



N°459 - janvier 2016
□ réf. M0770459



N°458 - décembre 2015
□ réf. M0770458



N°457 - novembre 2015
□ réf. M0770457



N°456 - octobre 2015
□ réf. M0770456



N°455 - septembre 2015
□ réf. M0770455



N°454 - août 2015
□ réf. M0770454



N°453 - juillet 2015
□ réf. M0770453



N°452 - juin 2015
□ réf. M0770452



N°451 - mai 2015
□ réf. M0770451



N°450 - avril 2015
□ réf. M0770450



N°449 - mars 2015
□ réf. M0770449



N°448 - février 2015
□ réf. M0770448



N°447 - janvier 2015
□ réf. M0770447



N°446 - décembre 2014
□ réf. M0770446



N°445 - novembre 2014
□ réf. M0770445

POUR LA SCIENCE

Complétez votre collection
dès maintenant!

5,50€ dès le 2^e numéro
acheté!

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

☐ Oui, je commande des numéros
de *Pour la Science* au tarif unitaire
de 5,50€ dès le 2^e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format souhaité :

1^{re} réf. _____ 01 x 5,50 € = _____ 6,50 €

2^e réf. _____ x 5,50 € = _____

3^e réf. _____ x 5,50 € = _____

4^e réf. _____ x 5,50 € = _____

5^e réf. _____ x 5,50 € = _____

6^e réf. _____ x 5,50 € = _____

Frais port (4,90€ France - 12€ étranger) + _____

Je commande la reliure *Pour la Science*
(capacité 12 n°)
au prix de 14 € _____ x 14 € = _____

TOTAL À RÉGLER = _____

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* : _____

* à remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Code de sécurité _____
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐.

TOUTES LES ARCHIVES
DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

L'ESSENTIEL

- L'expérience *IceCube* traque les neutrinos de haute énergie. Elle utilise une partie de la calotte de l'Antarctique comme détecteur.
- Les physiciens ont enregistré des dizaines de ces neutrinos jamais détectés auparavant.
- La direction de ces particules pointe, dans le ciel, vers l'événement cosmique qui les produit : c'est une nouvelle façon de faire de l'astronomie.
- Les physiciens espèrent utiliser ces neutrinos cosmiques pour étudier les supernovæ et les trous noirs au centre des galaxies.

Avec l'aimable autorisation de Sven Lidstrom/IceCube/NSF

LES NEUTRINOS

du bout du monde

Francis Halzen

**Télescope d'un nouveau type en opération
au pôle Sud, *IceCube* enregistre des neutrinos de très
haute énergie provenant des confins de l'Univers. Et qui
aideront à résoudre certaines énigmes cosmiques.**

L'OBSERVATOIRE DE NEUTRINOS
IceCube est installé en Antarctique,
à proximité de la base
américaine Amundsen-Scott,
située à 250 mètres du pôle Sud.
Ses capteurs optiques sont
profondément enfouis
dans la glace.

■ L'AUTEUR



Francis HALZEN est professeur de physique à l'université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis. Il dirige l'expérience *IceCube*.

Les neutrinos de haute énergie seraient produits par des événements violents dans la Galaxie et au-delà

En 2010, l'une des expériences de physique les plus ambitieuses a été lancée au pôle Sud. Enfoui dans la glace de l'Antarctique, le détecteur de particules géant *IceCube* enregistre le passage de neutrinos de haute énergie : des particules élémentaires insaisissables qui traversent presque tout ce qu'elles rencontrent sans laisser de trace. Le projet vise à utiliser les neutrinos pour étudier des phénomènes cosmiques lointains, en particulier certains processus parmi les plus violents dont on pense qu'ils produisent les rayons cosmiques, ces particules qui bombardent en permanence la Terre. *IceCube* est donc un télescope astronomique d'un nouveau type.

Les neutrinos sont des particules furtives. Leur masse est presque nulle et ils se propagent à des vitesses proches de celle de la lumière dans le vide. Leur charge électrique est nulle, ce qui explique pourquoi ils interagissent si rarement avec la matière. Lorsqu'ils arrivent sur Terre, la plupart poursuivent leur route comme si de rien n'était, filant à travers la planète. *IceCube* s'intéresse surtout aux neutrinos de haute énergie, d'autant plus rares et difficiles à observer. Nous n'avons donc pas été surpris que les données des premières années, obtenues alors que le détecteur était encore en construction, n'aient rien révélé d'extraordinaire. Mais en 2012, tout cela a changé.

Lors d'une téléconférence de routine entre membres de l'équipe, des motifs que nous n'avions jamais vus auparavant se sont affichés sur nos écrans. Les signaux reflétaient la détection de deux neutrinos d'une énergie plus de mille fois supérieure à celle des neutrinos les plus énergétiques jamais produits par un accélérateur sur Terre, et près de un milliard de fois à celle des neutrinos régulièrement émis par le Soleil. Une joie intense a envahi la salle quand nous avons compris que nous avions sous les yeux un phénomène qui allait changer la donne. Dans l'euphorie du moment, l'un de nos étudiants en thèse a surnommé Bert et Ernie les deux particules, comme les personnages de l'émission télévisée pour enfants *1, rue Sésame* (ces noms ont l'avantage d'être plus faciles à retenir et à reconnaître que les longues chaînes de chiffres que nous attribuons d'ordinaire aux événements de neutrinos).

Il nous a fallu encore une année et une analyse totalement repensée des mêmes

données pour nous assurer que nous avions bien affaire à ce que nous pensions : les premiers pixels d'une nouvelle carte de l'Univers dessinée par les neutrinos de haute énergie. Depuis, nous avons enregistré un total de 54 neutrinos de haute énergie, et beaucoup ont reçu des noms de Muppets, parmi lesquels Big Bird avait une énergie double de celle d'Ernie et de Bert.

Nous cherchons maintenant à identifier l'endroit du ciel d'où proviennent ces neutrinos, et comment ils ont acquis une telle énergie. Nous soupçonnons des événements cosmiques d'une extrême violence, telles des supernovæ ou d'autres explosions stellaires nommées sursauts gamma, deux phénomènes, survenus loin du Système solaire, qui produiraient des rayons cosmiques en grande quantité. Si nous parvenons à confirmer le lien entre les neutrinos de haute énergie et ces sources probables de rayons cosmiques, nous ouvrirons une nouvelle fenêtre sur le monde pour observer et mieux comprendre la physique de certains événements parmi les plus spectaculaires du cosmos.

