la grande majorité des RCUHE soit produite dans un scénario de type « top down », c’est-à-dire que les RCUHE soient des sous-produits issus des désintégrations de défauts topologiques primordiaux ou de particules supermassives. Elles permettent également de sonder l’origine de la coupure spectrale, car les interactions entre les RCUHE et les photons de fonds diffus produisent des neutrinos et des photons. L’intensité de ces particules secondaires dépend alors de la masse des RCUHE, allant jusqu’à l’extinction dans le cas de noyaux lourds. Les limites obtenues contraignent ainsi fortement la possibilité que les RCUHE soient exclusivement des protons, en accord avec les mesures de X_{\max} .

Dès le début de l’expérience, la collaboration française a été, comme évoqué plus haut, très active dans la recherche des neutrinos, notamment en ce qui concerne l’optimisation des algorithmes de sélection et l’évaluation de l’exposition aux neutrinos de saveur tau. Elle a aussi largement contribué aux publications de ces limites, ainsi qu’à la première limite photon avec le SD.

1.2.5 Les anisotropies des rayons cosmiques d’ultra-haute énergie

La recherche d’anisotropies dans les distributions des directions d’arrivée est en principe le moyen le plus direct pour identifier/cartographier les sources de RCUHE, notamment aux énergies extrêmes où les particules pourraient être assez rigides (magnétiquement parlant) pour ne pointer qu’à quelques degrés des sites d’origine. La résolution angulaire obtenue pour les événements détectés par le SD permet d’envisager de telles recherches : elle est meilleure que 1.6° (0.9°) lorsque les informations d’au moins trois (six) détecteurs sont utilisées dans la reconstruction des gerbes.

Dans le régime où les particules sont peu rigides, les anisotropies à grande échelle sont des signatures possibles d’un mouvement collectif des RCs et/ou de la distribution de leurs sources. Dans la gamme d’énergie autour de l’EeV, le régime de propagation des particules dans le champ magnétique Galactique se situant entre un transport diffusif et un flot déterministe de trajectoires guidées dans un champ gelé devrait induire (au moins) des moments dipolaires et quadrupolaires. Aux énergies plus élevées, pour des sources distribuées de manière similaire à la matière dans l’Univers, on s’attend à ce que la distribution angulaire des RCUHE soit influencée par la contribution des sources proches, de sorte que la Voie Lactée baigne dans un gradient de densité de RCs, gradient qui devrait conduire à (au moins) un moment dipolaire. En propageant ce dipole dans la Galaxie, le champ magnétique conduit alors à la production de moments d’ordre supérieur tout en gardant constante la contribution du monopole à l’intensité totale (en accord avec le théorème de Liouville).

Motivés par ces considérations, les groupes français se sont fortement investis dans l’extraction de signaux à grande échelle. La mise en œuvre de ce type d’analyses est rendue délicate par l’existence de sources expérimentales de perturbations qui peuvent influencer sur le taux d’événements et induire des modulations spurieuses. Ces effets ont été identifiés et étudiés en détail au sein des groupes français, et plusieurs des méthodes de recherche d’anisotropies ont été conçues et développées par des collaborateurs français, très actifs dans ces analyses et les publications les concernant. De plus, ils ont été initiateurs de la mise en place du groupe de travail sur la recherche d’anisotropies en collaboration avec TA (afin d’obtenir une couverture complète du ciel), et leur forte implication dans ce groupe s’avère fructueuse. De manière générale, les efforts consentis dans ce domaine sur plus d’une décennie commencent à porter leurs fruits, comme en témoignent la sélection non-exhaustive de résultats présentés ci-dessous.

L’augmentation de la statistique collectée à l’Observatoire permet dorénavant de sonder les première et deuxième harmoniques en ascension droite bien en dessous du pourcent sur une large gamme d’énergie. Les études actuelles capturent des amplitudes significatives autour de l’EeV (première et deuxième

6. Ces gerbes sont alors ascendantes dans l’atmosphère, l’interaction neutrino-nucléon s’étant produite dans la roche terrestre.

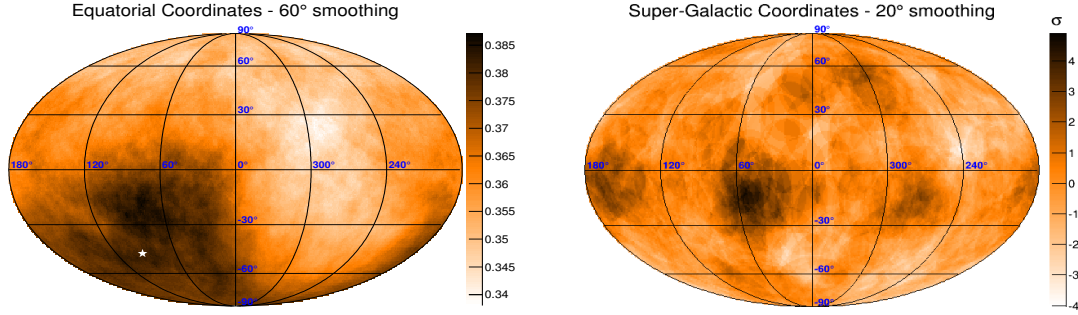


FIGURE 6 – À gauche : Carte du ciel en coordonnées équatoriales donnant l’intensité en $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1} \text{sr}^{-1}$ en tout point au-delà de 8.5 EeV (10 EeV) en terme de l’échelle d’énergie d’Auger (Telescope Array), lissée à une échelle angulaire de 60° [21]. À droite : Carte du ciel en coordonnées Supergalactiques donnant la significativité des excès/déficits du nombre d’événements observés en tout point au-delà de 42 EeV (57 EeV) en terme de l’échelle d’énergie d’Auger (Telescope Array), lissée à une échelle angulaire de 20° [23].

harmoniques) et au-delà de 8 EeV (première harmonique), confirmant les indications qui avaient précédemment été extraites à partir du comportement non-aléatoire des phases. Une description complète de ces résultats (publiés dans la série d’articles [20]) et de leurs implications sur la manière dont la transition entre RCs Galactiques et extragalactiques s’opère serait trop longue, et nous nous contentons ici de développer un peu les études au-delà de 8 EeV seulement. Au-delà de ce seuil, les analyses conduisent dorénavant à la détection à 5σ d’une première harmonique en ascension droite qui, une fois interprétée en terme d’anisotropie dipolaire seulement, impliquent un moment dipolaire d’amplitude d’environ 7% pointant dans les directions équatoriales $(\alpha, \delta) = (95^\circ \pm 13^\circ, -39^\circ \pm 13^\circ)$. Afin de s’affranchir de toute hypothèse sur la forme de l’intensité, une méta-analyse des données de l’Observatoire et de celles de TA a été menée de manière conjointe, englobant la totalité du ciel [21]. Le dipole résultant, illustré Fig. 6-gauche, est en accord avec l’estimation obtenue avec les données d’Auger seulement : amplitude de $6.5 \pm 1.9\%$ (p -value de 5×10^{-3}), direction pointant vers $(\alpha, \delta) = (93^\circ \pm 24^\circ, -46^\circ \pm 18^\circ)$. Cette anisotropie dipolaire reflète probablement, au premier ordre, la distribution non homogène des sources proches.

Aux énergies extrêmes, les pertes d’énergie des RCUHE limitent l’horizon de ces particules. Pour des déflexions magnétiques suffisamment petites, la distribution des directions d’arrivée au-delà de $\simeq 40$ EeV devrait refléter la distribution non-homogène de la matière extragalactique proche. La recherche d’anisotropies à petite/moyenne échelle angulaire aux énergies les plus élevées est donc potentiellement le moyen le plus direct d’identifier les sources des RCUHE. Au moment des premières analyses, l’idée que les protons extragalactiques dominaient l’intensité à très haute énergie prévalait, suggérant de faibles déflexions au delà de 40 EeV. Les collaborateurs français ont alors participé activement aux recherches de corrélations avec des sources plausibles de RCUHE, allant du centre galactique jusqu’aux AGN. Une décennie plus tard, aucune corrélation significative n’est à retenir de ces recherches initiales, y compris avec le catalogue Véron-Cetty & Véron d’AGN qui avait donné une indication d’anisotropie avec les premières données. À noter que les plus importantes déviations (p -value $\simeq 1.4\%$) par rapport à l’hypothèse d’isotropie sont dans la direction de Centaurus A (dans un rayon de 15° et à des énergies supérieures à 58 EeV), et dans les directions des AGN lumineux détectés en rayons X (rayon de 18° et énergies supérieures à 54 EeV) [22].

Très récemment, une étude combinant les données de l’Observatoire et de Telescope Array menée notamment par des groupes français a relancé les espoirs de détection des sources aux plus hautes énergies. Pour ce faire, un étalonnage croisé de l’intensité mesurée dans une région du ciel couverte par les deux expériences a été réalisé pour des énergies supérieures à 42 EeV (57 EeV) en terme de l’échelle d’énergie Auger (Telescope Array) actuelle. L’ensemble de la cartographie du ciel a permis une série de recherches d’anisotropies indépendamment de toute hypothèse sur la forme de l’intensité. Parmi ces recherches, un excès a été capturé autour du plan Supergalactique pour des latitudes $|b_{\text{SG}}| \leq 20^\circ$, avec une p -value de 2%, excès amplifié en considérant les latitudes négatives seulement telles que $-22^\circ \leq b_{\text{SG}} \leq 0^\circ$, avec une p -value de 0,2%. Notons que les p -values citées sont extrêmement pénalisées car elles tiennent compte d’un balayage en énergie entre 40 et 80 EeV qui ne peut actuellement être réalisé en raison de la non-connaissance des énergies de TA. Une cartographie du ciel lissée à une échelle angulaire de 20° est

montrée Fig. 6-droite en coordonnées Supergalactiques : on y voit clairement que l’excès global provient essentiellement de trois régions du ciel situées en dessous du plan sur des échelles compatibles avec des déflexions magnétiques pour des noyaux CNO. Bien qu’encore peu significative à l’heure actuelle, cette observation, suggérant de manière directe une origine extragalactique des RCUHE, motive de nouvelles recherches de corrélations au moyen de catalogues d’objets astrophysiques qui montreraient des densités similaires. Une corrélation encourageante avec un catalogue de sites astrophysiques quelque peu survolés dans le passé fait actuellement l’objet d’une étude et sera, si elle est confirmée, l’objet de travaux intensifs en vue d’une publication très importante [24].

Les collaborateurs français sont par ailleurs impliqués dans une recherche de corrélations entre les directions d’arrivée des RCUHE mesurées à l’Observatoire et à Telescope Array, et directions d’arrivée des neutrinos astrophysiques détectés à l’observatoire IceCube [25]. L’indication d’une possible corrélation reste à confirmer avec un plus large lot de données.

