



## La revue pour l'histoire du CNRS

12 | 2005

Les grands équipements scientifiques du CNRS

---

# Histoire d'un projet singulier : l'observatoire Pierre Auger

Murat Boratav

---



### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/1294>

DOI : 10.4000/histoire-cnrs.1294

ISSN : 1955-2408

### Éditeur

CNRS Éditions

### Édition imprimée

Date de publication : 3 mai 2005

ISBN : 978-2-271-06250-5

ISSN : 1298-9800

### Référence électronique

Murat Boratav, « Histoire d'un projet singulier : l'observatoire Pierre Auger », *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 12 | 2005, mis en ligne le 03 mai 2007, consulté le 26 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/1294> ; DOI : 10.4000/histoire-cnrs.1294

---

Ce document a été généré automatiquement le 26 avril 2019.

Comité pour l'histoire du CNRS

---

# Histoire d'un projet singulier : l'observatoire Pierre Auger

Murat Boratav

---

- 1 Environ trois cents chercheurs et ingénieurs sont mobilisés, depuis une dizaine d'années, autour d'un projet de détecteur qui, une fois construit, opérera pendant quinze ou vingt ans. Ce projet, que le CNRS classe dans la catégorie « grands équipements », est conçu pour répondre à une série de questions considérées comme parmi les plus importantes de l'astrophysique moderne. Il s'agit d'une énigme vieille de plus de quarante ans, celle des rayons cosmiques d'énergies ultimes. L'usage d'un mot superlatif tel que « ultime » pourrait paraître peu scientifique, mais s'agissant de particules produites par certains phénomènes astrophysiques donc naturels, généralement violents, le spectre d'énergie des rayons cosmiques doit effectivement avoir une limite supérieure. Nous allons expliquer dans la suite que la partie extrême de ce spectre soulève des questions auxquelles nous n'avons toujours pas pu apporter de réponses claires. Dans l'histoire des sciences, il est rare de trouver des observations qui aient résisté aussi longtemps à une interprétation théorique. Cela justifie largement l'impressionnante mobilisation autour d'un projet tel que celui dont nous allons décrire les contours.
- 2 Pour le chercheur qui a accompagné la gestation, parfois très longue, d'un projet qu'il a conçu, dont il lui a fallu obtenir (généralement avec difficultés) le financement, dont le bon fonctionnement ou les résultats positifs ou négatifs occupent ses jours et souvent ses nuits, une « expérience » est toujours singulière. C'est son « bébé », qui ne ressemble à aucun autre, et qui est évidemment le plus beau. Mais ce n'est pas offenser l'amour-propre de quiconque que de reconnaître que certaines expériences sont plus singulières que d'autres. Prenons celle dont la photo ci-après représente une minuscule partie. On y voit deux jeunes doctorants (un Français et une Argentine) en train de travailler visiblement à la mise au point d'un objet non identifié, muni d'un panneau solaire, d'une antenne-rateau (mais pas de poste de télévision en vue !) et équipé d'une électronique sophistiquée que l'un des jeunes est en train de tester à l'aide de son ordinateur portable. Le tout sous le regard placide de vaches dont on expliquera plus loin que l'herbe qu'elles broutent est celle de la Pampa argentine. Au loin, dans la brume, se profile la chaîne des

Andes. Ajoutons que cette cuve cylindrique est l'une des 1 600 stations identiques qui au total couvriront une superficie de 3 000 km<sup>2</sup> (la taille d'un département français, 30 fois la superficie de Paris *intra-muros*) ; qu'il a fallu à des chercheurs et ingénieurs de quinze pays dix années de réflexion et de travail pour qu'elle se trouve finalement là où elle est ; et que finalement ces jeunes chercheurs et la « station détectrice » sur laquelle ils travaillent s'attaquent précisément au sujet brûlant dont nous avons parlé en introduction. Voici donc un bref survol de la genèse de ce projet singulier dont l'Observatoire Pierre Auger sera l'aboutissement.

