

REPORTAGE

Sur la piste des  
**rayons.  
cosmiques**  
dans la pampa argentine

^ Cette cuve perdue dans la pampa (à dr.) détecte la trace des rayons cosmiques.

*Quelle est l'origine des rayons cosmiques? C'est pour résoudre cette énigme que des chercheurs ont investi la pampa argentine. Là, ils ont installé le plus grand détecteur du monde qui, jour et nuit, traque les flux de particules venues du cosmos. Une quête dont les physiciens espèrent beaucoup.*

Par Claire Martin. Photos : Rodrigo Gomez Rovira/Vu

explorations

1

A perte de vue, de minuscules fleurs jaunes tapissent le sol sablonneux et irrégulier de la Pampa Amarilla. Pas un arbre, une colline ou une maison alentour. Seule la Cordillère des Andes se détache au loin de l'immensité plane, écrasée par le soleil, de cette région du centre de l'Argentine. Cahotante et poussiéreuse, la route de terre qui relie Malargüe, la ville la plus proche avec ses 23 000 habitants, à cinq heures du premier aéroport, celui de Mendoza, semble interminable. Quand soudain, à quelques mètres du chemin, apparaît une cuve cylindrique en plastique ocre pâle. A peine moins haute qu'un homme, elle est surmontée d'antennes hertziennes et GPS et d'un panneau solaire. Les vaches ne semblent pas s'en formaliser, pas plus que les oiseaux : à l'ombre du panneau solaire, ces derniers ont installé leur nid... En scrutant l'horizon, on distingue au loin d'autres cuves. Incongrue, leur présence ne le reste pas longtemps pour qui sait que cette terre aride n'est pas seulement un lieu d'élevage extensif,

mais accueille aussi le plus grand observatoire au monde de "rayons cosmiques ultraénergétiques", l'observatoire Pierre-Auger. Les rayons cosmiques? Notre planète en est sans cesse bombardée. Chaque seconde, plusieurs milliers de ces invisibles rayons pénètrent chaque mètre carré de notre atmosphère! Sans danger. Car les organismes vivants se sont habitués aux taux d'irradiation qui en résultent. "Seule une forte augmentation du flux de ces rayons serait dangereuse", précise Murat Boratav, professeur de physique des particules à l'université Paris VI, et membre fondateur de l'observatoire. *Tout comme il est déconseillé d'entrer dans le faisceau d'un accélérateur de particules...*

Pour les physiciens, qui les connaissent depuis un siècle environ, les rayons cosmiques sont de précieux messagers. C'est que ces flux de particules très ordinaires (noyaux atomiques, électrons, photons, neutrinos) venant du cosmos et même, pour la plupart, de notre propre galaxie, véhiculent des informations, notamment sur leur direction et leur énergie, permettant de remonter à leur origine. Et donc

## UNE PRÉSENCE INCONGRUE DANS L'IMMENSITÉ ARIDE...



▲ C'est au beau milieu de la pampa argentine, sur 3000 km<sup>2</sup>, que sont placés les télescopes de l'observatoire Auger. Un site idéal parce qu'éloigné de toute lumière parasite.

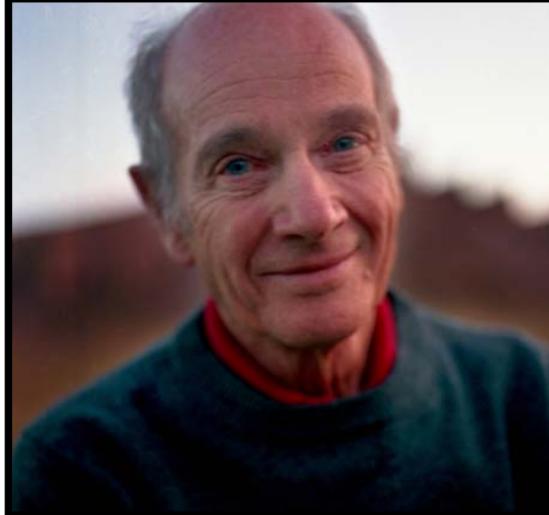
de comprendre comment ils ont été créés. A condition de parvenir à déchiffrer ces informations. Certes, aujourd'hui, les physiciens ont compris que la majorité de ces rayons viennent soit de réactions de fusion au cœur des étoiles, soit de collisions de galaxies ou même de supernovæ, ces effondrements d'étoiles à bout de "carburant"... Mais un mystère demeure : l'origine des rayons les plus énergétiques.