1.3 Auger France dans la collaboration Pierre Auger

Le groupe du LPNHE a été particulièrement actif lors de la phase initiale du projet, et avec les groupes français qui se sont joints à cette aventure scientifique, le PCC Collège de France (devenu l’APC ensuite) au démarrage avec le groupe de LTFB (INSU) puis le LAL et l’IPNO en 2000, la France a clairement joué un rôle majeur dans la conception et dans la construction de l’Observatoire Pierre Auger. Les laboratoires français ont notamment réalisé l’essentiel de l’électronique des WCD (bases des 5000 PMT et cartes unifiées du SD, système de GPS) ainsi que les algorithmes et programmes informatiques essentiels au fonctionnement de l’Observatoire : programme local de traitement des données des WCD incluant le trigger, le trigger central du réseau SD, ainsi que le système central d’acquisition de données (CDAS). Ce dernier assure la synchronisation entre les données SD et FD et d’autres détecteurs potentiels, la construction et le stockage des données. Les groupes français sont depuis responsables de la maintenance de l’électronique et ont pris une part essentielle à l’étalonnage et au « commissioning » des détecteurs SD. Le premier système de contrôle en ligne (monitoring) du SD a été également développé en France. Le CC-IN2P3 est devenu dès le début le lieu de stockage officiel des données d’Auger ainsi que la première plateforme de simulation. Les laboratoires du LPSC et Subatech ont rejoint respectivement la collaboration en 2006 et 2007 et ont pris en charge des responsabilités importantes telles que l’intégration du monitoring dans un système global assurant le contrôle et le suivi du fonctionnement de l’ensemble de l’Observatoire, et la construction du premier réseau de radio-détection sur le site.

La visibilité des groupes français au sein de la collaboration Auger, comptant plus de 17 pays et plus de 400 chercheurs, est indéniable. Les chercheurs permanents ainsi que les post doctorants ont quasiment toujours eu des responsabilités au sein des tâches d’analyses ou de tâches liées aux détecteurs (dans l’organisation de la collaboration, en principe, 2 collaborateurs se partagent la responsabilité d’une tâche). Voici une liste des tâches dont au moins un membre des équipes IN2P3 a été responsable :

- “Surface Detector Electronics” (depuis 2000)
- “Central Data Acquisition ”
- “Trigger and acceptance” (depuis 2005)
- “Detector Performance” (depuis 2004)
- “Monitoring” (depuis 2011)
- “Microwave Detection Task Force”
- “Radio Detection R&D Task Force”
- “Auger North Task Force”
- “Data Management and Mass Storage“ (depuis 2000)
- “Analysis foundation” (depuis 2013)
- “Spectrum”
- “Hadronic Interactions”
- “Photons”, “Neutrinos”
- “Point Sources”, “Large Scale Anisotropy” (toujours au moins un membre entre 2004 et 2014).

Depuis 2007, deux chercheurs IN2P3 se sont succédé à la charge de *Science Coordinator*, donc à la tête des tâches de physique. La France a également un membre dans le Conference committee (depuis 2013), a toujours eu un représentant dans le Publication Committee jusqu’en 2013, et en a assuré la direction de 2010 à 2013.

D'autre part il faut souligner que la collaboration française, constituée ces dernières années d'une trentaine de chercheurs en moyenne (20 permanents + post doctorants et doctorants), a contribué activement à 40% des 78 publications de la collaboration Auger (Fig. 7, et liste en annexe 4.4). Au sein des équipes IN2P3, plus de 35 doctorants ont été formés dont un tiers ont obtenu une position permanente dans la recherche académique, un tiers sont actuellement en post doctorat, et un tiers ont trouvé un emploi dans le secteur privé. Il est à noter que 11 des post doctorants ayant travaillé dans les groupes IN2P3 sur Auger ont actuellement des positions permanentes dans la recherche académique.

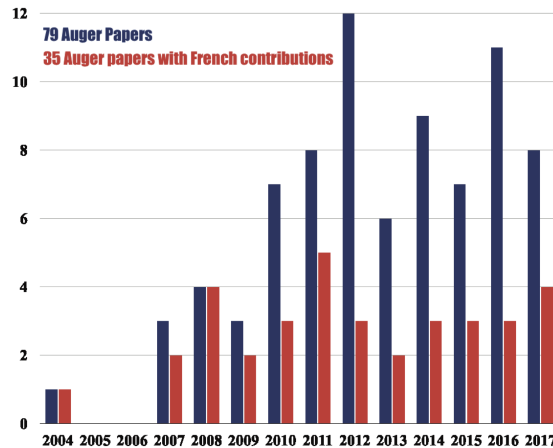


FIGURE 7 – Taux de publications de la collaboration Auger. En rouge : nombre de publications auxquelles des membres d’Auger France ont activement contribué.

2 Le Projet AugerPrime

Les nombreux résultats marquants obtenus au cours des dernières années par la collaboration Pierre Auger ont apporté les premières réponses aux énigmes posées par l’observation des RCUHE, et ont fait progresser les connaissances sur les rayons cosmiques jusqu’aux énergies les plus extrêmes. Mais il reste des questions importantes à éclaircir, et certaines des réponses apportées soulèvent de nouvelles questions : quelle est la composition des RCUHE aux énergies extrêmes, quels sont les mécanismes d’accélération opérant dans les sites astrophysiques, quel est quantitativement l’impact des champs magnétiques sur la propagation de ces particules, et, de manière ultime, quelles sont les sources des RCUHE ? Aussi, la collaboration Pierre Auger a mis en place un programme d’amélioration de l’Observatoire, dont l’exploitation est prévue jusqu’en 2025. Ce projet, nommé AugerPrime, vise à perfectionner la caractérisation des gerbes atmosphériques en vue d’une meilleure identification de la nature des rayons cosmiques primaires, afin de progresser dans l’interprétation des résultats et de répondre aux questions encore ouvertes sur l’origine et la composition des rayons cosmiques aux plus hautes énergies. Le projet AugerPrime est amplement détaillé dans le *Preliminary Design Review* [26]. Dans ce chapitre, l’accent est porté sur les aspects du projet qui concernent plus particulièrement les équipes de l’IN2P3, des enjeux scientifiques aux nouveaux détecteurs.

2.1 « AugerPrime », enjeux scientifiques

La suppression de l’intensité au-dessus de 40 EeV, très clairement observée, semble, de prime abord, compatible avec la signature attendue de l’effet GZK. Cependant, l’étude de la composition en fonction de l’énergie indique une tendance graduelle vers des masses plus élevées. En particulier, l’énergie de coupure de chaque élément semble proportionnelle à leur charge : les protons coupant un peu au-delà de 5 EeV, il semble plausible que les énergie extrêmes soient peuplées exclusivement de noyaux de fer coupant vers 100 EeV. Dans ce scénario, la coupure du spectre pourrait essentiellement résulter de l’énergie maximale d’accélération des sources. Une étude quantitative, reposant sur un nombre minimaliste de paramètres « astrophysiques », a été menée au sein de la collaboration en ajustant simultanément le spectre en énergie et les distribution de X_{\max} en fonction de l’énergie [27]. Pour ce faire, les RCUHE sont propagés dans l’Univers depuis leurs sources (considérées ici stationnaires et peuplées de manière uniforme dans l’espace) jusqu’à la Terre en incluant cinq familles de noyaux pour la composition aux sources accélérés selon un spectre d’injection en loi de puissance. Les paramètres libres sont *i*) les abondances de chaque élément aux sources, *ii*) le taux de production de RCHUE, identique pour chaque source, *iii*) l’indice spectral γ , identique pour chaque source et pour chaque élément, et *iv*) l’énergie maximale d’accélération E_{cut}^Z , proportionnelle à la charge des éléments. Le résultat du meilleur ajustement est représenté Fig. 8 en terme du spectre en énergie, de $\langle X_{\max} \rangle$ et de $\sigma(X_{\max})$. Cet ajustement

conduit à $E_{\text{cut}}^p = 10^{18.67 \pm 0.03}$ eV et $\gamma = 0.94_{-0.10}^{+0.09}$, suggérant un spectre injecté extrêmement dur, ainsi qu'une composition dominée par des noyaux de masse intermédiaire, pratiquement sans protons ni noyaux de fer, résultat pour le moins inattendu ⁷.

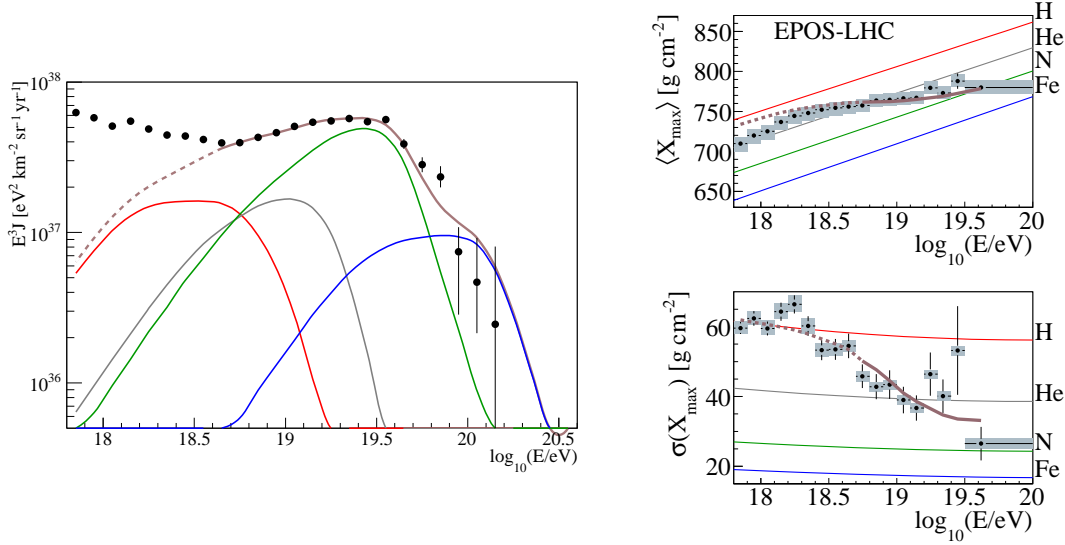


FIGURE 8 – À gauche : le spectre en énergie ajusté par un modèle (voir le texte). Seules les incertitudes statistiques sont indiquées et les limites supérieures sont à 85% de niveau de confiance. À droite : moyenne (en haut) et écart standard (en bas) des distributions de X_{max} observées et comparées aux prédictions des simulations [27].