Dublin, 1991

- 3 L'aventure commence en 1991 par une discussion entre deux chercheurs au cours d'une conférence sur les rayons cosmiques qui se tient à Dublin. Le premier est James W. Cronin, professeur à l'université de Chicago et lauréat du prix Nobel de physique en 1980. C'est un expérimentateur exceptionnel, physicien des particules qui a déserté cette discipline du fait de sa réticence à travailler au sein de collaborations gigantesques telles que celles qui se mettent en place pour les futures expériences annoncées en ce début de décennie. Il a donc « basculé » dans une discipline voisine que plus tard on affectera du nom barbare d'« astroparticules ». C'est, en gros, l'étude de phénomènes astrophysiques par la détection de rayons cosmiques. Son interlocuteur, Alan A. Watson, est professeur à l'université de Leeds en Angleterre. C'est un vétéran des expériences de rayons cosmiques. Leur conversation tourne autour d'un sujet qui hante la communauté des rayons cosmiques depuis une trentaine d'années, une question sans réponse, et qui risque de le rester à moins de se lancer dans un projet décisif mais qui paraît à l'époque bien peu raisonnable ! Essayons de voir tout d'abord la question qui est en suspens, puis de résumer les idées qui commencent à germer dans la tête des deux chercheurs.

Les rayons cosmiques d'énergies ultimes

- 4 Les rayons cosmiques sont des particules d'origine extraterrestre, ce mot n'ayant ici aucune connotation exotique. Tout phénomène plus ou moins violent dans l'Univers s'accompagne d'émission et d'accélération de particules élémentaires. Ce sont les rayons cosmiques. La source émettrice de rayons cosmiques la plus proche est notre Soleil. Des mouvements de plasma dans la photosphère solaire ou la couronne y génèrent des phénomènes électromagnétiques qui évacuent de façon continue les particules chargées (électrons, protons,...). Ces particules sont accélérées de quelques électrons-volts (eV) à quelques keV par un processus dont la version la plus simple s'appelle « mécanisme de Fermi ». Très schématiquement, on peut assimiler ce mécanisme à l'accélération d'une balle de tennis par un coup de raquette, le nuage de plasma et le champ magnétique turbulent qui l'accompagne jouant le rôle de la raquette, et la particule chargée celui de la balle. Parfois, de façon sporadique, de gigantesques éruptions solaires arrachent des particules chargées en les accélérant jusqu'au MeV, avec une vitesse du plasma qui peut atteindre 1 000 km par seconde. Ces particules sont celles de plus basse énergie qu'on peut recevoir sur Terre, le champ géomagnétique jouant le rôle d'un bouclier qui renvoie dans l'espace toutes celles – chargées – dont l'énergie est inférieure.
- 5 La question qui nous intéresse ici est d'une toute autre nature : il existe visiblement dans la nature des phénomènes astrophysiques d'une violence extrême dont les produits, des rayons cosmiques ultra-énergétiques, peuplent l'autre extrémité du spectre d'énergie. Ces rayons cosmiques sont détectables à travers leur interaction avec l'atmosphère. La cascade de réactions en chaîne provoquée à la suite de la collision du rayon cosmique primaire avec les atomes de l'atmosphère se manifeste par deux effets mesurables.