Des particules imperturbables

Les rayons cosmiques, qui bombardent constamment la Terre depuis l'espace, sont constitués de protons et d'autres particules chargées de très haute énergie. Plus d'un siècle après leur découverte, nous ignorons toujours quels processus les engendrent. Quand ils arrivent sur Terre, nous ne pouvons pas déterminer leur lieu d'origine dans l'Univers parce que ces particules ne se déplacent pas en ligne droite. En effet, du fait de leur charge électrique, elles sont déviées par les champs magnétiques galactiques et intergalactiques. Leur parcours s'en trouve brouillé et il est impossible de savoir quel chemin ils ont parcouru à travers l'espace. Mais, par chance, la théorie suggère qu'ils interagissent aussi avec des photons sur leur lieu de naissance, et produisent ainsi des neutrinos.

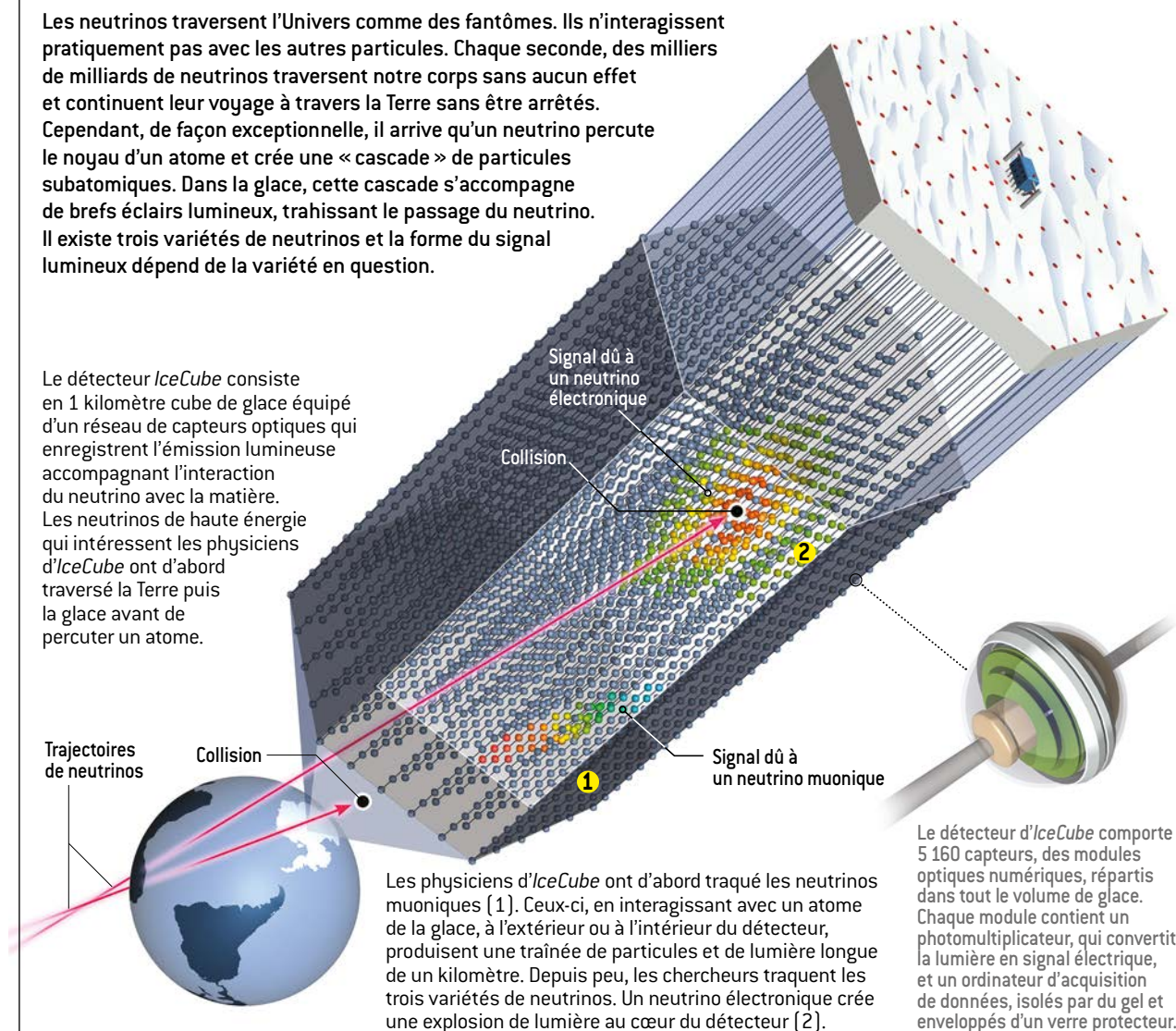
Les neutrinos, eux, se déplacent en ligne droite, ignorant la matière et les champs magnétiques sur leur passage. Par conséquent, les neutrinos pointent directement vers leur source et celle des rayons cosmiques.

Les astronomes ont quelques idées sur les mécanismes qui donnent naissance aux rayons cosmiques, mais ils ont besoin de

COMMENT CHASSE-T-ON LES FANTÔMES EN ANTARCTIQUE ?

Les neutrinos traversent l'Univers comme des fantômes. Ils n'interagissent pratiquement pas avec les autres particules. Chaque seconde, des milliers de milliards de neutrinos traversent notre corps sans aucun effet et continuent leur voyage à travers la Terre sans être arrêtés. Cependant, de façon exceptionnelle, il arrive qu'un neutrino percute le noyau d'un atome et crée une « cascade » de particules subatomiques. Dans la glace, cette cascade s'accompagne de brefs éclairs lumineux, trahissant le passage du neutrino. Il existe trois variétés de neutrinos et la forme du signal lumineux dépend de la variété en question.

Le détecteur *IceCube* consiste en 1 kilomètre cube de glace équipé d'un réseau de capteurs optiques qui enregistrent l'émission lumineuse accompagnant l'interaction du neutrino avec la matière. Les neutrinos de haute énergie qui intéressent les physiciens d'*IceCube* ont d'abord traversé la Terre puis la glace avant de percuter un atome.