Cette interprétation repose cependant sur une extrapolation des résultats de X_{max} au-delà de 40 EeV. La détermination de la masse aux plus hautes énergies est donc extrêmement importante et constitue la raison première qui a motivé le programme d'amélioration de l'Observatoire. Cette détermination permettrait de développer grandement la compréhension des mécanismes produisant ces RCs. S'il s'avérait que l'alourdissement progressif avec l'énergie observé entre 1 EeV et 30 EeV se confirme à plus haute énergie, la composition des RCs d'énergie supérieure à $\simeq 70$ EeV serait dominée par des noyaux de fer. Du point de vue des mécanismes d'accélération, les conséquences seraient importantes. D'une part, cela signifierait que les sources épuisent leur capacité à accélérer des particules au-delà de 100 EeV. D'autre part, cela impliquerait également que les RCs extragalactiques ne sont pas accélérés par ondes de choc selon le célèbre mécanisme imaginé par Fermi, car les spectres d'injection aux sources qu'il est nécessaire d'introduire dans ce scénario ne s'accordent pas avec ceux prédits par ce mécanisme. De telles mesures permettraient donc de comprendre les mécanismes d'accélération des sources.

La composition en masse des RCUHE dans la région de la suppression spectrale reste indéterminée car le FD tombe à court de statistique au-dessus de 40 EeV à cause de son cycle de service restreint. Les analyses poussées et innovantes conduites sur les données du SD, dont le cycle de service est quasi-permanent, ont permis de définir de nouvelles variables sensibles à la masse du primaire mais elles requièrent généralement des sélections sévères qui conduisent également à un nombre d'événements exploitables limité. La collaboration a donc défini un programme d'extension des potentialités du SD pour permettre une extraction de X_{max} et de N_{μ} (un indicateur du nombre de muons des gerbes) événement par événement. Tout en continuant de s'appuyer sur la stratégie de détection hybride, le détecteur amélioré prévoit l'installation de nouveaux détecteurs ayant une réponse différente et complémentaire aux composantes muonique et électromagnétique des gerbes, afin de permettre de caractériser chacune d'elles séparément.

Outre la recherche de l'origine de la suppression et de toutes ses implications, la détermination de X_{max} et de N_{μ} événement par événement permettrait également de rechercher une composante sous-dominante de protons, dont la source serait différente de celle produisant la majorité des RCs extraga-

7. Notons que l'ajustement trouve également un second minimum avec $\gamma \simeq 2$ et une valeur de $E_{\text{cut}}^p = 10^{19.84}$ eV plus conforme aux modèles d'accélération standards. Alors que l'ajustement du spectre est également bon pour ce second minimum, les distributions de masse prédites sont en désaccord total avec celles observées, ce qui démontre qu'il est crucial de mesurer la composition en masse aux plus hautes énergies pour résoudre l'origine de la suppression spectrale.

lactiques. À partir des données actuelles, l'existence d'une telle composante est permise avec un niveau d'intensité relatif de l'ordre de 10%. La découverte de ces protons serait riche de conséquences, et permettrait notamment de donner un accès (probablement) direct à leurs sources. Actuellement, les recherches de sources ponctuelles au-delà de 50 EeV n'ont mené qu'à l'observation de signaux marginalement significatifs. Ceci se comprend facilement si la composition de la majorité des particules est effectivement lourde, impliquant des déflexions magnétiques importantes pour ces particules. La soustraction de cette composante lourde pourrait donc lever le voile sur les sources responsables de l'accélération des protons.

Les réponses qu'apporteront les données de l'Observatoire dans sa nouvelle configuration seront décisives pour développer la science des RCUHE extragalactiques, et pour comprendre comment aller plus loin à plus long terme pour étudier leur origine.

2.2 La méthode

Jusqu'à présent, la mesure des caractéristiques des gerbes avec le réseau de détecteurs au sol repose sur des principes empiriques, notamment sur l'ajustement du profil latéral des gerbes avec des fonctions analytiques simples permettant d'extraire un estimateur de l'énergie pour le SD qui sera étalonné avec l'énergie mesurée par le FD sur des lots de données hybrides. Cette approche ne permet pas de relier physiquement ces mesures les unes par rapport aux autres. Dans ce qui suit, un changement de paradigme sur la manière de considérer une gerbe atmosphérique va permettre une description cohérente de ces caractéristiques. Cette description repose sur le principe d'universalité des gerbes atmosphériques.

Ce principe est bien connu pour décrire une cascade électromagnétique. Après la succession des premières interactions, toute cascade peut être décrite par des états macroscopiques reproductibles en raison des millions d'interactions qui se produisent. De la même manière que les caractéristiques d'émission ou d'absorption d'un corps noir en fonction de la fréquence du rayonnement peuvent être décrites par une fonction universelle à partir de la connaissance de la température, le développement longitudinal des cascades en fonction de la profondeur atmosphérique peut être décrit de manière universelle à partir de quelques paramètres macroscopiques. Ainsi, qu'une cascade électromagnétique soit initiée par un proton ou un noyau de fer, le profil de cette cascade peut se voir entièrement décrit à l'aide de quelques paramètres seulement, dont, outre les directions d'arrivée, l'énergie E et la profondeur du maximum de développement X_{\max} .

La cascade muonique, dont la contribution au signal des détecteurs Cherenkov est importante, est *a priori* moins universelle parce que les muons qui survivent à la désintégration se propagent en majorité sans interagir de manière catastrophique depuis leurs points de production jusqu'au sol. Cependant, des études Monte-Carlo ont montré qu'une description universelle des profils de ces cascades muoniques reste possible au-delà d'une énergie située autour de $10^{17.5}$ eV. Ainsi, c'est le profil complet des gerbes qui peut être décrit à l'aide de l'énergie, la profondeur du maximum de développement, et un indicateur du nombre de muons N_μ . Suivant ce principe, la forme des grands signaux (*i.e.* les signaux contenant assez de particules pour être suffisamment lisses, donc les signaux assez proches du cœur des gerbes) détectés au niveau du sol peut être prédite de façon paramétrique, en introduisant notamment E , X_{\max} et N_μ pour paramètres. C'est ce qui est illustré Fig. 9 où une trace FADC d'un détecteur Cherenkov situé à 800 m du pied de gerbe simulée par Monte-Carlo est comparée à celle prédite par des profils universels pour chaque composante entrant dans le signal total : l'accord est remarquable.

En principe, les caractéristiques des gerbes (E , X_{\max} , N_μ) pourraient donc être déterminées événement par événement dans une procédure d'ajustement. Mais les corrélations entre ces paramètres empêchent leur détermination précise gerbe par gerbe lorsqu'ils sont tous laissés flottants et ajustés dans une

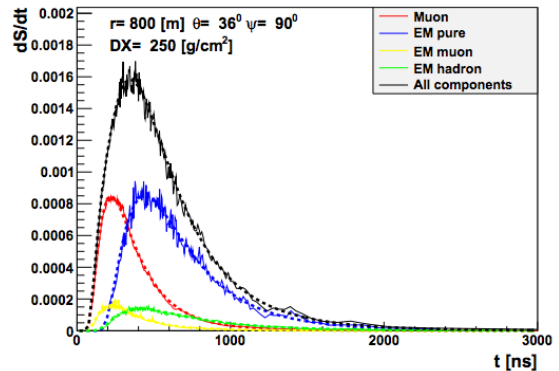


FIGURE 9 – Traces FADC simulées par Monte-Carlo et prédites par un modèle d'universalité des gerbes atmosphériques à 800 m du pied d'une gerbe de 10 EeV.

procédure de vraisemblance basée sur les uniques mesures des détecteurs Cherenkov. En ajoutant une autre mesure suffisamment différente, comme c'est le cas avec les scintillateurs mesurant *grasso modo* le seul signal électromagnétique des électrons/positrons, les simulations montrent qu'il devient alors possible de mesurer ces paramètres avec une bonne précision en s'affranchissant de certaines relations liant E , X_{\max} et N_{μ} dans la description des profils – relations construites à partir des simulations Monte-Carlo.

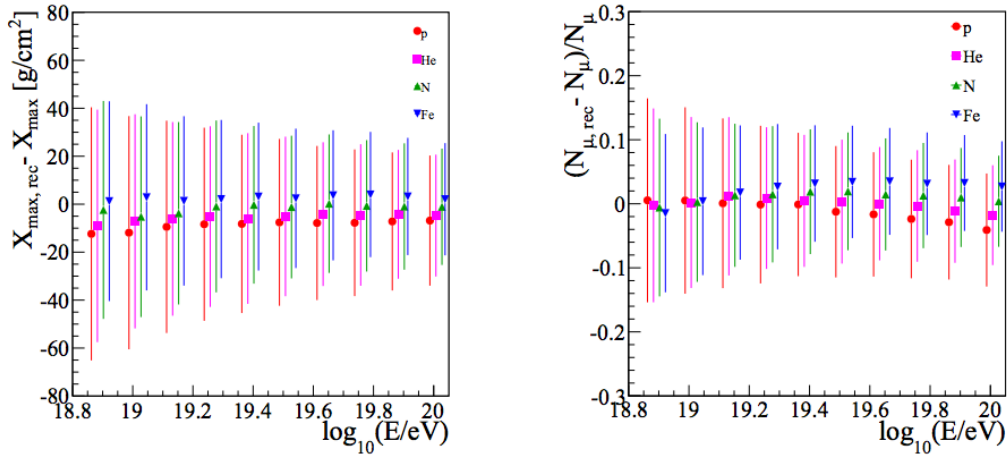


FIGURE 10 – Résolutions événement par événement attendues pour X_{\max} (à gauche) et N_{μ} (à droite) en fonction de l'énergie, avec la nouvelle configuration de l'Observatoire.

C'est là tout le principe constituant le cœur de l'upgrade de l'Observatoire. Notons également qu'un sous-réseau de scintillateurs enterrés couvrant une vingtaine de kilomètres carrés, sur un pas resserré par rapport à l'espacement nominal entre deux détecteurs Cherenkov, permettra de mesurer précisément le nombre de muons pour des gerbes d'énergie inférieure à 1 EeV. Le principe de mesure indirecte de N_{μ} avec des scintillateurs sur les détecteurs Cherenkov pourra ainsi être confronté à des observations plus directes à ces énergies. De plus, des étalonnages entre X_{\max} et X_{\max}^{μ} pourront être effectués de manière directement observationnelle grâce à un autre type de données hybrides (FD + scintillateurs enterrés). De telles relations sont en effet requises dans les paramétrages dits universels des gerbes. Les performances attendues ont été simulées par Monte-Carlo. Les résolutions attendues avec l'Observatoire dans sa nouvelle configuration pour X_{\max} et N_{μ} sont montrées Fig. 10 : X_{\max} est reconstruit avec une incertitude de $\simeq 30 \text{ g cm}^{-2}$ aux plus hautes énergies (à titre de référence, les différences de X_{\max} entre protons et noyaux de fer sont d'environ 100 g cm^{-2} , et la résolution FD est de l'ordre de 20 g cm^{-2}), alors que N_{μ} est reconstruit avec une incertitude d'environ 10%. Avec de telles performances, les possibilités d'extraction de la composition sont excellentes, et le pouvoir de discrimination entre des populations de masse différente est tout à fait confortable.