- 6 Tout d'abord, à condition qu'on se place à une altitude appropriée (environ 1 500 mètres), la cascade (appelée « gerbe atmosphérique ») laisse une empreinte de plusieurs dizaines de milliards de particules secondaires (essentiellement des photons et des électrons) au sol, empreinte s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Un réseau de capteurs (ce sont les cuves de la photo) qui détecte ne fût-ce qu'une infime partie de ces particules secondaires permet (en principe, et par des méthodes sophistiquées) de remonter aux propriétés du rayon cosmique primaire.
- 7 Le second effet est un phénomène optique. Les électrons de la gerbe peuvent exciter les atomes d'azote de l'atmosphère qui, dans leur désexcitation, émettent une faible lumière dite de fluorescence dans l'ultraviolet. Pour schématiser, la gerbe vue par un détecteur optoélectronique (des tubes photomultiplicateurs) sera similaire à une ampoule de quelques dizaines de watts émettant une lumière d'intensité variable dans l'ultraviolet et traversant le ciel à la vitesse de la lumière. Ce sont ces deux techniques – réseaux de détecteurs au sol et télescopes à fluorescence – qui sont utilisées pour l'observation des rayons cosmiques de hautes énergies.
- 8 À l'époque de la « conversation de Dublin », les détecteurs de rayons cosmiques ont enregistré une dizaine d'événements interprétés comme résultant de l'interaction de particules d'énergies supérieures à  $10^{20}$  eV (15 ordres de grandeur au-dessus des performances atteintes dans les phénomènes solaires, 10 millions de fois l'énergie que l'homme réussira probablement à jamais atteindre avec ses accélérateurs les plus performants !). On peut résumer brièvement la problématique associée à ces particules ultra-énergétiques :
- Il n'y a aucun phénomène astrophysique communément reconnu capable d'accélérer des particules à ces énergies gigantesques de plusieurs dizaines de joules ou plusieurs centaines d'exa-électron-volts (EeV,  $\text{exa} = 10^{18}$ ).
  - Ces rayons cosmiques sont extrêmement rares : sur la base des observations passées, on estime leur flux (taux d'arrivée sur Terre) à quelques événements par kilomètre carré et par siècle dans le domaine de la centaine d'EeV. À ce jour, l'ensemble des détecteurs de rayons cosmiques opérationnels depuis plus de 40 ans n'en ont détecté qu'une petite vingtaine.
  - Nous n'avons aucune indication précise sur la nature de ces rayons cosmiques. L'hypothèse la plus simple serait que ce soient des protons, mais rien ne peut fermement exclure d'autres hypothèses, du moment qu'il s'agit de particules stables (pour pouvoir parcourir des distances cosmologiques pouvant aller à des centaines de millions d'années-lumière et au-delà).
  - Du fait d'un mécanisme d'interaction (parfaitement connu et expliqué) avec le rayonnement fossile à 3K qui baigne tout l'Univers, si ces rayons cosmiques sont des particules ordinaires (noyaux atomiques plus ou moins légers, rayons gammas), ils ne peuvent parcourir de grandes distances sans perdre l'essentiel de leur énergie. Autrement dit, les rayons cosmiques les plus énergétiques que nous observons viennent très probablement de sources proches : quelques dizaines de mégaparsecs (Mpc, un parsec vaut approximativement trois années-lumière), distance typique de Virgo, le superamas local de galaxies.
- 9 La conjonction des points 1 et 4 constitue l'énigme, celle des points 2 et 3 la difficulté d'y apporter des réponses. En effet, les sources de ces rayons cosmiques doivent être des objets astrophysiques (ou un mécanisme qui reste à découvrir) remarquables et d'une extrême violence. Elles devraient donc se manifester par d'autres effets : émission de rayons X, émission radio, rayonnement dans le visible détectable avec des télescopes optiques... Et ces sources doivent être proches. Or aucun objet remarquable n'a pu être

détecté dans la direction de provenance, même approximative, de ces particules, à l'intérieur d'une sphère de quelques dizaines de Mpc. Les points 2 et 3 mettent le doigt sur un problème général. La compréhension de tout phénomène physique nouveau passe par une observation en quantité suffisante pour tester des modèles ou des théories. Autrement dit, dans toute science expérimentale, la statistique est le nerf de la guerre. En 1991, il apparaissait clairement, au rythme où ces événements étaient observés, qu'il faudrait quelques siècles supplémentaires avant de confronter de manière décisive les hypothèses sur leur origine aux résultats expérimentaux. À moins d'envisager une nouvelle génération d'expériences. Par exemple, ce qu'on appelle le « spectre d'énergie » des rayons cosmiques (leur flux d'arrivée sur Terre en fonction de leur énergie) est un indicateur relativement précis du mécanisme d'accélération sous-jacent. Or on peut estimer qu'il faudrait au moins quelques centaines d'événements au-dessus de 50 EeV pour reconstruire ce spectre avec une précision dans le domaine d'énergie où notre compréhension défaille. Ayant une idée du flux global, c'est alors un calcul (une règle de trois) qui tient sur le dos d'un ticket de métro qui impose le principal paramètre de ce futur détecteur, sa superficie : seul un détecteur de plusieurs milliers de kilomètres carrés peut permettre d'accumuler suffisamment de statistiques dans un temps raisonnable (disons quelques années) pour que l'énigme des rayons cosmiques d'énergies ultimes soit (peut-être !) enfin résolue.