Imaginez-vous : ces bolides, pourtant microscopiques, contiennent autant d'énergie qu'un ballon de football shooté lors d'un *penalty*. Or, on ne connaît aucun mécanisme astrophysique capable d'accélérer des particules à de telles énergies! "Avec une énergie supérieure à 10<sup>19</sup> électrons-volts (eV), ils sont cent millions de fois plus énergétiques que les particules produites dans nos accélérateurs", souligne Murat Boratav. *On les observe depuis quarante ans sans trouver d'explication convaincante. Il n'existe pas d'autre énigme dans l'histoire de la physique qui ait résisté à l'interprétation théorique aussi longtemps.* Il faut dire que ces rayons "ultraénergétiques" sont rares. On estime qu'une seule particule dont →



▲ Dans les télescopes, miroirs et capteurs traitent la lumière émise par les rayons au contact de l'atmosphère.

explorations &gt; REPORTAGE



< C'est le prix Nobel Jim Cronin qui a initié la création d'un observatoire en pleine pampa. A 70 ans passés, il suit de près son développement.

▼ Lorsqu'une gerbe de particules est repérée par un télescope, ce dispositif émet un rayon laser. Le but : évaluer la transparence de l'atmosphère risquant de fausser les résultats.



▲ Né à Malargüe, le technicien Ricardo Pérez assiste les équipes venues du monde entier.



▲ La Franco-Finlandaise Tiina Suomijärvi supervise l'installation de l'électronique sur les cuves.



▲ L'astrophysicien Antoine Letessier-Selvon, dans la salle de contrôle.

## UN OBSERVATOIRE NOMMÉ EN HOMMAGE AU PIONNIER DES RAYONS COSMIQUES

Une fois n'est pas coutume, ce sont les Anglo-Saxons qui ont proposé de nommer l'observatoire du nom d'un Français ! Un hommage au physicien Pierre Auger (1899-1993), mondialement connu dans les domaines de la physique nucléaire et des rayons cosmiques avant la Seconde Guerre mondiale. Pionnier, il a été le premier, dès 1938, à prédire l'existence de grandes "gerbes atmosphériques", des gerbes de particules que provoqueraient les rayons cosmiques de très hautes énergies frappant notre atmosphère. C'est d'ailleurs l'une de ses idées qui a inspiré la disposition, à 1,5 km les unes des autres, des cuves de détection de l'observatoire : plus l'énergie des rayons cosmiques que l'on veut détecter est grande, plus les particules qu'ils créent en entrant dans l'atmosphère se dispersent avant de frapper le sol, et donc, plus il faut éloigner les détecteurs les uns des autres. Au lendemain de 1945, il joua un rôle déterminant dans le développement de grandes institutions internationales, tels le Cern (le Laboratoire européen pour la physique des particules, à Genève) ou l'Unesco.