Ajoutons que l'établissement des relations liant les paramètres macroscopiques entre eux avec les données de l'Observatoire dans sa nouvelle configuration pourra également permettre de reconstruire les données collectées jusqu'à présent une approche universelle fixant certains paramètres, mais permettant d'accéder par exemple à X_{\max} sur une base événement par événement.

2.3 Description des nouveaux détecteurs de surface

Le projet AugerPrime prévoit une évolution du détecteur de surface avec l'installation de scintillateurs sur chaque détecteur Cherenkov, pour obtenir une mesure complémentaire des particules contenues dans la gerbe. On échantillonne ainsi le contenu de la gerbe avec deux types de détecteurs dont les réponses aux muons et aux $e^{-}/e^{+}/\gamma$ sont différentes. Pour traiter à la fois les signaux des détecteurs Cherenkov et ceux des détecteurs scintillants (SSD, Scintillator Surface Detector), une nouvelle électronique d'acquisition et de contrôle aux performances accrues est développée (SDEU, Surface Detector Electronic Upgrade). Pour compléter l'évolution du SD, le déploiement d'un réseau de détecteurs de muons enterrés (AMIGA) va être terminé dans la zone de 23 km^2 équipée du réseau plus dense de WCD. Ce réseau va fournir des mesures directes de la composante muonique pour un sous ensemble

de gerbes d'énergie autour de quelques dizaines de PeV, et permettra la vérification des méthodes employées pour reconstruire cette composante à partir des informations délivrées par l'ensemble SSD et WCD. Une amélioration du FD est aussi envisagée, avec l'extension de son cycle de service d'environ 50%, en modifiant les conditions de fonctionnement permettant la collection de données en présence d'un bruit de fond lumineux nocturne plus important.

Les deux volets majeurs de l'amélioration du SD qui concernent directement les activités des collaborateurs français sont décrits dans les paragraphes suivants.

2.3.1 Les détecteurs à scintillation

Chaque détecteur à scintillation (Fig. 11) est constitué de deux modules de scintillateur. Chaque module comprend 24 barres de plastique extrudé de 1,60 m de long et de 5 cm × 1 cm de section. Une couche externe de TiO₂ assure la réflectivité. La lecture se fait par fibres optiques à décalage de longueur d'onde couplées optiquement à un unique photomultiplicateur (PM). Chaque barre est percée dans sa longueur de 2 trous dans lesquels sont insérées les fibres. Les fibres sont positionnées par des rainures guides faites dans le polystyrène à chaque extrémité, en forme de U, dans une configuration qui maximise le rendement de lumière avec l'utilisation d'un seul photomultiplicateur, qui reçoit donc la lumière transmise à leurs deux extrémités. L'ensemble est assemblé puis enfermé dans une boîte en aluminium, de structure particulière pour résister aux conditions environnementales difficiles rencontrées sur le site. La structure permettant de fixer un SSD sur chaque WCD est conçue pour permettre un déploiement aisé et rapide sur les 3000 km² du réseau.

Les barres de scintillateur sont produites au Fermi National Accelerator Laboratory (Chicago), les fibres sont produites par la société Kuraray, qui a fourni d'autres expériences utilisant ce type de détection. Du fait de la forme en U, les fibres vont être courbées, et le type de fibre a été choisi pour son diamètre de courbure limitant la diminution du rendement lumineux. Le choix du type de photomultiplicateur va se décider après analyse des données de l'Engineering Array, et la comparaison des performances des différentes configurations.

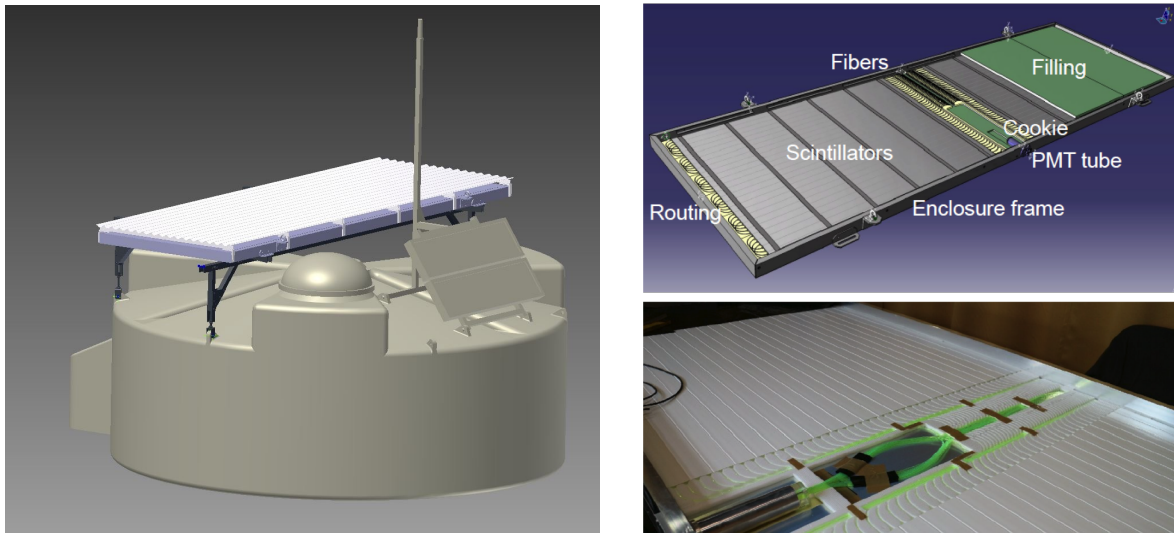


FIGURE 11 – À gauche : schéma d'un SSD fixé sur un WCD. À droite, en haut : schéma d'un module SSD complet. À droite, en bas : photo d'une partie du module.

2.3.2 La nouvelle électronique embarquée

L'adjonction de ces scintillateurs oblige à modifier l'électronique de contrôle et d'acquisition embarquée sur chaque cuve, ce qui donne l'occasion de la moderniser et d'accroître ses performances, avec l'objectif d'améliorer la qualité des données, et d'étendre la gamme dynamique.

Les signaux des photomultiplicateurs sont filtrés et échantillonnés à 120 MHz, contre 40 MHz avec l'électronique actuelle, et numérisés sur 12 bits (contre 10 bits actuellement). Pour les signaux des photomultiplicateurs des WCD, le même rapport de 32 est conservé entre la voie amplifiée pour les signaux

de faible amplitude (canal haut gain) et la voie non amplifiée (canal bas gain), adapté aux signaux les plus forts qui saturent la voie haut gain. Des détails sur la gamme dynamique sont donnés ci-dessous. La synchronisation des événements devient plus précise grâce à l'utilisation d'un nouveau récepteur GPS dont la précision, mesurée en laboratoire, est meilleure que 4 ns. Les nouveaux processeurs embarqués, grâce à des performances accrues, offre la possibilité d'augmenter les capacités de mise en place, de test et de fonctionnement de nouveaux algorithmes de trigger et du monitoring des données en local. Ainsi, un micro-contrôleur séparé et autonome comportant 64 canaux de mesures sert à gérer les données de monitoring. La partie processeur de la carte est basée sur une architecture construite autour d'un FPGA unique, de grande capacité, intégrant un processeur ARM double cœur, dix fois plus rapide que le système actuel. Le logiciel existant sur le système d'origine est porté sous Linux, incrémenté de nouvelles fonctionnalités (contrôle du fonctionnement, procédure d'étalonnage,...) et adapté aux nouvelles interfaces et nouveaux composants. L'extension de l'utilisation de la partie FPGA (Firmware) permet une simplification du software d'acquisition. Les divers sous-ensembles sont intégrés en une seule carte (Upgraded Unified Board, UUB), installée dans le boîtier blindé existant actuellement, la face avant seule étant modifiée pour inclure les connexions additionnelles [29].

Dans la configuration actuelle de l'électronique des WCD, la gamme dynamique s'étend sur 15 bits (1 FADC 10 bits connecté sur l'anode du photomultiplicateur, 1 FADC 10 bits connecté sur la dernière dynode, avec un rapport entre les deux voies de 32). Malgré tout, les signaux des WCD qui sont à moins de 200 m du cœur des gerbes d'énergie de 1 EeV sont saturés. Pour des gerbes de 100 EeV, la distance s'étend jusqu'à 500 m. Pour réduire le nombre d'événements pour lesquels les signaux des WCD proches du cœur sont saturés, en plus de l'augmentation de la dynamique apportée par la nouvelle acquisition, un photomultiplicateur avec une petite surface de collection est introduit dans chaque WCD (SPMT, pour small photomultiplier tube), qui permet d'étendre davantage la dynamique (Fig. 12).

Intent	Dynamic Range																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22				
VEM	AnodeX32																									
Showers							Anode																			
Cores																SPMT										

FIGURE 12 – Gamme dynamique permise par la nouvelle électronique et l'adjonction du SPMT.

2.4 Coûts et planning

Le tableau 1 présente les coûts de l'ensemble d'AugerPrime tels qu'ils ont été présentés, après mise à jour, au Finance Board de novembre 2016 (tableau plus détaillé présenté dans l'annexe 4.2). Dans plusieurs pays, les montants demandés ont été obtenus auprès des agences de financement, représentant au total 70% du budget nécessaire pour réaliser AugerPrime en couvrant la totalité de l'Observatoire.

	cout en M\$	cout en M€(*)
SSD	6,78	6,16
SDEU	3,90	3,55
PM "spare" pour WCD	0,40	0,36
Déploiement sur site	0,46	0,42
AMIGA	1,57	1,43
TOTAL	13,11	11,92

TABLE 1 – Coût d'AugerPrime (Finance Board de nov. 2016). [* 1€= 1.1 \$]

Le Preliminary Design Report a été publié en avril 2015. Le planning actualisé en avril 2016 (voir annexe 4.2) prévoit un début de production (SSD) mi 2017 et la fin de la construction et du déploiement sur le site d'AugerPrime fin 2019. Dans l'hypothèse de l'opération de l'Observatoire dans sa version améliorée de 2018 à 2024, soit 6 ans, le nombre d'événements attendus est présenté dans le tableau 2. Les deux réseaux SD-1500 et SD-750 (voir section 1) sont considérés séparément.

$\log_{10}(E/\text{eV})$	$dN/dt _{\text{SD-750}}$	$dN/dt _{\text{SD-1500}}$	$N _{\text{SD-750}}$	$N _{\text{SD-1500}}$
	[yr ⁻¹]	[yr ⁻¹]	[2019-2024]	[2019-2024]
17.5	11500	-	69000	-
18.0	900	-	5400	-
18.5	80	12000	480	72000
19.0	8	1500	50	9000
19.5	~1	100	6	600
19.8	-	9	-	54
20.0	-	~	-	~ 7

TABLE 2 – Taux annuels d’événements attendus pour différents seuils en énergie et nombre total pour une période de prise de données de 2019 à 2024 inclus, pour des gerbes d’angle zénithal $\theta < 60^\circ$. Les gerbes inclinées ($60^\circ < \theta < 80^\circ$) augmentent ces nombres de 30 % environ.