La gestation du projet : 1991-1996

- 10 La science se nourrit de mystères. À l'époque de la conversation de Dublin, la seule chose qui semble bien établie est que l'origine des rayons cosmiques d'énergies ultimes reste mystérieuse. Et la conversation s'achève, en gros, par cette conclusion : « Le futur détecteur doit avoir une superficie de 5 000 km<sup>2</sup> au minimum et doit être opérationnel dans 10 ans au maximum ». À l'époque, même si l'idée de base est simple et irréfutable, il s'agit d'un pari relativement insensé. Le détecteur le plus grand construit à ce jour est un réseau installé à Akeno, au Japon, et qui couvre une superficie de 100 km<sup>2</sup> (c'est à ce détecteur qu'on doit l'observation de la majorité des quelques événements ayant des énergies supérieures à la barrière symbolique de 10<sup>20</sup> eV). Personne n'est alors capable de garantir la faisabilité technique d'un tel projet, ni même de trouver un site pouvant l'accueillir. Les deux chercheurs décident alors de soumettre leur idée à leurs pairs. Au cours d'un séjour à Paris l'année suivante, Jim Cronin propose à quelques collaborateurs français d'organiser un atelier international dont le but explicite est soit de valider le projet, soit de le tuer dans l'œuf si on juge collectivement qu'il est irréalisable. La réunion est organisée au mois de mars 1992 sur le campus de Jussieu, avec la participation de 80 chercheurs et ingénieurs venant d'une dizaine de pays. Nul n'ayant réussi à démontrer que le projet est techniquement infaisable, une petite équipe, qui grossira au cours des ans pour atteindre, 10 ans plus tard, une collaboration de 300 personnes, s'attelle à la tâche de prospecter les solutions techniques à retenir et d'évaluer le coût du détecteur. La consigne est de laisser, pendant deux ans, à l'imagination de chacun la bride sur le cou de manière à prospecter dans toutes les directions possibles. Ensuite, une série de réunions de synthèse doit aboutir à un document technique final qui sera le cahier des charges pour le financement et la construction du détecteur.
- 11 En France, les équipes engagées dans le projet vont bénéficier grandement, pendant ces deux années exploratoires, du potentiel pluridisciplinaire du CNRS. C'est effectivement un petit groupe de chercheurs et d'ingénieurs qui va travailler sur différents aspects du projet, mais il est composé de personnes issues de quatre départements sur les sept que

compte alors le CNRS. Quelques chercheurs venant de la physique des particules (donc du département PNC/IN2P3, physique nucléaire et corpusculaire et Institut national de physique nucléaire et de physique des particules) s'intéressent tout particulièrement aux problèmes d'instrumentation et d'informatique, ainsi qu'à ceux liés à la physique et à la phénoménologie de la détection des rayons cosmiques (caractérisation des grandes gerbes atmosphériques que créent ces particules dans le domaine d'énergie qui nous intéresse). Des théoriciens du département SPM (sciences physiques et mathématiques) explorent certaines voies prometteuses et les signatures expérimentales qui permettraient de passer de l'observation à la validation (ou réfutation) des modèles et théories qui sont alors en train de fleurir (environ une publication par semaine traitant du sujet). Un groupe du département SDU/Insu (sciences de l'Univers et Institut national des sciences de l'Univers) et de l'Observatoire de Besançon, spécialiste de la mesure du temps, définit les techniques qui vont permettre de réaliser la nécessaire synchronisation entre des milliers de détecteurs éparpillés sur une superficie équivalente à celle d'un département français à quelques nanosecondes (milliardièmes de seconde) près. Le département SPI (sciences pour l'ingénieur) apporte le savoir-faire de chercheurs de l'École nationale supérieure de télécommunications de Paris en matière de transport hertzien de l'information, puisqu'il s'avère très rapidement que toute liaison par câble sur de telles distances rendrait le coût du projet prohibitif. Enfin, grâce aux bureaux d'études des services généraux du CNRS, certaines solutions sont retenues ou éliminées en termes d'infrastructures. Par exemple, l'idée d'alimenter les détecteurs par de l'électricité industrielle est rapidement abandonnée au bénéfice de l'alimentation solaire.