Des neutrinos de différentes énergies

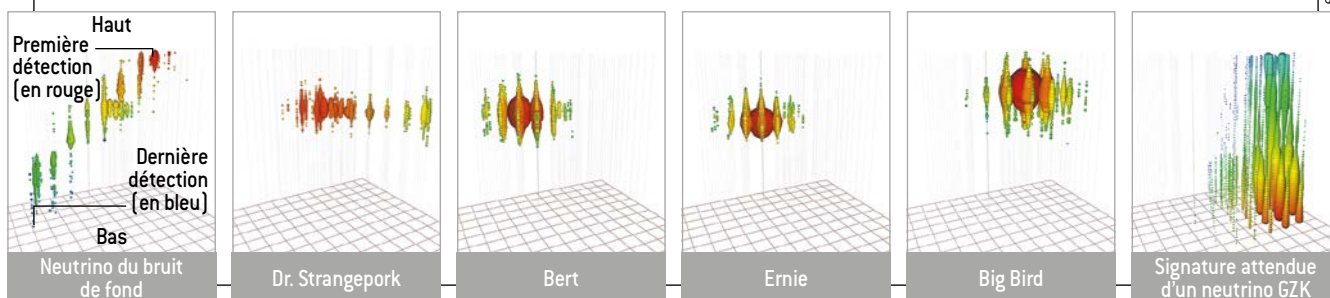
La plupart des neutrinos que détecte *IceCube* sont du « bruit de fond » liés à des processus se déroulant dans l'atmosphère. Leur énergie est assez basse et ils traversent le détecteur de haut en bas (figure de gauche). Le taux de détection est de 3 000 par seconde.

Les neutrinos cosmiques arrivent *a priori* de n'importe quelle direction. Les neutrinos muoniques cosmiques créent des traînées (tel l'événement Dr. Strangeport), alors que les neutrinos électroniques ou tauiques cosmiques apparaissent comme des explosions

de lumière (Bert, Ernie, Big Bird). Les physiciens traquent aussi des signaux de neutrinos GZK, produits par des interactions avec le fond diffus cosmologique. L'énergie d'un tel neutrino serait un millier de fois celle des autres neutrinos cosmiques (figure de droite).

Basse énergie ←

→ Haute énergie



Source: les six images du bas sont reproduites avec l'aimable autorisation de la collaboration IceCube; illustration de George Reiseck

nouvelles données pour confirmer ou écarter ces hypothèses. Première source probable des rayons cosmiques: la mort d'étoiles massives. À la fin de sa vie, quand son cœur n'est plus en mesure de supporter sa masse, une grosse étoile s'effondre sur elle-même en un objet dense, tels une étoile à neutrons ou un trou noir. L'effondrement s'accompagne d'une explosion très brillante (une supernova). Pendant ce processus, une grande part de l'énergie gravitationnelle de la matière qui tombe vers le centre de l'astre est convertie en une poussée qui accélère des particules, sans doute sous la forme d'ondes de choc.

Les vestiges de supernovæ ont été proposés comme source probable de rayons cosmiques dès 1943 par les astronomes Walter Baade et Fritz Zwicky; soixante-dix ans

plus tard, l'hypothèse est toujours débattue. Environ trois explosions de supernovæ par siècle dans la Voie lactée suffiraient pour expliquer le flux constant de rayons cosmiques observé dans la Galaxie.

Les rayons cosmiques extragalactiques, qui, comme leur nom l'indique, ont leur origine en dehors de la Voie lactée, sont en général plus énergétiques que les rayons cosmiques issus d'une source plus proche. Cela suppose qu'ils sont produits par des événements encore plus violents que les supernovæ, tels les sursauts gamma. Ces phénomènes, encore plus brillants que les supernovæ classiques, sont encore mal compris; ils se produisent probablement au cours de l'effondrement d'une étoile de très grande masse dans des conditions extrêmes.

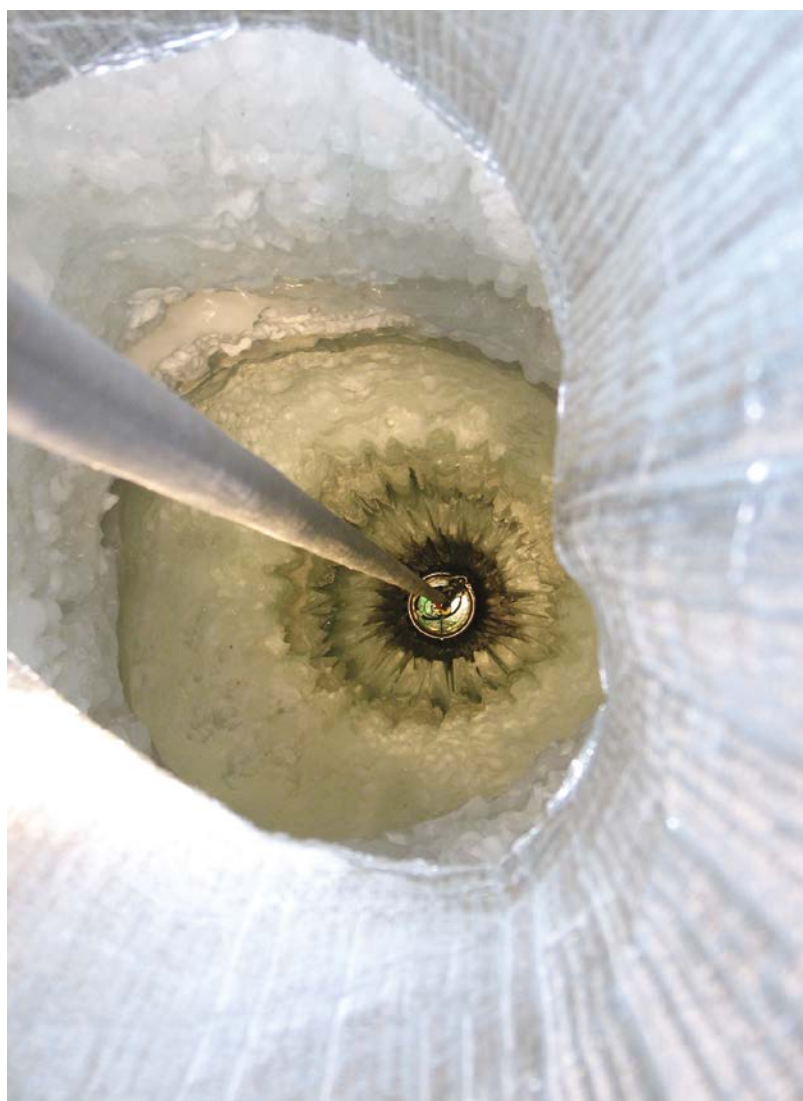
Autre source théorique de rayons cosmiques extragalactiques, les noyaux actifs de galaxies sont une classe de galaxies qui auraient en leur centre un trou noir super-massif où tombent de grandes quantités de matière. Cet environnement extrême entraînerait l'accélération de certaines particules jusqu'à des vitesses assez élevées pour qu'elles s'échappent de la galaxie et deviennent ainsi des rayons cosmiques.