110 SCIENCE &amp; VIE &gt; JUILLET &gt; 2006



## DES SCIENTIFIQUES VENUS DES 4 COINS DU GLOBE

→ l'énergie dépasse les  $10^{20}$  eV entre dans 1 km<sup>2</sup> d'atmosphère terrestre par siècle. D'où l'idée de construire un détecteur géant. Avec ses cuves disséminées sur 3 000 km<sup>2</sup> de pampa, l'observatoire Pierre-Auger est conçu pour en repérer... plusieurs dizaines par an. "Mais bien sûr, précise Murat Boratav, tout ce qu'on peut observer nous intéresse. Ces deux dernières années, on a enregistré 100 000 événements, la plupart de  $10^{17}$  eV, et on les étudie aussi." Ou plutôt, ils étudient "non les rayons cosmiques, mais les gerbes de particules qu'ils déclenchent en pénétrant dans notre atmosphère", comme le précise l'astrophysicien Etienne Parizot, de l'Institut de physique nucléaire d'Orsay. Lorsqu'il entre en collision avec les molécules de l'atmosphère, le rayon lancé à toute vitesse déclenche en effet une sorte de réaction en chaîne. C'est alors une pluie de particules secondaires, ou "gerbe atmosphérique", invisible à l'œil nu, qui se forme dans le ciel. Un rayon cosmique ultraénergétique peut ainsi créer 100 milliards de particules secondaires qui atteignent le sol, et dont une toute petite partie, une sur un million en moyenne, tombera dans les cuves !

### CE DÉTECTEUR HYBRIDE EST UNIQUE AU MONDE

Sorte de petite piscine à l'eau totalement pure, entièrement hermétique et obscure, chaque cuve est dotée, sur son couvercle, d'une partie électronique et de trois photomultiplicateurs, chargés de collecter la lumière. Car les particules émettent à leur passage dans l'eau une lumière, plus ou moins forte selon leur énergie, appelée "lumière Tcherenkov". La cuve est chargée de la capter, de calculer son intensité et l'heure exacte de son arrivée, à la nanoseconde

près. Toutes les 25 nanosecondes, l'électronique de chaque cuve "lit" les événements arrivés sur les photomultiplicateurs et les transmet au système central d'acquisition des données, le CDAS, située à Malargüe. Quant au panneau solaire, il permet à la cuve de fonctionner de manière autonome, vingt-quatre heures sur vingt-quatre. Pour l'instant, un millier de cuves ont été installées. D'ici à un an, lorsque l'observatoire sera terminé, 600 cuves supplémentaires, espacées les unes des autres de 1,5 km, achèveront de former un gigantesque hexagone. Et pour récolter le maximum d'informations sur chaque gerbe de particules, les physiciens ont déjà commencé à placer, autour de cet hexagone, quatre télescopes "à fluorescence", qui, dès la nuit tombée, sont chargés d'observer les gerbes dans le ciel – plus précisément le rayonnement de "fluorescence" produit par leurs interactions avec les atomes de l'atmosphère – et cela, avant même qu'elles n'atteignent le sol ! "Ces télescopes sont dotés de 6 miroirs à facettes semblables à des yeux de mouche, ce qui leur offre un angle de vue à 180° sur tout le réseau de cuves, précise Murat Boratav. Ils sont capables de repérer une gerbe ultraviolette pas plus lumineuse qu'une lampe de 40 watts située à 40 km !" Cet ensemble de cuves et de télescopes fait de l'observatoire Pierre-Auger non seulement le plus grand et le plus performant des observatoires dans son domaine, mais aussi l'unique détecteur "hybride" au monde puisqu'il intègre deux systèmes de détection.

Reste un détail : moins polyvalents que les cuves, qui officient de jour comme de nuit, les télescopes à fluorescence ne peuvent fonctionner s'il y a des nuages, de la brume, ou même une lune trop brillante. Du coup, cela ne leur →