- 12 Une série de réunions va suivre (à Adélaïde en Australie, à Tokyo, à Chicago au laboratoire Fermi, de nouveau à Paris sous le patronage de l'Unesco, etc.). Finalement, en 1995, un document technique de 270 pages est préparé, qui décrit dans leurs moindres détails les détecteurs et les méthodes qui seront utilisés, et les moyens d'en minimiser les coûts. L'Observatoire Pierre Auger (nom qui est donné au projet par nos collègues anglo-saxons en hommage au pionnier de l'étude des rayons cosmiques par la détection des gerbes atmosphériques) est prêt sur le papier. Ses principales caractéristiques sont :
- Deux sites, respectivement dans les hémisphères nord et sud (pour couvrir la totalité du ciel de manière uniforme).
- 13 Et pour chaque site :
- Un réseau de surface de 1 600 cuves remplies de 12 tonnes d'eau chacune (dans lesquelles les particules secondaires de la gerbe laissent une trace lumineuse détectable), espacées de 1,5 km et couvrant donc une superficie de 3 000 km<sup>2</sup>.
  - Un ensemble de télescopes à fluorescence dont le champ de vision couvre la surface du réseau, de manière à observer chaque événement (du moins ceux qui arrivent pendant les nuits sans lune, condition de bon fonctionnement des télescopes) par deux techniques indépendantes.
  - Une liaison par un système proche de la téléphonie cellulaire entre chaque station détectrice et un centre de calcul central qui collecte les données, puis une liaison par satellite entre ce centre et des centres de calcul locaux desservant les différents laboratoires membres de la collaboration.
  - Une alimentation autonome de chaque station par panneaux solaires, ce qui impose des contraintes draconiennes sur la conception de l'électronique (très faible consommation).
  - Une synchronisation en temps de l'ensemble des détecteurs par l'utilisation des satellites GPS.

- 14 En parallèle avec la préparation de ce cahier des charges, un tandem constitué de deux jeunes physiciens (dont un Français) est chargé de visiter les sites pouvant accueillir le détecteur. Ils devront présenter leurs conclusions à la collaboration pour le choix final. Les critères d'évaluation des sites sont extrêmement stricts : sites entre 35 et 40 degrés de latitude Nord et Sud (couverture complète du ciel), un plateau situé à environ 1 400 mètres d'altitude (correspondant à celle où les gerbes atmosphériques atteignent le maximum de leur développement), une surface plate (télécommunications) de 3 000 km<sup>2</sup>, facile d'accès mais sans grandes agglomérations à proximité (pour éviter la pollution des détecteurs optiques par de la lumière parasite), un climat d'ensoleillement maximum (énergie solaire), des nuits claires et sans brouillard (télescopes à fluorescence), une population accueillant favorablement le projet (les détecteurs du réseau seront construits sur des terrains exploités pour l'agriculture ou l'élevage), et enfin bien entendu une communauté scientifique compétente et un gouvernement apportant son soutien (entre autres financier) au projet. L'équipe de prospection visitera durant deux ans une quinzaine de sites dans les deux hémisphères, en retiendra six au total et les sites retenus seront soumis aux membres de la collaboration pour le choix final. Au cours de deux réunions (animées et tendues, étant donné les enjeux), les pays membres de la collaboration voteront sur la base du principe « un pays, une voix » (la Slovénie, par exemple, ayant donc le même poids que les États-Unis !) pour élire les sites. Un site dans la Province de Mendoza en Argentine l'emportera sur deux sites concurrents en Afrique du Sud et en Australie pour l'hémisphère Sud, et un dans l'Utah (États-Unis) sur les deux candidats de l'Espagne et du Mexique pour l'hémisphère Nord.