La détection des neutrinos issus de ces processus est un défi pour les physiciens. Pour compenser le fait que ces particules ont une très faible probabilité d'interagir avec la matière, il faut construire des détecteurs gigantesques. L'expérience *IceCube* couvre un volume de près de 1 kilomètre cube. Elle utilise la glace de la calotte antarctique qui est un parfait détecteur naturel de neutrinos. Lorsque, exceptionnellement, un neutrino interagit avec un atome de la glace, celle-ci s'illumine en libérant une « cascade » de particules chargées qui émettent de la lumière bleue. Ce « rayonnement Tcherenkov » parcourt des centaines de mètres à travers la glace pure ultratransparente. Afin de le détecter, les physiciens ont disposé 5 160 capteurs optiques dans tout le volume du détecteur situé à 1 500 mètres au-dessous de la surface du pôle Sud, où la glace est âgée de près de 100 000 ans.

Des cascades de lumière

Les capteurs cartographient avec précision la cascade de lumière produite par les particules créées lorsqu'un neutrino entre en collision. La forme de la cascade révèle le type (on parle de « saveur ») du neutrino, son énergie et la direction d'où il provient. Les énergies d'Ernie, Bert et tous les autres neutrinos que nous avons vus jusqu'à présent étaient de l'ordre du pétaélectronvolt (PeV), soit 10^{15} électronvolts (eV), ce qui en fait les neutrinos les plus énergétiques jamais observés. Ernie et Bert avaient des énergies respectives de 1,07 PeV et de 1,24 PeV; ils ont produit des cascades de lumière (d'environ 100 000 photons) longues de plus de 500 mètres. Par comparaison, l'énergie des particules accélérées par le LHC (le grand collisionneur de hadrons du Cern) près de Genève, est de l'ordre du téraélectronvolt (TeV), soit 10^{12} eV, donc trois ordres de grandeur plus faible.

Les neutrinos enregistrés par *IceCube* ont une énergie si grande qu'ils proviennent certainement d'une source cosmique. Le



Avec l'aimable autorisation de Jim Haugen/IceCube/NSF

ENFOUI À ENVIRON 1 500 MÈTRES sous la surface de la calotte glaciaire de l'Antarctique, Le détecteur *IceCube* comprend 86 rangées de capteurs. Pour installer chaque rangée, il a fallu la faire descendre dans un trou creusé par une perforatrice à injection d'eau chaude.

Un télescope à neutrinos dans la mer Méditerranée

La découverte par *IceCube* de neutrinos cosmiques de haute énergie a véritablement révélé l'intérêt de l'astronomie fondée sur les neutrinos. Elle n'est cependant pas la seule expérience dans ce domaine. D'autres, telles *Antares* ou *KM3NeT*, sont installées dans la mer Méditerranée.

Le télescope *IceCube* utilise la calotte antarctique comme milieu de détection, mais d'autres projets ont considéré l'eau du fond des océans dont les propriétés optiques (notamment une diffusion de la lumière plus faible) offrent un meilleur pouvoir de pointage de la direction du neutrino que la glace. Dans les années 1980, les physiciens du projet américain *Dumand* ont tenté d'installer un détecteur au large de Hawaï, dans l'océan Pacifique, mais l'immersion dans les grands fonds était trop complexe.

En Europe, dans les années 1990, la collaboration *Antares* a repris le flambeau en proposant le déploiement d'un télescope sous-marin au large des côtes varoises, par 2500 mètres de fond. Achievé en 2008, le détecteur comprend 12 lignes de détection de 450 mètres de haut (voir la figure, à gauche). Le volume de détection est bien inférieur à celui d'*IceCube*; pourtant, les résultats d'*Antares* ont servi à réduire l'incertitude sur l'origine des neutrinos enregistrés par *IceCube*. En effet, le volume effectif d'*Antares*, pour les neutrinos muoniques, est similaire à celui d'*IceCube* pour les neutrinos électroniques, mais *Antares* offre une meilleure résolution angulaire. Ainsi, l'analyse des données a permis d'exclure que l'accumulation d'événements proches du centre galactique (voir la figure page 30) puisse provenir d'une source unique.

Les deux expériences sont ainsi complémentaires et l'équipe d'*Antares* compte établir de nouvelles limites sur les autres saveurs de neutrinos

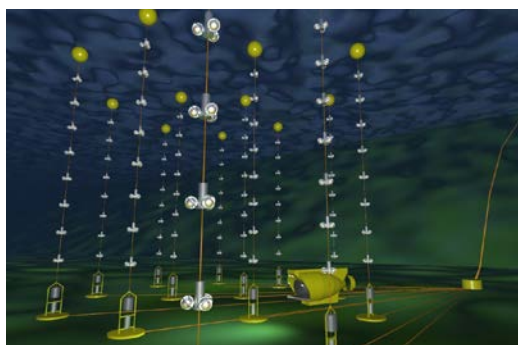
pour lesquels la résolution angulaire est inférieure à 3 degrés (à comparer à 15 degrés dans la glace).

Antares fournit aussi des informations quant à la nature des sources qui produisent les neutrinos les plus énergétiques détectés par *IceCube* (Ernie, Bert et Big Bird). Ainsi, certains noyaux actifs de galaxies connus pourraient être des sources, mais davantage de données seront nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

la coïncidence s'est malheureusement révélée fortuite!