2006 &gt; JUILLET &gt; SCIENCE &amp; VIE 111

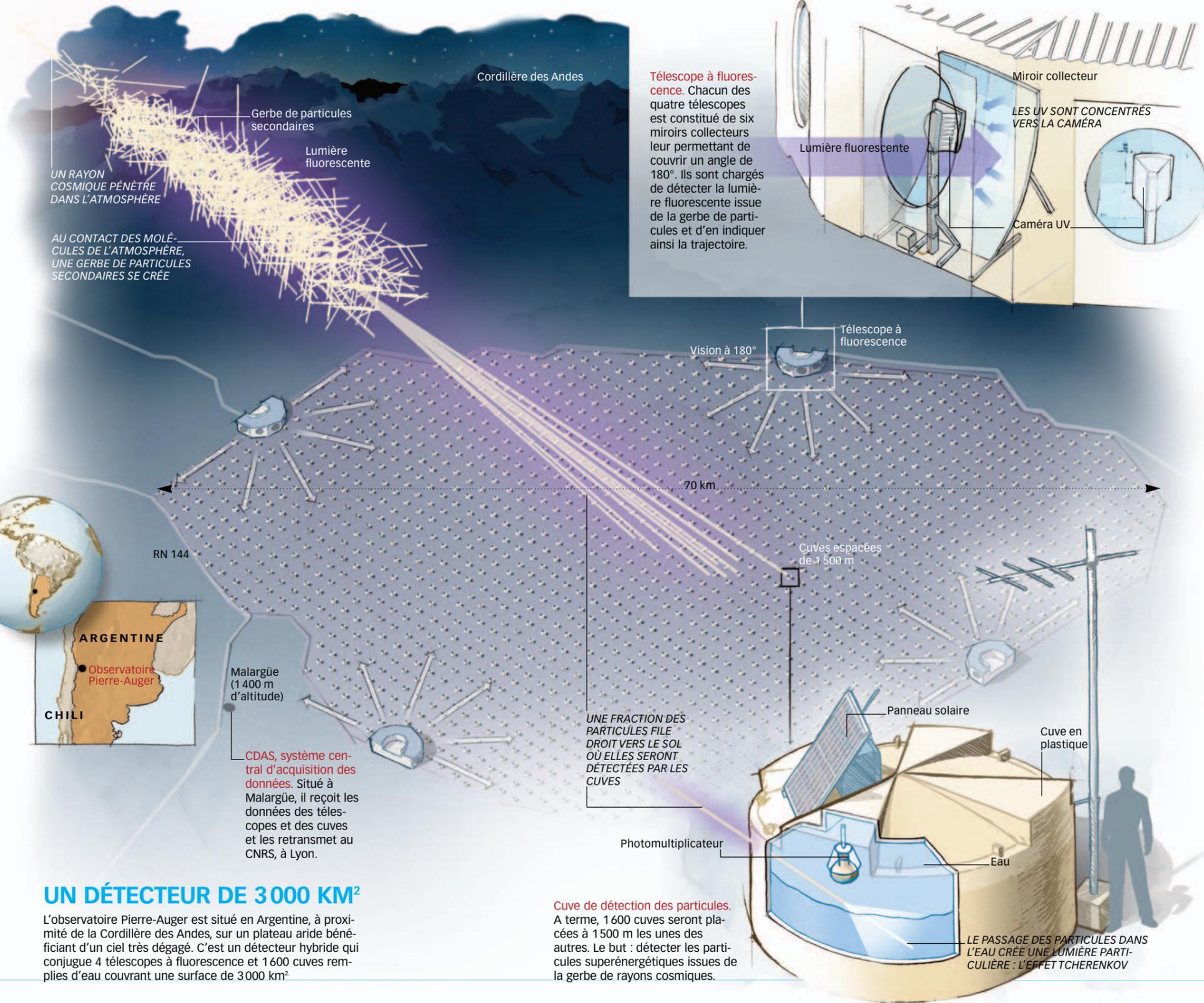
explorations > REPORTAGE

→ laisse en moyenne que 10 % du temps (soit les nuits suffisamment noires et dégagées) pour œuvrer. Pour ces précieuses heures d'obscurité, quatre physiciens viennent des quatre coins du globe pour un séjour de trois semaines. Constituée sur la base du volontariat, l'équipe est chaque fois différente. Son rôle : contrôler les télescopes et s'assurer de la qualité des données enregistrées. Par équipe de deux, les physiciens se relaient le jour et la nuit dans la salle de contrôle de Malargüe, d'où ils ont accès aux commandes des quatre télescopes et à toutes les données enregistrées. C'est au centre de cette salle réservée aux chercheurs que se trouve le CDAS, en fait un monticule de disques durs, sous verre, récoltant la moindre donnée envoyée par les détecteurs.