#### La réalisation

- 15 Le reste des dix années sera consacré à convaincre nos pairs des enjeux fondamentaux d'un tel projet et de la faisabilité de l'expérience (certainement l'étape la plus difficile) ; à s'associer des partenaires (les trois ou quatre pays, dont la France, à l'origine du projet sont devenus rapidement quinze) ; à obtenir des budgets de recherche et de développement pour construire des prototypes et tester les idées techniques ; et finalement à obtenir de la tutelle scientifique de chacune des institutions participantes le financement de l'expérience elle-même. Cette dernière phase est compliquée du fait que dans le domaine des astroparticules ce projet est, au moment de sa gestation, par sa taille mondiale, une première. Il n'existe alors en particulier aucune instance d'évaluation de projets de ce type à un niveau international. Chaque équipe doit donc négocier avec les autorités de son propre pays, en parallèle et simultanément avec les démarches identiques dans les autres pays, chaque « agence » nationale attendant que les autres fassent le premier pas. L'évaluation scientifique du projet est positive dans tous les pays participants. Le financement est finalement amorcé par les deux pays qui accueilleront les deux sites : États-Unis et Argentine. Les autres suivront. Le financement de l'expérience est approuvé en France en avril 1999 (son évaluation scientifique date de février 1997). Certains pays « en développement » (Vietnam, Bolivie) pourront participer à l'expérience sans apport financier, les autres mettront une partie de leur budget dans un pot commun, géré par une institution internationale (le laboratoire européen Cern). Un comité des finances où siègent les représentants de toutes les « agences » (tel que le CNRS) qui contribuent au projet veille à sa bonne gestion financière.

#### Épilogue

- 16 Actuellement, l'Observatoire Pierre Auger est en construction dans la Pampa Amarilla, au pied des Andes à l'ouest de l'Argentine. Le tiers du réseau de surface et la moitié des

télescopes à fluorescence sont opérationnels et l'ensemble a déjà accumulé une abondante moisson de données. La construction du site Nord commencera en principe en 2006, quand le site Sud sera achevé. L'Observatoire va probablement opérer pendant une vingtaine d'années. Nous ne savons pas encore ce que nous apprendront les observations enregistrées et distribuées dans des dizaines de laboratoires de par le monde pendant cette période. La seule assurance que nous avons est qu'elles ouvriront sans doute de nouvelles fenêtres, mais sera-ce dans le domaine de l'astrophysique (les propriétés des trous noirs super-massifs constituant le noyau de certaines galaxies dites « actives » ou le mécanisme qui alimente les « sursauts gamma », autre énigme vieille de 40 ans), celui de la cosmologie (état de notre Univers  $10^{-35}$  seconde après le Big-Bang), ou celui des interactions fondamentales (test direct de la théorie de Grande-Unification, mise en évidence de la violation de l'invariance de Lorentz, interactions au-delà du Modèle Standard...)? Le tout sous le regard indifférent des vaches andines.

---

## RÉSUMÉS

History of a Singular Project : The Pierre Auger Observatory

The Pierre Auger Observatory is a giant cosmic ray detector presently in construction in Argentina. Several hundreds of scientists coming from fifteen countries (half of which from Europe) have been working for more than ten years to the design and construction of this unique detector. The aim of the project is to understand the origin and nature of cosmic rays detected in very small numbers whose energies exceed by a factor of several hundreds of millions those of the particles accelerated by the most performing accelerators ever built by men. The article summarizes the genesis and the scientific stakes of this project in which France, and more specifically the CNRS, played a major role.

## AUTEUR

### MURAT BORATAV

Murat Boratav est titulaire d'un doctorat ès-sciences depuis 1979. Professeur à l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI) depuis 1983, physicien des particules de formation, il s'est orienté depuis 1992 vers le domaine de l'astrophysique des particules en s'engageant dans le projet d'Observatoire Pierre Auger dès ses débuts.