Il faudra peut-être attendre la construction d'un détecteur plus grand dans la mer Méditerranée pour identifier les sources. Forte du succès d'*Antares*, la construction d'un tel détecteur a d'ores et déjà débuté. Le successeur, *KM3NeT*, comporte deux sites: l'un (*KM3NeT/Arca*), au sud de la Sicile, est optimisé pour la détection de neutrinos cosmiques avec un volume instrumenté de plusieurs kilomètres cubes; l'autre (*KM3NeT/Orca*), proche de celui d'*Antares*, est consacré à la mesure des propriétés des neutrinos. Ce dernier aura un maillage de photodétecteurs plus dense afin d'abaisser le seuil de détection en énergie au

électrons émis dans la désintégration radioactive du potassium 40, mais aussi par la bioluminescence des organismes marins. Cette dernière composante varie lentement en fonction des conditions environnementales (température, intensité des courants) qui intéressent au premier chef les biologistes. À l'instar d'*Antares*, *KM3NeT* sera un observatoire pluridisciplinaire abritant aussi des sismographes et des capteurs de pression intégrés dans les réseaux nationaux d'alertes aux séismes et aux tsunamis. Des capteurs acoustiques permettront le recensement et la surveillance des déplacements des populations des cétacés. Les capteurs



L'EAU PROFONDE de la Méditerranée est le milieu de détection des expériences *ANTARES* (à gauche) et *KM3NeT*. Celle-ci, en cours d'installation, sera équipée de modules optiques améliorés (à droite).

Une autre stratégie pour identifier les sources de neutrinos consiste à rechercher des neutrinos en coïncidence spatiale ou temporelle avec d'autres messagers cosmiques tels que les rayons gamma ou les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Cette approche multimessagers est activement poursuivie par *Antares*. Le dernier exemple en date était l'alerte lancée à la communauté des astrophysiciens le 1^{er} septembre 2015 après l'observation d'un candidat neutrino de haute énergie suivie d'une activité intense en rayons X dans le même champ de vue. Après une étude plus poussée,

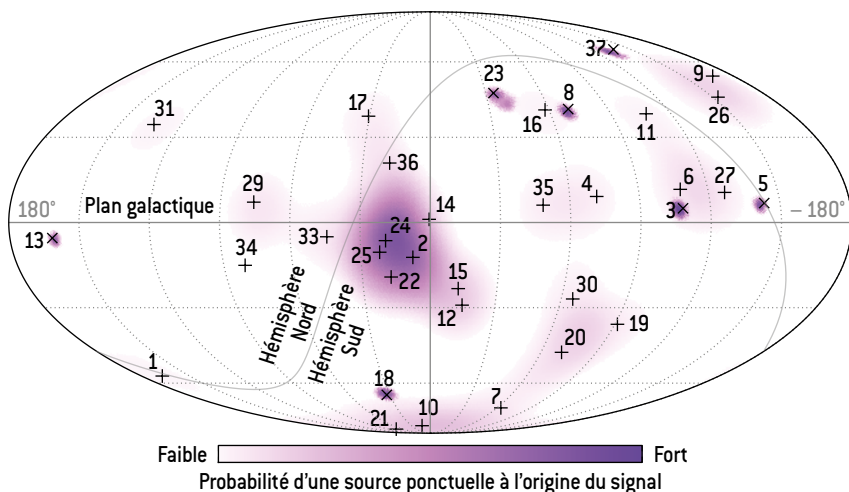
gigaélectronvolt. La première ligne a été immergée avec succès le 3 décembre 2015, et la construction pourrait être achevée à l'horizon de 2020.

Les modules optiques de *KM3NeT* comportent 31 petits photomultiplicateurs (voir la figure, à droite) au lieu d'un seul, plus grand, dans les modules d'*Antares* et d'*IceCube*. Les avantages sont nombreux: une plus grande surface de collecte, une meilleure directionnalité, un meilleur comptage des photons et donc une plus grande aptitude à rejeter le bruit de fond optique. Dans les abysses, ce dernier est principalement constitué de photons engendrés par les

physico-chimiques (O_2 , CO_2 , température et radioactivité) fourniront des mesures de variations sur de longues périodes reliées au changement climatique global.

Par ailleurs, les télescopes à neutrinos créent des ponts entre l'astronomie et la physique des particules. Ils pourront étudier les neutrinos produits dans l'atmosphère lors des bombardements de rayons cosmiques et apporter des informations sur la hiérarchie des masses des neutrinos, un paramètre fondamental encore inconnu (voir l'entretien avec Marco Zito, pages 32 et 33).

– **Antoine Kouchner**
APC, université Paris-Diderot



LA CARTE DES NEUTRINOS de haute énergie établie par *IceCube* répertorie la provenance des particules (qui sont numérotées). On note une accumulation de neutrinos proche du centre galactique. L'intensité de la couleur violette reflète la probabilité qu'une source ponctuelle soit à l'origine du signal. Certains neutrinos, très éloignés du plan galactique, sont originaires d'au-delà de la Voie lactée.

détecteur observe aussi des neutrinos produits localement par les rayons cosmiques, à raison de un toutes les six minutes. Ces neutrinos sont produits par l'interaction de rayons cosmiques avec des noyaux d'hydrogène ou d'oxygène de l'atmosphère terrestre. Mais parce qu'ils sont créés dans notre voisinage, ces neutrinos ne nous apprennent rien sur la nature des rayons cosmiques ou d'autres phénomènes astrophysiques. Nous devons donc filtrer ces importuns pour détecter les neutrinos cosmiques. L'expérience nous a appris à reconnaître les motifs lumineux produits par les neutrinos atmosphériques, et nous savons donc les ignorer.

Ainsi, nous pouvons être certains que les neutrinos dotés d'une énergie de l'ordre du PeV vus par *IceCube* proviennent des profondeurs du cosmos. Ils pourraient provenir des mêmes sources que les rayons cosmiques, comme nous l'avons vu, mais d'autres explications, plus exotiques, sont possibles. Comme le fait que les neutrinos soient liés à la matière noire, cette composante invisible et de nature inconnue qui constituerait plus de 80 % de toute la matière du cosmos. L'idée serait plausible si la matière noire était constituée de particules très lourdes ayant une durée de vie moyenne supérieure à l'âge actuel de l'Univers. Dans un tel scénario, les particules de matière noire pourraient de temps à autre se désintégrer et produire les neutrinos énergétiques que nous observons. Il est donc crucial de traquer la source des neutrinos pour tester les diverses hypothèses.

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Adrián-Martínez *et al.*, **First combined search for neutrino point-sources in the Southern hemisphere with the Antares and IceCube neutrino telescopes**, soumis à *ApJ*, en ligne, arXiv:1511.02149, 2015.