3 L’engagement de la France dans AugerPrime

Dès fin 2012, les laboratoires Français ont été moteurs dans la définition du projet AugerPrime. Mais avant même ce projet, des solutions ont été recherchées pour obtenir des observables liées à la composition des RCUHE avec un cycle de service approchant les 100%, en particulier la détection des ondes radio émises par les gerbes atmosphériques, pour caractériser leur composante électromagnétique. La détection des ondes radio présente plusieurs avantages : le signal est très peu atténué dans l’atmosphère ; le cycle de service est proche de 100% et le coût d’installation reste raisonnable. L’émission radio par les gerbes dans la gamme 30-80 MHz produite par effet géomagnétique, et dans une plus faible part par effet Askaryan, est de mieux en mieux comprise et caractérisée grâce à AERA. Cependant, ce type d’émission est très focalisé dans la direction de la gerbe, et ne permet pas à l’heure actuelle d’envisager la mesure de la composante électromagnétique des gerbes de haute énergie dans un but d’identification du RC primaire. Le LPNHE, l’IPNO et le LPSC ont obtenu un financement de l’ANR en 2012 (projet GIGAS) pour évaluer les potentialités de la détection de signaux GHz venant de l’émission de radiations produites lors de la diffusion quasi-élastique des électrons d’ionisation (plasma créé par le passage de la gerbe) par les molécules neutres de l’air (Molecular Bremsstrahlung Radiation). Ce type d’émission est isotrope et non polarisé, insensible au champ magnétique terrestre, et peut être assez similaire à la fluorescence. L’objectif était d’obtenir à partir d’une antenne associée à chaque WCD la fraction du signal due à la composante électromagnétique, et, par comparaison avec le signal total fourni par chaque détecteur, d’évaluer la composante muonique au sol. Mais les différentes études réalisées dans le cadre du projet GIGAS ont montré que le signal MBR est beaucoup trop faible pour être exploité [30].

3.1 Participation à la mise en oeuvre d’AugerPrime

3.1.1 Détecteurs de particules

Plusieurs projets ont été étudiés par différentes équipes au sein de la collaboration pour améliorer la sensibilité des détecteurs du SD aux différentes composantes de la gerbe. Il est important de mentionner celui porté par le LPNHE. Il s’agissait de segmenter les détecteurs Cherenkov pour avoir deux volumes de scintillation distincts, la partie inférieure étant plus sensible à la composante muonique de la gerbe qu’à la composante électromagnétique, celle-ci déposant son énergie dans la partie supérieure. Des prototypes ont été construits et installés début 2014, les données analysées, et les résultats ont mis en évidence les performances de tels détecteurs [31]. Cette proposition n’a néanmoins pas été choisie par la collaboration car elle impliquait la modification structurelle de chacune des cuves du SD, jugée trop délicate à mettre en oeuvre.

Concernant les scintillateurs, l’IPNO a testé plusieurs types de scintillateurs et fibres optiques, dont des fibres de la société Saint Gobain, et a développé une solution pour réaliser le couplage optique entre les fibres et le photomultiplicateur. Bien qu’ayant des performances équivalentes à une autre solution proposée par les ingénieurs de l’Institut Technologique de Karlsruhe (KIT), elle n’a pas été retenue.

3.1.2 Implication dans le renouvellement de l’électronique

L’IPNO et le LPSC se sont positionnés dès le début pour participer à la conception et au développement de la nouvelle électronique, occupant ainsi une première place dans l’organisation de cette activité. Lors

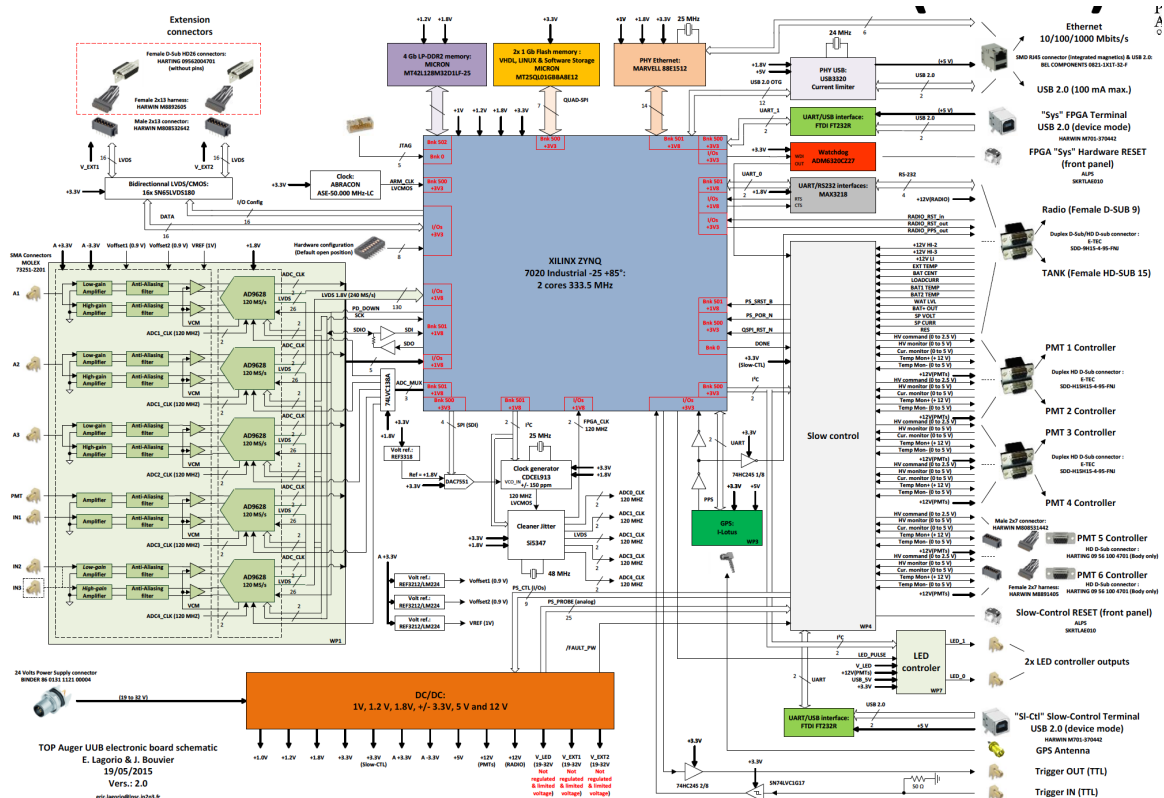


FIGURE 13 – Block diagramme de la carte UUB.

de la construction de l’Observatoire, la France était responsable de l’électronique d’acquisition du SD, les principaux laboratoires impliqués étant alors l’IPNO et le Collège de France. L’IPNO a gardé la responsabilité de l’électronique du détecteur de surface. Le management du projet de développement de la nouvelle électronique d’acquisition (projet SDEU, Surface Detector Electronic Upgrade) a donc naturellement été pris en charge par l’IPNO, et le LPSC a mis l’expérience et les compétences de ses services Electronique et Détecteurs et Instrumentation au service de ce projet. Un plan de développement avec une répartition des tâches en 10 work packages (WP) entre les 17 instituts de la collaboration impliqués dans le projet SDEU a été mis en place. L’élément clé en est la réalisation de la nouvelle carte électronique unifiée (UUB) : le LPSC a pris en charge le design de l’UUB (Fig. 13), en intégrant les sous ensembles développés par les autres partenaires. Une équipe USA/Italie/France s’est mise en place et a développé la partie software et firmware. Un premier ensemble de 6 cartes électroniques a été conçu et testé au LPSC, suivies de 20 autres, qui ont également été testées au LPSC. L’IPNO a aussi participé à la conception des SPMT en réalisant le design de leurs bases.

3.1.3 Tests sur site des prototypes

L’“Engineering Array” (EA) est un hexagone au sein du SD utilisé pour tester l’installation des détecteurs, leur fonctionnement et leur intégration dans le système de communication ainsi que dans le système d’acquisition de l’Observatoire. Les données de l’EA vont permettre d’évaluer les performances des nouveaux systèmes. Les SPMT ont été installés en mai et partiellement testés avec l’électronique actuelle. En septembre 2016, 12 détecteurs SSD assemblés au KIT ont été installés à l’Observatoire, 11 au sein du réseau et 1 à l’extérieur du hall d’assemblage du Campus de Malargüe. Leur déploiement a été rapide et efficace et a validé les procédures d’installation prévues. Des senseurs de température et d’humidité permettent de mesurer les conditions environnementales auxquelles sont soumis les détecteurs durant cette phase de tests. Une douzaine de cartes électroniques prototypes ont été installées fin septembre sur l’EA par des équipes françaises, italiennes et allemandes. Ainsi la lecture des signaux des 3 PM du WCD, du SPMT et du PM recueillant la lumière des fibres du SSD a été réalisée. Une première version du software d’acquisition a permis l’enregistrement des événements dès octobre.

Les premiers résultats ont montré que, pour l’essentiel, la structure des SSD est prête pour la phase de construction. Il reste à choisir le type de photodétecteur (PM classique, PM avec une base active ou SiPM) qui sera utilisé. Ce choix devrait se faire en mars lors du Critical Design Review. Les données montrent également que la nouvelle électronique d’acquisition fonctionne, mais qu’il est nécessaire de procéder à des modifications pour réduire le bruit en sortie des ADC, et un “undershoot” observé dans les traces des FADC après des signaux intenses et la consommation. L’optimisation du niveau de bruit ainsi que de la consommation tout comme la réduction de l’undershoot seront faites pour la prochaine série de cartes UUB qui sera validée avant la pré-production vers la fin de 2017.

La figure 14 montre les distributions de charge mesurées pour les muons dans un couple WCD–SSD. Bien que le niveau de bruit soit élevé, on identifie clairement d’une part le pic large qui correspond au dépôt d’énergie des muons dans le WCD, permettant l’étalonnage en VEM (Vertical Equivalent Muon, utilisé comme référence pour quantifier le signal reçu par chacun des 1660 WCD) et d’autre part, celui qui correspond au dépôt d’énergie par les particules au minimum d’ionisation indispensable pour réaliser l’étalonnage des scintillateurs. L’exploitation des données de l’EA est cruciale pour mettre en place les procédures de calibration, et les conditions de trigger qui s’appuieront sur des analyses comparées des données entre les WCDs actuels et ceux modifiés. En parallèle, on continuera à travailler sur le firmware/software embarqué pour arriver à un fonctionnement optimal. Il est à noter que la prise de données de l’Observatoire pourra continuer pendant la phase de l’installation d’AugerPrime car il est prévu que la nouvelle électronique pourra fonctionner en parallèle avec l’ancienne sans perturber la prise de données ou l’acceptance du réseau de surface

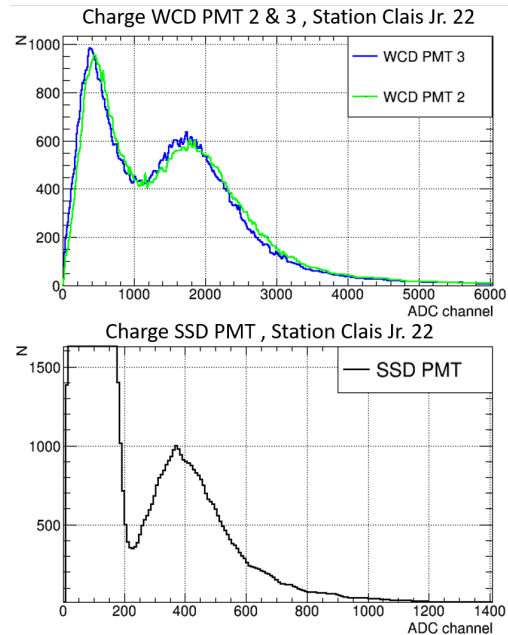


FIGURE 14 – Distributions de charge mesurées dans un WCD (haut) et dans le SSD installé au-dessus (bas).