**UNE IDÉE UN PEU FOLLE À 50 MILLIONS DE DOLLARS**

Le jour, il s'agit de vérifier qu'il n'y a pas eu de problème la nuit précédente, et de procéder aux éventuelles réparations. Ce qui n'est pas une sinécure, vu la grandeur du terrain d'intervention... "Le but, c'est d'éviter d'avoir à intervenir sur les cuves, car il nous faut deux à trois heures pour les atteindre!", souligne Tiina Suomijärvi, professeur en astroparticules à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay, qui supervise l'installation de l'électronique. On choisit donc notre parcours de façon à en réparer de 3 à 10 dans la même journée. Si le réseau fonctionne à 97-98 %, c'est suffisant." Ricardo Pérez, un technicien argentin, chargé de la maintenance de l'observatoire, qui est né à Malargüe et connaît la région comme sa poche, a souvent joué les secouristes auprès des chercheurs : "Je me souviens d'une fin d'après-midi, en hiver, où des scientifiques sont partis sur le terrain, vêtus comme pour aller aux Champs-Élysées. J'ai dû les récupérer au milieu de la pampa, dans un froid terrible, leur camionnette totalement embourbée!"

Quand vient le crépuscule, d'autres prennent le relais. Leur première tâche : vérifier le fonctionnement des télescopes. "Si tout marche normalement, on n'a rien à faire", souligne Michael Unger, un chercheur en astrophysique des particules au Forschungszentrum Karlsruhe, en Allemagne. Mais c'est rare, car l'observatoire est encore en rodage." Une ou deux fois par nuit, une gerbe bien plus intense que les autres traverse le ciel, signe qu'un événement particulièrement énergétique vient de se produire. Immédiatement, les cuves touchées envoient l'information, prétraitée, au CDAS. De leur côté, les télescopes à fluorescence ont eux aussi signalé la gerbe. Dans les secondes qui suivent, un faisceau laser est envoyé dans le ciel, afin de simuler une gerbe théorique, seul moyen d'évaluer la transparence de l'atmosphère pour assurer la fiabilité du résultat. Dès le lendemain, toutes ces données arrivent au centre de calculs du CNRS, basé en France, à Lyon. A partir de là, les →



**UN DÉTECTEUR DE 3 000 KM<sup>2</sup>**

L'observatoire Pierre-Augier est situé en Argentine, à proximité de la Cordillère des Andes, sur un plateau aride bénéficiant d'un ciel très dégagé. C'est un détecteur hybride qui conjugue 4 télescopes à fluorescence et 1 600 cuves remplies d'eau couvrant une surface de 3 000 km<sup>2</sup>.

**Télescope à fluorescence.** Chacun des quatre télescopes est constitué de six miroirs collecteurs leur permettant de couvrir un angle de 180°. Ils sont chargés de détecter la lumière fluorescente issue de la gerbe de particules et d'en indiquer ainsi la trajectoire.

**UNE FRACTION DES PARTICULES FILE DROIT VERS LE SOL OÙ ELLES SERONT DÉTECTÉES PAR LES CUVES**

**Cuve de détection des particules.** A terme, 1 600 cuves seront placées à 1 500 m les unes des autres. Le but : détecter les particules superénergétiques issues de la gerbe de rayons cosmiques.