M. G. Aartsen *et al.*, **Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, n° 10, article n° 101101, 2014.

G. Gelmini *et al.*, **Des neutrinos pour mieux voir**, *Pour la Science*, n° 394, août 2010.

Avant la découverte des neutrinos dans la gamme du PeV, la recherche de neutrinos cosmiques par *IceCube* s'était presque exclusivement cantonnée à l'une des trois saveurs de neutrinos : les neutrinos muoniques (les deux autres étant les neutrinos électroniques et tauiques). Les physiciens s'attendent à ce que les neutrinos cosmiques soient à peu près également répartis entre les trois saveurs au moment où ils arrivent sur Terre, mais certains sont plus faciles à repérer à cause du signal qu'ils produisent dans notre détecteur.

Nous avons initialement optimisé *IceCube* pour traquer les neutrinos muoniques ; en percutant des atomes, ces particules produisent des traînées lumineuses de 1 kilomètre de long, qui traversent une grande partie du détecteur. Cette technique nous permet en quelque sorte de rendre notre zone de « collecte » des neutrinos plus grande que le volume réel du détecteur, en l'étendant à des neutrinos qui interagissent un peu en dehors du dispositif. Mais elle ouvre aussi la porte à une plus grande contamination de particules autres que les neutrinos cosmiques, et nous devons prendre des mesures supplémentaires pour filtrer ce fond.

Des neutrinos jamais détectés

Nous nous sommes aussi intéressés à une tout autre classe de neutrinos d'énergie extrêmement élevée, les neutrinos dits de Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK), qui se forment lors de l'interaction de rayons cosmiques avec des photons du fond diffus cosmologique, un vestige du Big Bang. De tels neutrinos auraient des énergies dans la plage des exaélectronvolts ($1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$). Cette seconde étude se recentrait sur une région plus limitée d'*IceCube*, à savoir la partie centrale du détecteur (environ la moitié du volume total), ce qui laissait moins de place à la contamination. Le grand avantage de confiner la recherche de cette manière est que le détecteur peut mesurer l'énergie complète déposée par chaque neutrino dans la glace avec une exactitude de 10 à 15 %, ce qui est nettement mieux que les mesures que nous pouvons faire sur les neutrinos interagissant à l'extérieur du détecteur. Nous pouvons aussi identifier les neutrinos des trois saveurs plutôt que restreindre la recherche à la variété muonique.

Depuis la découverte d'Ernie et de Bert, nous avons appliqué les deux méthodes

de détection des neutrinos muoniques et des neutrinos GZK pour d'autres neutrinos cosmiques. Les données de la première année ont livré 26 neutrinos dont l'énergie était comprise entre 30 et 1 200 TeV, soit un total de 28 avec Ernie et Bert. Ce nombre était assez élevé pour, statistiquement, être confiant à 99,9999 % qu'il ne s'agissait pas de neutrinos atmosphériques, qui auraient été bien moins nombreux. Quand nous avons ensuite ajouté une autre année de données, le total a grimpé à 54 neutrinos, dépassant le seuil statistique communément admis pour valider une « découverte ». Nous avons observé des neutrinos venant de l'espace profond !

Identifier les sources

D'où exactement dans l'Univers ces neutrinos proviennent-ils ? Les événements que nous avons collectés jusqu'à présent ne constituent pas un échantillon assez grand pour nous apporter une réponse concluante. La carte du ciel où sont indiquées

les directions d'arrivée (*voir la figure page ci-contre*) montre que ces neutrinos ne viennent pas tous de la Galaxie. En effet, la plupart viennent de directions très éloignées du plan galactique, et sont donc presque certainement d'origine extragalactique.

Il semble néanmoins qu'un nombre important de neutrinos proviennent du centre de la Voie lactée. Bert (numéroté 14 sur la figure), qui reste l'un des neutrinos les plus énergétiques jamais observés, fait partie de ce groupement et provient à moins de un degré du centre galactique. Nous ne sommes pas en mesure de dire avec certitude pourquoi cette région émet tant de neutrinos, mais nous savons que le centre galactique regorge de vestiges de supernovæ et contient en outre un trou noir supermassif – autant de sources possibles de ces neutrinos.

Nous espérons nous faire une meilleure idée de l'origine des neutrinos cosmiques à mesure que nous continuerons de collecter plus de neutrinos muoniques traversant la Terre pour arriver jusqu'à nous. Parce

que ces particules produisent des traînées d'un kilomètre de long, leur direction peut être restituée à moins de 0,5 degré près ; il en résultera une carte du ciel plus précise. En comparant ces directions à la position d'objets célestes connus, tels que des galaxies brillantes abritant un noyau actif ou des sites de sursauts gamma, nous serons enfin capables de déterminer certaines des sources de rayons cosmiques.

IceCube commence seulement à gratter la surface des découvertes possibles. L'expérience est construite pour fonctionner vingt ans, peut-être plus. Nous réfléchissons déjà à la suite. D'autres expériences traquent également les neutrinos (*voir l'encadré page 29*) et notre équipe propose de construire un détecteur étendu utilisant environ 10 kilomètres cubes de glace, soit une dizaine de fois le volume d'*IceCube*. Grâce à cette taille augmentée, nous pourrions enfin collecter suffisamment de neutrinos cosmiques pour déterminer avec confiance d'où ils émanent, eux et leurs cousins les rayons cosmiques. ■



Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs formation entreprises

14 axes de formation

Statistiques, bioinformatique et big data
Génie logiciel, modélisation, robotique
SIG, géographie, archéologie
Énergie, environnement
Électronique, optique, métrologie
Matériaux et molécules : mise en oeuvre
Matériaux et molécules : caractérisation
Microscopie
Chromatographie, spectroscopie
Spectrométrie de masse
Résonance magnétique nucléaire
Biologie
Expérimentation animale
Qualité, sécurité

Des formations aux technologies de pointe pour les ingénieurs et les techniciens

Des stages de courte durée (3 à 5 jours), se déroulant dans les laboratoires du cnrs, en effectifs réduits (env. 10 stagiaires)

Une pédagogie basée sur l'expérimentation

La possibilité de stages organisés en intra-entreprise

Découvrez tous nos stages 2016 : cnrsformation.cnrs.fr

cfe.contact@cnrs.fr

« La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence »

Découverts à partir de 1956, les neutrinos sont des particules fortement intrigantes, dont les physiciens cherchent à mesurer les propriétés. De ces dernières dépendrait l'évolution de l'Univers.



Marco ZITO est physicien à l'Irfu, au centre du CEA à Saclay, et membre de la collaboration T2K.