3.1.4 Implication des IT des laboratoires IN2P3

Comme mentionné dans les paragraphes précédents, les travaux réalisés pour AugerPrime n’auraient pu se faire sans la forte implication de plusieurs services techniques des laboratoires IN2P3. Le tableau 3 présente les ETP des personnels IT de ces laboratoires pour les années 2012–2016 (données base ISIS). Un tableau plus détaillé et nominatif est fourni en annexe (voir 4.1).

Laboratoire	catégorie	2012	2013	2014	2015	2016
LPSC	IR	0,20	0,70	0,75	0,80	0,60
	AI	0,15	0,45	0,70	0,50	0,55
	T	0	0	0,20	0,30	0,05
LPNHE	IR	0	0,10	0,10	0	0
IPNO	IR	0	0	0	0,10	0,15
	AI	0	0	0	0,20	0,10
	T	0	0	0	0	0,10

TABLE 3 – IT impliqués dans les activités liées à AugerPrime entre 2012 et 2016 : ETP par laboratoire, par catégorie et par année.

3.1.5 Responsabilités dans le projet

À la fin de 2014 la collaboration a mis en place une “Task Force” dont la charge était la préparation du Preliminary Design Report. Un membre de l’IPNO était l’un des trois coordinateurs des groupes de travail faisant partie de cette “Task Force”. Depuis mi 2016, un membre (IR) du groupe Auger du LPSC est “Project manager Deputy” de l’Observatoire, en particulier en charge de la coordination et du suivi des moyens de financement et des contributions à AugerPrime des instituts membres de la collaboration.

3.2 Programme des activités de recherche des équipes IN2P3

Les laboratoires de l’IN2P3 membres de la collaboration Auger seront au nombre de 3 en 2017 : IPNO, LPSC, LPNHE. Le tableau 4 indique le nombre de chercheurs permanents, CDD et doctorants membres de la collaboration Auger en France en 2017 (voir liste nominative en annexe 4.1).

Laboratoire	Permanents	CDD	Doctorants
IPNO	5	0	3 ^(a)
LPNHE	1	1 ^(b)	0
LPSC	2	1	1 ^(c)

TABLE 4 – Effectifs Auger France - (a) : dont 1 doctorant en partie sur CTA, 1 doctorant en co-tutelle avec PSU, USA (bourse Chateaubriand) – (b) : contrat ANR GIGAS – (c) : demande de 1/2 bourse en cours.

La diversité des expériences et expertises des différents groupes français sur le SD, de la construction au “commissioning”, en passant par l’étalonnage, les niveaux de déclenchement, la sélection et la reconstruction des événements, jusqu’aux analyses de physique les conduira naturellement à s’impliquer sur ces différents aspects expérimentaux. Les contributions plus spécifiques envisagées sont développées ci-dessous.

3.2.1 Construction d’AugerPrime

Le LPSC a prévu de participer à l’assemblage et le test de 150 modules SSD sur deux ans. Cela implique l’organisation de l’approvisionnement des matériaux nécessaires au montage des modules, la mise en place des moyens adaptés pour leur assemblage et leur stockage, la réalisation d’un banc de test et de validation. Après l’assemblage, les tests auront pour but de vérifier :

- l’étanchéité à la lumière visible du détecteur,
- l’efficacité de la collection de lumière par les fibres optiques en utilisant le stimulus produit par le rayonnement cosmique sur les barres de scintillateurs en mesurant le niveau du taux de comptage,
- le niveau de gain, la linéarité et le niveau de bruit intrinsèque du photomultiplicateur,
- la fiabilité du dispositif de détection à long terme.

Un système qualité de traçabilité des composants constitutifs et des résultats des tests effectués sur les différentes parties des modules assemblés sera développé. L’expédition du matériel sur site est prise en charge par le KIT.

Concernant la nouvelle électronique, il est prévu de participer à la mise en place et au suivi de la production, ainsi qu’à la définition des procédures de tests. En fonction de l’organisation, il n’est pas exclu que les laboratoires français participent aux tests fonctionnels des cartes. D’autre part, la participation au développement du software va se renforcer.

Pour mener à bien ces activités de construction, la participation de personnels IT est nécessaire, et le tableau 5 présente les estimations des besoins en ETP sur la période 2017–2019 (voir détails en annexe 4.1).

3.2.2 Opération

Les objectifs d’AugerFrance concernent d’une part l’opération des WCDs avec leur nouvelle électronique et d’autre part celle des SSDs. La nouvelle électronique, caractérisée par des FADC plus rapides et l’augmentation de la gamme dynamique, nécessite la mise à niveau de l’étalonnage des WCDs avec

Laboratoire	grade	2017	2018	2019
LPSC	IR	0,5	0,3	0,3
	IE	0,5	0,5	0,05
	AI	1,1	0,9	0,05
	T	0,5	0,5	0
IPNO	IR	0,3	0,3	0,3
	AI	0,1	0,1	0,1

TABLE 5 – Prévisions ETP IT pour Auger Prime de 2017 à 2019.

les nouvelles valeurs du VEM (Vertical Equivalent Muon). Les performances des nouvelles cartes électroniques vont permettre d’augmenter le volume et la qualité du traitement des signaux de bas seuil localement dans les cuves, et ainsi notamment de développer des procédures d’étalonnage complémentaires, en exploitant le spectre des électrons de Michel émis lors de la décroissance des muons. Concernant ces activités, les groupes français possèdent l’expertise nécessaire et ils seront les garants de la continuité des méthodes utilisées et d’une phase de transition optimisée.

La nouvelle électronique permet une révision de la logique des triggers, que ce soit au niveau local de chaque détecteur ou pour l’ensemble du réseau. L’augmentation de la quantité de données à transférer des stations au CDAS, due aux nouvelles composantes, nécessite une optimisation astucieuse du trigger local. Pour cela, forts de leur expérience dans la conception des différents niveaux de trigger, les groupes français vont s’attacher à diminuer le bruit de fond physique dû aux muons isolés en exploitant les 10 ans de données existantes, ainsi qu’en étudiant le bruit de fond des traces des cuves avec la nouvelle électronique. Les compétences françaises en terme de trigger pourront aussi être exploitées pour la conception d’un trigger par le SSD. Actuellement, l’acquisition des SSD est effectuée uniquement en esclave des WCDs. Or les scintillateurs étant essentiellement sensibles aux particules électromagnétiques des gerbes, en leur appliquant un seuil bas, on réduirait le bruit de fond lié aux muons isolés, ce qui permettrait de diminuer le seuil en énergie pour le réseau de surface. On pourrait ainsi aussi améliorer les seuils de détection des photons et neutrinos, qui sont des problématiques chères à nos équipes. Pour finir les chercheurs français vont naturellement s’investir dans le commissioning et le monitoring des nouveaux détecteurs, dans la continuité de leur travail effectué depuis 15 ans sur le SD. Ce travail de fond est fondamental pour garantir la stabilité et la qualité des données qui sont absolument nécessaires pour les mesures à long terme, et plus particulièrement les mesures d’anisotropies très exigeantes.

3.2.3 Sélection des événements et reconstruction

Les équipes françaises ont largement contribué à la définition de la chaîne de sélection des événements SD ainsi que de leur reconstruction, et sont actuellement toujours responsables d’un des deux codes de reconstruction officiels utilisés par la collaboration. Elles vont naturellement garder ces responsabilités. Les codes de sélection et reconstruction devront être adaptés à la nouvelle électronique et aux nouveaux détecteurs. Le but est double, le premier étant de réajuster la sélection des événements avec scintillateurs pour prendre en compte leur acceptance, notamment en terme d’angle solide. D’autre part, la logique de reconstruction sera toujours basée sur la distribution latérale des particules, reconstruite à partir des temps d’arrivée des particules dans les scintillateurs et de l’amplitude des signaux générés. Toutefois, sa forme, différente de celle obtenue par le SD, car essentiellement dominée par la composante électromagnétique, nécessitera des études spécifiques. Il faudra définir un estimateur d’énergie “électromagnétique” et l’étalonner en utilisant l’énergie reconstruite à partir des données du FD. Cette étude des paramètres des gerbes réalisée avec des scintillateurs est d’autant plus intéressante dans le contexte des groupes de travail commun avec l’expérience TA qui est basée sur des scintillateurs similaires. Les équipes françaises, impliquées dans les études de reconstruction, sans parler des tâches d’analyse, ont joué et joueront dans le futur un rôle fondamental dans ces groupes de travail commun. D’autre part, forts de leurs compétences sur la reconstruction des données des WCD et des SSD, les chercheurs français visent à combiner les signaux des différents détecteurs complémentaires pour effectuer des études multi-paramètres basées sur le concept de l’universalité. L’intensité des signaux ainsi que leur structure en temps, définie de façon plus précise grâce à la nouvelle électronique, permettra de déduire la mesure de la profondeur de développement des gerbes ainsi que leur contenu en muons.