**LE PASSAGE DES PARTICULES DANS L'EAU CRÉE UNE LUMIÈRE PARTICULIÈRE : L'EFFET TCHERENKOV**

ENIFORM

## explorations &gt; REPORTAGE

**Science & Vie : Les premiers résultats de l'observatoire ont-ils révélé des choses inattendues sur les rayons cosmiques ?**

**Murat Boratav :** Nous n'en sommes qu'au début. Ces résultats sont issus d'un détecteur encore incomplet, et nos outils d'analyse sont en cours d'optimisation. Cela dit, ils sont d'ores et déjà prometteurs. D'abord, on a pu vérifier que l'observatoire atteignait les performances attendues. Une belle victoire ! Car lorsqu'on cherchait à le financer, on se trouvait souvent face à un mur de scepticisme... Il faut dire qu'il est unique au monde : le plus grand observatoire de

pace. Et nous ne regardons pas trop loin : comme ces rayons perdent de l'énergie en interagissant avec le rayonnement fossile qui baigne l'Univers, ils doivent venir de régions assez proches.

**S&V : Qu'entendez-vous par "proche" ?**

**M.B. :** Dans ce cas, "proche" signifie à moins de 50 millions de parsecs (1) environ, de l'ordre de la taille de notre super-amas local de galaxies, sachant que la Voie lactée s'étend sur quelques milliers de parsecs seulement... Le problème, c'est qu'en quarante ans, les différents observatoires n'ont détecté qu'une trentaine de

**résultats apportent "deux types d'informations"... Quel est le second ?**

**M.B. :** Il existe deux "familles" de modèles pouvant expliquer l'origine des rayons cosmiques ultraénergétiques. Or, les résultats que l'on a obtenus disqualifient les modèles dits "top-down". Ceux-ci supposent que les rayons ne sont pas accélérés par des phénomènes astrophysiques, comme le sous-tendent les théories "classiques", mais sont issus de la fragmentation de particules très massives créées à une époque proche du big bang, et qui se désintègreraient aujourd'hui pour produire les rayons que nous observons.

quels mécanismes astrophysiques des particules atteignent  $10^{18}$  eV, au-delà, on ne comprend plus. Selon le modèle "bottom-up", pour qu'une particule dépasse  $10^{18}$  eV, il lui faudrait un temps supérieur à l'âge... de l'Univers ! Peut-être que la manière dont on explique les mécanismes astrophysiques est fautive. Ou que les mécanismes à l'origine de ces rayons sont encore inconnus...

**S&V : Qu'attendez-vous des résultats à venir ?**

**M.B. :** La physique que nous étudions s'attaque à une situation très rare en recherche fondamentale :

## "L'OBSERVATOIRE OUVRIRA PEUT-ÊTRE DE NOUVEAUX CHAMPS DE LA PHYSIQUE"

MURAT BORATAV, RESPONSABLE DE L'OBSERVATOIRE PIERRE-AUGER POUR LA FRANCE

rayons cosmiques précédent, AGASA (Akeno Giant Air Shower Array), au Japon, couvrait 100 km<sup>2</sup>. On est donc passé à trente fois plus grand ! Ensuite, les résultats nous ont apporté deux types d'informations tout à fait intéressantes. Ils ont d'abord mis en doute l'ensemble des résultats publiés par les expériences antérieures...

**S&V : C'est-à-dire ?**

**M.B. :** Le but est de remonter aux phénomènes – sans doute les plus violents de l'Univers – capables d'engendrer les rayons cosmiques "ultraénergétiques", et de les localiser. Pour cela, nous regardons d'où ils viennent car ils sont si puissants qu'ils arrivent presque en ligne droite, sans être déviés par les champs magnétiques de l'es-

rayons cosmiques au-dessus de  $10^{20}$  eV (2). Et lorsque plusieurs rayons venaient d'une même direction, certains ont conclu qu'il s'agissait de la même source. Les chercheurs d'une expérience japonaise ont ainsi pensé qu'il y avait une accumulation d'événements venant du centre de la galaxie. Mais sans statistiques importantes, comment être sûr que ce n'est pas un hasard ? Or, nos premiers résultats montrent qu'une telle accumulation n'existe pas. Il s'agissait probablement d'un artefact ou d'une mauvaise interprétation. Et je pense que d'ici à trois ans, nous aurons assez de statistiques pour arriver à des conclusions plus définitives sur l'existence ou non de sources visibles.