Entretien avec Marco Zito

Le prix Nobel de physique 2015 a été décerné à Takaaki Kajita et Arthur McDonald pour leur rôle majeur dans les expériences *Super-Kamiokande*, au Japon, et *SNO*, au Canada. Ces détecteurs ont contribué à mettre en évidence le phénomène dit d'oscillation des neutrinos. En outre, le Breakthrough prize 2016 a récompensé cinq collaborations de physiciens (*Super-Kamiokande*, *K2K/T2K*, *SNO*, *Daya Bay*, *KamLAND*) qui étudient les propriétés de ces oscillations. Marco Zito, physicien au CEA, membre de l'expérience T2K et auteur du livre *Dans le tourbillon des particules* (Belin, 2015), nous explique les enjeux de la recherche sur les neutrinos.

POUR LA SCIENCE

Pouvez-vous nous expliquer les étapes qui ont conduit à introduire le concept d'oscillation des neutrinos ?

MARCO ZITO : L'hypothèse de l'existence des neutrinos a été émise en 1930 par le physicien Wolfgang Pauli. Ces particules n'interagissent que très peu avec la matière et sont donc difficiles à détecter. Il a fallu plus d'une vingtaine d'années pour confirmer leur existence, grâce à une expérience utilisant

le cœur d'une centrale nucléaire, aux États-Unis, comme source de neutrinos.

Les physiciens se sont aussi intéressés aux neutrinos produits par le Soleil. Une de ces expériences, *Homestake*, ne détectait qu'un neutrino par jour au lieu de trois prévus par les modèles qui décrivent l'activité du Soleil. Une explication était proposée par le physicien italien Bruno Pontecorvo : l'« oscillation » des neutrinos.

PLS

De quoi s'agit-il ?

M. Z. : Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, associés à trois particules chargées, l'électron, le muon et le tau. Un neutrino peut changer spontanément de saveur au cours du temps : c'est l'« oscillation ». La théorie l'explique en définissant trois états de neutrinos, chacun associé à une masse. Les trois états de saveur et les trois états de masse sont différents, mais ils sont reliés suivant certains principes de la physique quantique. Chaque état de saveur correspond à une certaine combinaison des états de masse.

Or chaque état de masse est décrit par une onde ayant sa propre fréquence. Dès

lors, si un neutrino électronique émis par le Soleil, par exemple, vole vers la Terre, sa combinaison varie avec le temps. Les trois états de masse, dont les fréquences diffèrent légèrement, se déphasent, ce qui fait varier la saveur. Pour les autres particules fondamentales, les fréquences sont trop différentes pour permettre le phénomène d'oscillation.

PLS

Quand le phénomène d'oscillation des neutrinos a-t-il été confirmé ?

M. Z. : L'expérience *Homestake* présentait un déficit de neutrinos solaires ; d'autres expériences avaient noté une anomalie dans les neutrinos atmosphériques (des neutrinos produits par la collision de rayons cosmiques, surtout des protons de haute énergie, avec l'atmosphère terrestre). En 1998, l'expérience japonaise *Super-Kamiokande* a montré, grâce à l'analyse menée par Takaaki Kajita, que le déficit en neutrinos atmosphériques venant d'au-dessus du détecteur différait de celui associé aux neutrinos provenant de l'antipode et qui traversaient toute la Terre. C'était un indice de l'oscillation des neutrinos, la différence étant due aux distances inégales parcourues par les neutrinos atmosphériques.

Jusque-là, les expériences étudiant les neutrinos solaires étaient uniquement sensibles aux neutrinos électroniques. L'expérience *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), dirigée par Arthur McDonald, était sensible à toutes les saveurs. En 2001, les physiciens de cette expérience ont montré que le flux de neutrinos solaires était bien celui attendu par la théorie et qu'un tiers des neutrinos avaient une saveur électronique. Le prix Nobel 2015 récompense ces deux expériences.

PLS

Une nouvelle génération d'expériences étudie les oscillations ; qu'ont-elles découvert ?

M.Z. : Pour exprimer le lien entre les états de saveur et les états de masse des neutrinos, les physiciens utilisent une matrice qui dépend des masses et de trois paramètres nommés angles de mélange. L'étude des neutrinos solaires et des neutrinos atmosphériques a permis de mesurer deux des angles. Le troisième a été mesuré à partir de 2011 par l'expérience T2K, au Japon, puis avec grande précision par *Daya Bay*, en Chine.

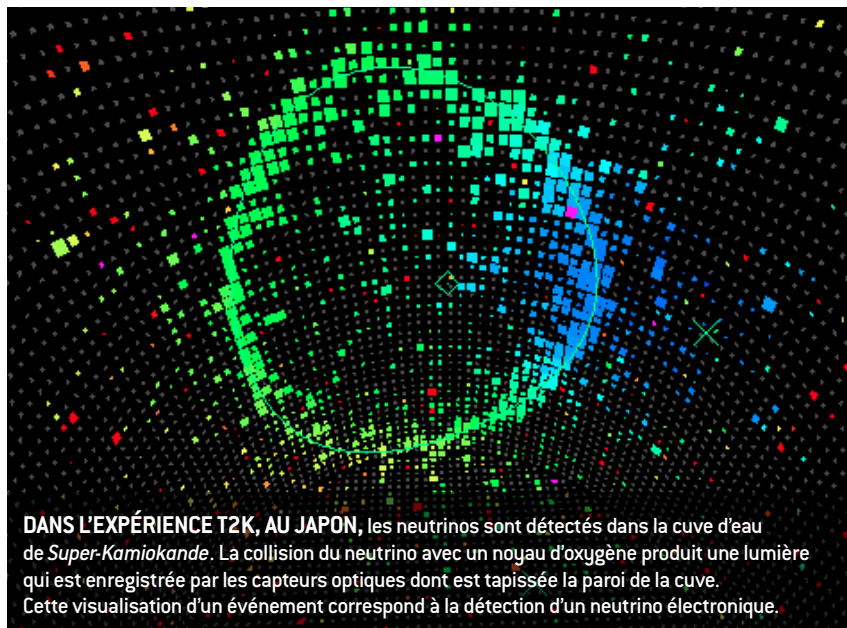
La matrice contient un dernier paramètre, qui, s'il est non nul, implique des différences dans la façon d'osciller des neutrinos et des antineutrinos. Il faudra peut-être attendre de futures expériences, telles *Hyper-Kamiokande*, au Japon, ou *DUNE*, aux États-Unis, pour mesurer ce paramètre.

PLS

Et qu'en est-il de la masse des neutrinos ?