3.2.4 Analyses de physique

Les objectifs de physique des chercheurs français seront logiquement centrés (et se développeront) sur ceux qui ont motivé leur activité de recherche depuis les dernières 10 années. Ils vont continuer d'étudier la distribution des directions d'arrivée, avec des objectifs dans plusieurs directions. D'une part, aux plus hautes énergies, il sera important de poursuivre la recherche des sources d'ultra haute énergie. Comme cela a été montré plus haut, les tests d'anisotropie, effectués avec 600 événements d'énergie $E > 40$ EeV collectés les 10 dernières années, n'ont pas donné de signaux statistiquement significatifs d'anisotropie, ni d'association avec des sources astrophysiques particulières. Pourtant, deux excès intéressants (à ≈ 3 sigma) ont été observés à relativement grande échelle, en direction de Cen A, la radio-galaxie la plus proche de la terre, et d'AGN lumineux distants de ≈ 130 Mpc. L'approche de l'universalité va permettre d'avoir un estimateur de masse pour chaque événement, ce qui permettra de sélectionner un lot de données "légères", c'est à dire celles qui sont potentiellement les moins déviées de leur source. L'objectif est de continuer à suivre ces deux excès avec les données sélectionnées avec les futures données. Par ailleurs, les excès récemment mis en évidence par les groupes français à l'aide d'analyses couvrant la totalité du ciel vont être particulièrement scrutés dans le futur. Ces analyses, qui pour la première fois capturent des excès à des échelles compatibles avec les déflexions attendues pour des charges électriques de noyaux CNO en accord avec les mesures X_{\max} , pourraient constituer la voie la plus directe pour tracer les sources de RCUHE. De même, il est prévu d'appliquer une sélection statistique sur la masse dans les études d'anisotropie à grande échelle au delà de 10 EeV, où un signal clair d'anisotropie à grande échelle a été observé. L'étude des anisotropies pour différents groupes de masse pourrait dévoiler l'origine de la structure dipolaire observée, et ainsi nous renseigner sur la propagation des noyaux dans les champs magnétiques. D'autre part, également pour les recherches d'anisotropies à grande échelle, les objectifs des chercheurs français sont tournés vers les plus basses énergies accessibles grâce au réseau SD-750m. Celui-ci sera non seulement équipé de scintillateurs, mais aussi de détecteurs de muons enterrés. Cet ensemble permettra d'effectuer des mesures de composition jusque dans les zones du second genou et de la cheville. Comme cela a été montré précédemment, il n'a pas été observé d'anisotropies d'amplitude significative entre le second genou et la cheville, alors qu'un changement de direction de la phase a été observé dans la même gamme en énergie. Ces observations pourraient être reliées à la nature mixte et l'évolution de la composition des rayons cosmiques. On s'attendrait à ce que différents groupes de masse ne se comportent pas de façon similaire en terme d'anisotropies, en raison de leur charge, ou (et) de leur origine. De plus, cette gamme en énergie est celle où on attend une transition de l'origine galactique vers extra-galactique, raison pour laquelle les groupes français sont particulièrement attachés aux études d'anisotropies à grande échelle enrichies des mesures de composition.

Les chercheurs des laboratoires IN2P3 vont poursuivre leur activité concernant le spectre des RCUHE, sur toute la gamme d'énergie accessible, et en exploitant de façon optimale les observables rendues disponibles par l'adjonction des nouveaux détecteurs. En particulier, la possibilité d'établir des spectres pour différentes composantes de l'intensité, suivant des groupes de masse des noyaux, sera étudiée.

Si une composante, possiblement minoritaire, de protons existe au delà de 50 EeV et qu'ils interagissent avec le CMB, des pions chargés ou neutres sont produits : $p + \gamma_{CMB} \rightarrow p + \pi^0, n + \pi^+$. La désintégration des pions chargés produit des neutrinos et celle des neutres des photons d'énergie autour de quelques EeV. Ces neutrinos et ces photons sont dits cosmogéniques. La recherche de photons cosmogéniques dans l'intensité des RCUHE est utile pour mieux comprendre l'origine de la suppression à haute énergie. La preuve de la présence de tels photons signerait d'une part la présence de protons aux énergies extrêmes et d'autre part l'effet GZK.

Les améliorations du système de détection vont permettre de mieux séparer les composantes électromagnétiques des composantes muoniques de la gerbe. Actuellement, la recherche des photons amène à sélectionner quelques événements indiscernables. Grâce à une meilleure identification des composantes des gerbes atmosphériques, et des contraintes supplémentaires apportées en particulier sur le nombre de muons en appliquant la méthode d'universalité, le nombre d'événements de bruit de fond d'origine hadronique pourra être réduit, permettant d'identifier clairement des éventuels événements photons. Si on ne détecte pas de photons UHE dans les données d'Auger, des limites plus contraignantes sur l'intensité de photons cosmogéniques seront obtenues, et cela permettra de déduire des limites sur la fraction de protons aux plus hautes énergies. Dans tous les cas, les résultats de la recherche de photons apporteront des indications directes sur la nature de la décroissance mesurée dans le spectre.

3.3 Demande de soutien

Lorsque le Finance Board d'Auger a donné son accord pour le projet AugerPrime, la répartition des coûts s'est faite en considérant la liste de 2014 sur laquelle se base le partage des "Operating Costs" (OCL, Operating Cost List, correspondant à la liste des permanents et des post doctorants) : la part de la contribution française représentait alors 6,46%. Mais ces deux dernières années, le nombre de collaborateurs IN2P3 émargeant à l'OCL a diminué, et en 2016 la France représente 5,4% des effectifs de l'OCL. Cependant, la proposition de l'IN2P3 de participer à la construction à hauteur de 300 k€ a été entendue par le Finance Board.

La demande de soutien financier est de 300 k€ sur 3 ans, qui seraient répartis ainsi :

UUB : approvisionnement de composants	: 147 k€
UUB : fabrication de cartes	: 39 k€
SSD : éléments de structure	: 84 k€
Missions techniques	: 30 k€

Hormis ce budget requis pour contribuer à la construction d'AugerPrime, les équipes ont besoin du soutien annuel indispensable pour participer au fonctionnement de l'Observatoire et pour les missions de travail nécessaires à leurs activités de recherche et à leurs responsabilités dans la collaboration.

L'Observatoire Pierre Auger a permis des avancées notables dans la connaissance des rayons cosmiques d'ultra haute énergie, tout en suscitant de nouvelles questions concernant leur origine et leur nature. Le projet AugerPrime permettra d'apporter des réponses à ces questions de physique fondamentales, en exploitant au maximum le potentiel de cet instrument unique et remarquable qu'est l'Observatoire. Les chercheurs, techniciens et ingénieurs de l'IN2P3 ont toujours été et sont toujours très actifs, sur tous les fronts, au sein de la collaboration Auger, grâce non seulement à leur travail déterminé et à leur expertise reconnue, mais aussi au soutien constant et aux investissements de l'IN2P3. Il semble donc particulièrement important de permettre aux équipes IN2P3 de poursuivre leur activité de recherche dans cette thématique. AugerPrime constituera probablement l'unique opportunité se présentant à la communauté scientifique de comprendre l'origine et la nature des rayons cosmiques d'ultra haute énergie.

Références

- [1] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1966) 748; G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min, JETP Lett. 4 (1966) 78 [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 4 (1966) 114]
- [2] The Pierre Auger Collaboration, Nucl. Instrum. Meth. A 798 (2015) 172
- [3] V. Verzi for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 33rd ICRC, arXiv :1307.5059 (2013)
- [4] P. Abreu et al., The Pierre Auger Collaboration, JINST 7 P10011 (2012)
- [5] P. Sommers for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 29th ICRC, Pune (2005) 00, 101-106
- [6] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Lett. B685, 239 (2010);
I. Valiño for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS ICRC2015 (2016) 271;
The Pierre Auger Collaboration, JCAP 08 (2015) 049.
- [7] A. Porcelli for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS ICRC2015 (2016) 420
- [8] T. Pierog, I. Karpenko, J. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, Phys. Rev. C92, 034906 (2015).
- [9] S. Ostapchenko, Phys. Rev. D83 (2011) 014018.

- [10] E.-J. Ahn, R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D80, 094003 (2009).
- [11] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D90 12, 122006 (2014).
- [12] A. Yushkov for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS ICRC2015 (2016) 335.
- [13] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 91, 032003 (2015).
- [14] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D90, 012012 (2014), Phys. Rev. D90, 039904(E) (2014), Phys. Rev. D92, 019903(E) (2015)
- [15] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. Lett. 117, 192001 (2016)
- [16] Sergey Ostapchenko, Marcus Bleicher, Phys. Rev. D93, 051501(2016)
- [17] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. Lett. 100, 211101 (2008)
- [18] The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 91, 092008 (2015)
- [19] C. Bleve for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS ICRC2015 (2016) 1103
The Pierre Auger Collaboration, submitted to JCAP, arXiv :1612.01517.
- [20] The Pierre Auger Collaboration, Astropart. Phys. 34, 627 (2011);
The Pierre Auger Collaboration, Astrophys. J. Suppl. 203, 34 (2012);
The Pierre Auger Collaboration, Astrophys. J. 762, L13 (2012);
The Pierre Auger Collaboration, Astrophys. J 802, 111 (2015);
I. Al Samarai for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS ICRC2015 (2016) 372
- [21] The Pierre Auger and Telescope Array Collaborations, Astrophys. J 794, 172 (2014);
O. Deligny for the Pierre Auger and Telescope Array Collaborations, Proc. of 34th ICRC, PoS ICRC2015 (2016) 395
- [22] The Pierre Auger Collaboration, Astrophys. J 804, 15 (2015)
- [23] R. de Almeida, J. de Mello Neto, O. Deligny, U. Giaccari, M. Mostafa, Auger internal note GAP 2016-071
- [24] J. Biteau, O. Deligny, Auger internal note GAP 2017 à paraître
- [25] The IceCube, Pierre Auger and Telescope Array collaborations, JCAP 01 (2016) 037, arXiv :1511.09408.
- [26] The Pierre Auger Collaboration : The Pierre Auger Observatory Upgrade “AugerPrime”, Preliminary Design Report, Apr 2015, arXiv :1604.03637
R. Engel for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS (ICRC 2015)686
- [27] A. di Matteo for the Pierre Auger Collaboration, Proc. of 34th ICRC, PoS (ICRC 2015) 249 .
- [28] R. Aloisio et al., SimProp : a Simulation Code for Ultra High Energy Cosmic Ray Propagation, JCAP 1210 (2012) 007
- [29] E. Lagorio for the Pierre Auger Collaboration, to be submitted to the Proceedings of the 2016 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference
- [30] Imen Al Samarai et al. Phys. Rev. D 93, 052004 (2016)
I. Al Samarai for the Pierre Auger Collaboration, Proceedings of the 6th International Conference ARENA, June 2014, Annapolis, USA
- [31] Antoine Letessier-Selvon, Pierre Billoir, Miguel Blanco, Ioana C. Maris, Mariangela Settimo , Nucl. Instr. Meth. A 767 (2014) 41 ?49

4 Annexes

4.1 Equipes IN2P3 engagées dans le projet AugerPrime

• Liste des chercheurs d'Auger France, 2017

Permanents

- Bérat Corinne, Ch, LPSC
- Biteau Jonathan , E-Ch, IPNO
- Deligny Olivier, Ch, IPNO
- Ghia Piera Luisa, Ch, IPNO
- Letessier-Selvon Antoine, Ch, LPNHE
- Lhenry-Yvon Isabelle, Ch, IPNO
- Montanet François, E-Ch, LPSC
- Suomijarvi Tiina, E-Ch, IPNO

Doctorants et Post Doctorants

- Coleman Alan, doctorant (Bourse Chateaubriand), IPNO et PSU, USA
- Gaïor Romain, Post-Doc, LPNHE
- Luce Quentin, Doctorant, IPNO
- Stolpovskiy Mikhail, Post-Doc, LPSC
- Zong Zizhao, Doctorant, IPNO

• Personnels IT participant aux activités de construction d'AugerPrime

Le tableau 6 donne les ETP en pourcentages des personnels IT de l'IN2P3 ayant participé à AugerPrime pour les années 2012–2016 (données base ISIS)

Laboratoire	Nom	catégorie	type d'activité	2012	2013	2014	2015	2016
LPSC	Bouvier Joel	IR	Electronique	5	50	50	50	30
	Girard Jean Pierre	T	Electronique	0	0	20	30	5
	Lagorio Eric	AI	Electronique	15	45	50	50	50
	Ponchant Nicolas	AI	Electronique	0	0	20	0	5
	Stassi Patrick	IR	Ingé. système, Management	15	20	25	30	30
LPNHE	Lebollo Hervé	IR	Electronique	0	10	10	0	0
IPNO	Hull Giulia	IR	Optique	0	0	0	10	15
	Nguyen Trung Thi	AI	Détecteurs	0	0	0	20	10
	Imre Miktat	T	Optique	0	0	0	0	10

TABLE 6 – IT impliqués dans des activités liées à AugerPrime : ETP (pourcentage) par année.