**S&V : Vous disiez que les**

Or, selon nos premiers résultats, à confirmer bien sûr, les théories classiques, dites "bottom-up" seraient les plus crédibles.

**S&V : Quelles sont ces théories qui semblent plus à même d'expliquer les rayons cosmiques ?**

**M.B. :** Prenons une particule au repos. Son énergie est quasi nulle. Pour atteindre une énergie très élevée, elle doit passer à travers des champs électromagnétiques. Tels des coups de raquette, ils accélèrent la particule. Plus elle passe par ces champs, plus elle reçoit de coups de raquette et donc, accélère. Ainsi, le Soleil, avec ses champs très chauds et turbulents, produit des rayons cosmiques de  $10^6$  eV. Or, si l'on sait par

des observations irréfutables qui résistent à l'interprétation depuis plusieurs décennies. Lorsque nous tiendrons enfin l'explication, ce sera un grand progrès dans la compréhension de l'Univers, qui ouvrira de nouvelles fenêtres sur des domaines de la physique encore indéfinis. L'observatoire est prévu pour durer vingt ans. Autrement dit, dans vingt ans, on espère encore faire des découvertes, et ouvrir de nouveaux champs de la physique.

**Propos recueillis par C.M.**

(1) Un parsec correspond à 3 années-lumière, soit trois fois la distance parcourue par la lumière en une année.

(2) L'électronvolt (eV) est l'unité d'énergie utilisée en physique des particules : c'est l'énergie acquise par un électron accéléré par un potentiel électrique de 1 volt.



▲ Enseignant-chercheur en physique des particules à l'université Paris VI, Murat Boratav est l'un des initiateurs du projet.

explorations &gt; REPORTAGE



▲ De la route poussiéreuse qui traverse l'observatoire, nul ne peut deviner l'expérience en cours.



◀ La présence de l'observatoire procure aux éleveurs Nicolas Arriagada et Nelida Castro une petite rente annuelle.

## LES HABITANTS DE LA PAMPA NE SOUPÇONNENT PAS

→ scientifiques participant au projet y ont librement accès. A eux, alors, de reconstituer l'« événement », puis d'émettre des hypothèses sur son origine. Ce suivi pouvant se faire de n'importe où, à terme, ils ne seront guère que deux ou trois physiciens et sept ou huit techniciens sur site pour faire tourner ce qui est pourtant le plus grand détecteur du monde.

Si le fonctionnement de l'observatoire est aujourd'hui presque optimum, sa construction n'a pas été sans embûches. C'est au début des années 90 que l'Américain Jim Cronin lance, avec d'autres, l'idée un peu folle d'un détecteur de 5 000 km<sup>2</sup> en rase campagne. « *Le fait que je sois prix Nobel nous a permis d'être pris au sérieux*, remarque dans un sourire Jim Cronin, qui suit toujours le projet malgré ses 70 ans passés. *Il nous fallait trouver 50 millions de dollars.* » Le porte-à-porte pour réunir le financement aboutit à la première collaboration de dimension vraiment mondiale dans le domaine, avec 250 spécialistes de la physique des particules, de la physique nucléaire, de la cosmologie, de l'astrophysique et de l'astroparticule, représentant 18 pays : Allemagne, Argentine, Australie, Bolivie, Brésil, Espagne, Etats-Unis, France, Italie, Mexique, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie et Vietnam.