M.Z. : C'est le sujet qui motive particulièrement la communauté des physiciens du domaine. La mesure directe de la masse des neutrinos est très difficile. L'expérience KATRIN, en Allemagne, devrait atteindre une sensibilité de deux dixièmes d'électronvolt, mais les neutrinos sont peut-être plus légers.

Ce que nous savons le mieux mesurer aujourd'hui, c'est la différence de masse entre deux types de neutrinos. Cependant, sur les trois masses, nous avons un problème de hiérarchie : nous ne savons pas si nous avons deux neutrinos très légers et un légèrement plus lourd, ou un très léger et



deux plus lourds. L'expérience NOvA, aux États-Unis, est similaire à T2K si ce n'est que la source et le détecteur sont distants de 800 kilomètres, au lieu de 290 kilomètres pour T2K. Sur une telle distance, les deux hiérarchies possibles se distingueraient par des différences dans les oscillations.

La question de la masse des neutrinos pose aussi des problèmes théoriques qui ouvrent une fenêtre sur la physique au-delà du modèle standard de la physique des particules. Elle requiert peut-être l'introduction de neutrinos, dits stériles, qui n'interagissent pas du tout avec la matière.

La connaissance des masses des neutrinos est cruciale en cosmologie, car elles pourraient aussi jouer un rôle sur la formation des grandes structures (galaxies et amas de galaxies). Et le neutrino intervient aussi dans des scénarios expliquant pourquoi l'Univers est constitué de matière alors qu'il a probablement débuté avec des quantités égales de matière et d'antimatière.

La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence. Les progrès ont été lents, mais ils ont à chaque fois conduit à une découverte. Les années à venir nous promettent encore de belles choses.

Propos recueillis par Sean BAILLY

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Zito, *Dans le tourbillon des particules*, Belin, 2015.

M. Hirsch et al., *Les neutrinos, messagers de l'inconnu*, *Pour la Science*, n° 431, septembre 2013.

T. Lasserre et D. Vignaud, *La mystérieuse identité des neutrinos*, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

A. McDonald et al., *L'énigme des neutrinos solaires résolue*, *Pour la Science*, n° 312, octobre 2003.

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 11 février 2016, de 16h à 17h, Marco Zito reviendra sur les enjeux de la recherche sur les neutrinos dans l'émission *La marche des sciences* sur France Culture. www.franceculture.com

Du GÉNIE par accident

Darold Treffert

Il arrive qu'un traumatisme crânien, un accident vasculaire cérébral ou une maladie neurodégénérative fasse surgir un étonnant don artistique ou intellectuel. Le génie serait-il à la portée de chacun ?



APRÈS UNE GRAVE BLESSURE À LA TÊTE,
Jason Padgett a commencé à visualiser
et à dessiner des formes géométriques complexes.

Photographie de Michael Chirard, figure de Jason Padgett



EN 2002, L'AMÉRICAIN JASON PADGETT a été victime d'une agression brutale, qui l'a fortement commotionné. Peu de temps après, il a commencé à voir des « images », qu'il transcrivit par la suite en dessins, tels ceux représentés ici. Il apprit que les motifs répétés qu'il dessinait étaient des fractales. Il fait à présent des études de mathématiques pour comprendre ces figures, et il a écrit un livre populaire sur ses expériences (*Struck by Genius : How a Brain Injury Made Me a Mathematical Marvel*, avec Maureen Ann Seaberg, 2014).

Nous avons du mal à croire vraies certaines histoires tant elles paraissent... incroyables. Voyez celles-ci. Orlando Serrell, un garçon de 10 ans, assommé un jour par une balle de baseball, découvre qu'il peut se rappeler les moindres événements vécus depuis lors. Une femme âgée, qui n'a jamais peint de sa vie, devient une artiste prodigieuse dès qu'elle commence à souffrir d'une démence évolutive. Un chirurgien orthopédiste frappé par la foudre se met à composer ses propres sonates et partage son temps entre concerts et médecine. La liste n'est pas close...

Ces personnes sont toutes « atteintes » du syndrome du savant acquis. Dans le « savantisme » (ou syndrome du savant), condition rendue célèbre par le film *Rain Man* en 1988, des individus ont dès leur plus jeune âge des talents extraordinaires, mais spécifiques : musicaux, artistiques, mathématiques, mnémoniques ou manuels. Ces dons contrastent avec leurs déficiences marquées pour le langage et les interactions sociales, entre autres. Dans *Rain Man*, par exemple, le personnage qu'incarne Dustin Hoffman, Raymond Babbitt – inspiré de Laurence Kim Peek (1951-2009) –, est un calculateur prodige doué d'une mémoire phénoménale, tandis que ses capacités cognitives et comportementales sont limitées en raison de son autisme : il ne sait pas nouer

L'ESSENTIEL

- Certaines personnes ayant subi une lésion du cerveau, dans sa partie gauche notamment, acquièrent des dons intellectuels très précis.
- Cette forme très rare de syndrome du savant est acquise, au contraire de celle que présentent certaines personnes dès leur plus jeune âge.
- Selon une hypothèse, l'atteinte d'une région du cerveau gauche libérerait des fonctions créatives ou intellectuelles liées au cerveau droit, ou provoquerait une réorganisation cérébrale qui réveillerait des capacités dormantes.

la moindre relation sociale, possède un maigre vocabulaire et se trouve incapable de résoudre des problèmes concrets très simples.

En revanche, dans le syndrome du savant acquis, c'est à la suite d'une soudaine atteinte cérébrale, un traumatisme à la tête par exemple, que des aptitudes artistiques ou intellectuelles qui touchent au génie se révèlent. Un « savant méconnu » sommeille-t-il en chacun de nous ? Si tel est le cas, pourrait-on trouver un moyen d'exploiter ces capacités enfouies sans souffrir de maladie ou d'une blessure cérébrale ?

Sculpteur ou mécanicien... mais surdoué

J'ai étudié le syndrome du savant durant une grande partie de ma carrière de psychiatre. Jusqu'au milieu des années 1980, je supposais qu'il s'agissait d'un état congénital. Un jour, après avoir visité la première exposition des sculptures exceptionnelles réalisées par Alonzo Clemons, en 1986, j'ai changé d'avis. Quand il était bébé, il paraissait apprendre vite. Mais vers l'âge de 3 ans, Alonzo Clemons fit une chute qui provoqua une lésion cérébrale. Son développement intellectuel ralentit subitement