Laboratoire	Nom	grade	type d'activité	2017	2018	2019
LPSC	Bouvier joel	IR	Electronique	20	0	0
	Chala Mohammed	T	Détecteurs	50	50	0
	Heusch Muriel	IE	Détecteurs	50	50	5
	Lagorio Eric	AI	Electronique	60	40	5
	Stassi Patrick	IR	Ingé. système, Management	30	30	30
	(nouvel agent)	AI	Détecteurs	50	50	0
IPNO	Yann Auber	IR	Software embarqué	30	30	30
	Nguyen Trung Thi	AI	Détecteurs			

TABLE 7 – Prévisions ETP IT pour Auger Prime de 2017 à 2019.

4.2 Coûts et planning de construction d'AugerPrime

	cout en M\$	cout en M€(*)
SSD	6,78	6,16
Scintillateurs	2,18	1,98
Fibres	1,04	0,95
Mécanique	1,75	1,59
PM (baseline)	1,18	1,07
expédition	0,63	0,57
SDEU	3,90	3,55
UUB	2,90	2,64
SPMT	0,98	0,89
expédition	0,02	0,018
PM "spare" pour WCD	0,40	0,36
Déploiement sur site	0,46	0,42
AMIGA	1,57	1,43
TOTAL	13,11	11,92

TABLE 8 – Coût d'AugerPrime (Finance Board de nov. 2016). [* 1€= 1.1 \$]

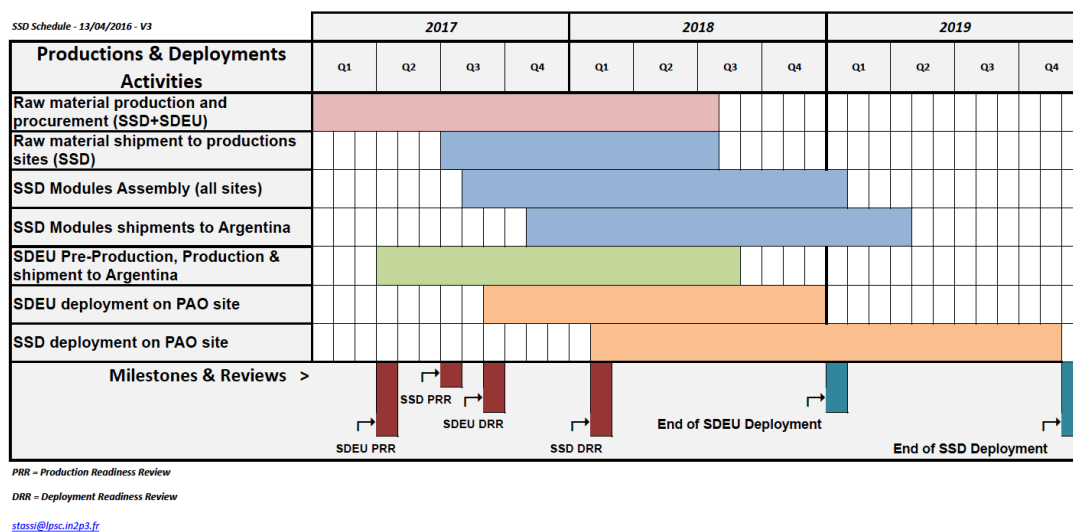


FIGURE 15 – Planning tel qu'envisagé en avril 2016.

4.3 Performances de l'Observatoire Pierre Auger

Des informations illustrant les performances actuelles de l'Observatoire Pierre Auger sont résumées dans le tableau 4.3 [2]. Elles concernent le taux d'événements enregistrés par les détecteurs, les résolutions obtenues sur plusieurs observables reconstruites.

SD	
SD Annual Exposure	$\sim 5500 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$
T3 rate	0.1 Hz
T5 events/yr, $E > 3 \text{ EeV}$	$\sim 14,500$
T5 events/yr, $E > 10 \text{ EeV}$	~ 1500
Reconstruction accuracy (S_{1000})	22 % (low E) to 12 % (high E)
Angular resolution	1.6° (3 stations) 0.9° (>5 stations)
Energy resolution	16 % (low E) to 12 % (high E)
FD	
On-time	$\sim 15 \%$
Rate per building	0.012 Hz
Rate per HEAT	0.026 Hz
Hybrid	
Core resolution	50 m
Angular resolution	0.6°
Energy resolution (FD)	8 %
X_{max} resolution	$< 20 \text{ g/cm}^2$

TABLE 9 – Key performance parameters for the Auger Observatory.

4.4 Liste des publications produites avec une forte participation des chercheurs IN2P3

Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory

Abraham J. et al. [Pierre Auger Collaboration]

Nucl. Instr. Meth. A **523** (2004) 50–95

Anisotropy studies around the galactic centre at EeV energies with the Auger Observatory

Abraham J. et al. [Pierre Auger Collaboration]

Astroparticle Physics **27**, (2007) 244-253.

Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Science **318**, 938 (2007).

Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Astropart. Phys. **29** (2008) 188 [Erratum-ibid. **30** (2008) 45].

An upper limit to the photon fraction in cosmic rays above 10^{19} eV from the Pierre Auger Observatory

Abraham J. et al. [Pierre Auger Collaboration]

Astropart. Phys. **27**, (2007) 155-168.

Upper limit on the diffuse flux of ultrahigh energy tau neutrinos from the Pierre Auger Observatory

D. Allard *et al.* [The Pierre Auger Collaboration]

Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 211101.

Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 061101.

Limit on the diffuse flux of ultra-high energy tau neutrinos with the surface detector of the Pierre Auger Observatory

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Phys. Rev. D **79** (2009) 102001.

Atmospheric effects on extensive air showers observed with the Surface Detector of the Pierre Auger Observatory

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Astropart. Phys. **32** (2009) 89-99 [Erratum-ibid. *Astropart. Phys.* **33** (2010) 65-67].

Trigger and Aperture of the Surface Detector Array of the Pierre Auger Observatory

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Nucl. Instr. Meth. A **613** (2010) 29-39.

Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory

J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Phys. Lett. B **685** (2010) 239.

Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Astropart. Phys. **34** (2010) 314-326.

Search for First Harmonic Modulation in the Right Ascension Distribution of Cosmic Rays Detected at the Pierre Auger Observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Astropart. Phys. **34** (2011) 627-639.

Anisotropy and chemical composition of ultra-high energy cosmic rays using arrival directions measured by the Pierre Auger Observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **06** (2011) 022.

The Lateral Trigger Probability function for the Ultra-High Energy Cosmic Ray Showers detected by the Pierre Auger Observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Astropart. Phys. **35** (2011) 266-276.

The effect of the geomagnetic field on cosmic ray energy estimates and large scale anisotropy searches on data from the Pierre Auger Observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **11** (2011) 022.

Search for ultrahigh energy neutrinos in highly inclined events at the Pierre Auger Observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Phys. Rev. D **84**, (2011) 122005.

Search for Point-like Sources of Ultra-high Energy Neutrinos at the Pierre Auger Observatory and Improved Limit on the Diffuse Flux of Tau Neutrinos

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Astrophysical Journal Letters **755**, (2012) L4.

Results of a self-triggered prototype system at the Pierre Auger Observatory for radio-detection of air showers induced by cosmic rays

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Journal of Instrumentation **7** (2012) P11023.

Large scale distribution of arrival directions of cosmic rays detected above 10^{18} eV at the Pierre Auger observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Astrophysical Journal Supplement **203** (2012) 34.

Constraints on the origin of cosmic rays above 10^{18} eV from large scale anisotropy searches in data of the Pierre Auger observatory

P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Astrophysical Journal Letters **762** (2013) L13.

Origin of atmospheric aerosols at the Pierre Auger Observatory using studies of air mass trajectories in South America

A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Atmospheric Research **149** (2014) 120-135.

Searches for Large-Scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above 10^{19} eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array

The Pierre Auger and Telescope Array Collaborations
The Astrophysical Journal **794** (2014) 172.

Searches for Anisotropies in the Arrival Directions of the Highest Energy Cosmic Rays Detected by the Pierre Auger Observatory

A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
The Astrophysical Journal **804** (2015) 15.

An improved limit to the diffuse flux of ultra-high energy neutrinos from the Pierre Auger Observatory

A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Phys. Rev. D **91**, (2015) 092008.

The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory

A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Nucl. Instr. Meth. A **798** (2015) 172-213.

Search for correlations between the arrival directions of IceCube neutrino events and ultrahigh-energy cosmic rays detected by the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array

M. G. Aartsen, K. Abraham *et al.* The Pierre Auger Collaboration, Telescope Array Collaboration, IceCube Collaboration
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **01** (2016) 037.

Azimuthal asymmetry in the risetime of the surface detector signals of the Pierre Auger Observatory
A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
Phys. Rev. D **93**, (2016) 072006

A paraitre

Ultrahigh energy neutrino follow-up of Gravitational Wave events GW150914 and GW151226 with the Pierre Auger Observatory
A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration] accepted for publication in *Phys. Rev. D*

A targeted search for point sources of EeV photons with the Pierre Auger Observatory
A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
soumis à The Astrophysical Journal Letters

Search for photons above 10^{18} eV with the hybrid detector of the Pierre Auger Observatory
A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
soumis à JCAP

Impact of atmospheric effects on the energy reconstruction of air showers observed by the surface detectors of the Pierre Auger Observatory
A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
soumis à JINST

Multi-resolution anisotropy studies of ultra-high energy cosmic rays detected at the Pierre Auger Observatory
A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]
soumis à JCAP