En 1995, deux chercheurs portaient courir le monde à la recherche du site idéal, sac au dos et cahier des charges très contraignant en poche. « *En résumé*, se souvient Antoine Letessier-Selvon, directeur de recherche au CNRS en astroparticule, *il nous fallait choisir un site plat, immense, loin de toute lumière parasite, autrement dit presque inhabité, mais relativement accessible, à l'atmosphère transparente, au climat aride, le tout dans un pays politiquement stable...* » C'est l'Argentine qui s'est finalement imposée face à l'Afrique du Sud et l'Australie. Non seulement, elle avait promis une aide financière substantielle, mais sa communauté scientifique était des plus enthousiastes.

### PROCHAINE ÉTAPE, L'HÉMISPHERE NORD

En 2000, la première cuve est installée à Malargüe. Et c'est là que l'aventure a réellement commencé. « *Nous, les physiciens des particules, avons l'habitude de travailler dans des environnements hyperprotégés où pas même un cafard ne peut survivre*, raconte Murat Boratav. *On s'est retrouvé ici au milieu des serpents et des veuves noires.* » Mais les animaux les plus dévastateurs n'ont pas été ceux-là... « *Pendant près d'un an, on retrouvait les cuves avec leurs fils*

## LA RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE QUI EST EN MARCHÉ

*de batteries arrachés malgré les boîtiers rectangulaires censés les protéger*, se rappelle encore Ricardo Pérez. *Certains craignaient un sabotage. On a découvert que c'étaient les vaches qui venaient se gratter le dos dessus ! Finalement, on a utilisé des boîtiers arrondis.* » Outre les vaches, il a aussi fallu se confronter aux soixante-dix propriétaires fonciers des 3 000 km<sup>2</sup> de Pampa. Objectif ? Les convaincre d'accepter les cuves sur leurs terres, en échange d'un dédommagement. Certes, la population de Malargüe est fière d'avoir accueilli l'observatoire. D'autant que des bourses ont été mises en place, permettant aux meilleurs élèves de partir étudier aux Etats-Unis. Un collège portant le nom de Jim Cronin a même été construit grâce à une contribution importante de la Fondation Grainger, de l'université de Chicago. Et, chaque année, lors de la fête nationale, l'observatoire est invité à défilé. Mais il reste tout de même encore un propriétaire réfractaire. « *Or, un seul trou dans le réseau de surface, et les données sont bancales*, souligne Murat. *Les physiciens chargés de l'analyse des données sont maniaques. Déjà que sur le terrain il y a des lacs, des pitons rocheux obligeant parfois le déplacement d'une cuve de quelques dizaines de mètres... cela déclenche chez eux des*

*crises d'épilepsie ! Imaginez donc qu'on leur dise qu'il y a un trou de plusieurs centaines de km<sup>2</sup> dans le réseau !* »

Aujourd'hui, l'observatoire enregistre des données exploitables depuis plus de trois ans, et les premiers résultats sont d'excellent augure (voir interview p. 114). D'ici un an, l'observatoire Pierre-Auger devrait être terminé. Les regards se tourneront alors vers la seconde étape du projet : la construction d'un détecteur dans l'hémisphère nord, au Colorado (Etats-Unis). Car le but ultime des physiciens est de pouvoir reconstituer, depuis les deux hémisphères, la carte du ciel tout entier. Pour savoir d'où viennent les rayons cosmiques ultraénergétiques, il faut en effet observer tout autour de la Terre et ne laisser aucun carré de ciel de côté.

Au milieu de la pampa, la petite ferme en adobe de Nelida Castro et Nicolas Arriagada, qui possèdent plus de 9 000 hectares de terres pour l'élevage de leurs bêtes, continue d'être battue par les vents. La petite révolution scientifique qui a fait apparaître sur leurs terres d'étranges cuves les dépasse un peu. Pour eux, l'observatoire Pierre-Auger, ce sont des techniciens qui passent parfois sur leur chemin de terre, c'est surtout l'électricité dans leur maison et une petite rente par an. Rien n'a changé. ■