

contrainte du matériau. Bien entendu, ce seuil augmente avec la concentration solide, car le réseau devient de plus en plus serré. De nombreux chercheurs ont constaté que cette augmentation se faisait selon une loi de puissance. Ce résultat est à peu près expliqué (par la théorie de la percolation) pour des concentrations proches de la concentration critique correspondant à l'apparition d'un seuil, mais reste mystérieux pour des concentrations nettement supérieures. Or le matériau constitutif des laves torrentielles ne contient pas seulement de l'eau et de l'argile, mais aussi des grains de toutes tailles. La plupart du temps, la fraction eau-argile seule est un fluide à seuil. La lave complète incluant les grains est un fluide de même type avec un seuil de contrainte qui augmente avec la concentration solide totale. Tant que la concentration solide n'est pas trop grande, les grains sont isolés les uns des autres par des couches plus ou moins épaisses de mélange eau-argile. Celui-ci forme une matrice continue où existe encore le réseau d'interactions entre particules d'argile, ce qui explique l'existence du seuil de contrainte du mélange eau-argile-grains. En revanche, il n'existe pas encore de théorie pertinente expliquant l'augmentation du seuil avec la concentration solide en grains ajoutés.

À concentration solide égale, la granulométrie fixe la viscosité : celle-ci est d'autant plus grande que la fraction de particules colloïdales (argileuses) est grande.

Lorsque le nombre de grains ajoutés est trop grand, beaucoup d'entre eux peuvent entrer en contact plus ou moins direct. Du coup, le comportement mécanique du mélange n'est plus dicté essentiellement par la matrice de boue fine qui enrobe tous les grains, mais par les contacts entre grains. Les physiciens étudient ces milieux granulaires plus intensément depuis quelques années. On sait notamment que, lorsqu'une masse de grains secs s'écoule sur un plan incliné à très grande vitesse, la «viscosité» du mélange est réglée par les collisions entre les particules. En revanche, dans un matériau granulaire du type laves torrentielles, où les grains restent en contact les uns avec les autres parce qu'ils sont tous englués dans un mélange liquide-solide, d'autres théories sont nécessaires, qui n'ont

pas encore été établies ou vérifiées. On sait cependant d'ores et déjà qu'il faut tenir compte de divers phénomènes : les grains peuvent frotter les uns contre les autres, entrer en collisions ou être animés d'un mouvement relatif lubrifiés par du fluide interstitiel. En s'appuyant entre autres sur les raisonnements ci-dessus, en vue d'applications sur le terrain, nous avons, au Cemagref, décidé de distinguer deux catégories principales de matériaux du point de vue mécanique : «granulaires» si la fraction solide critique qui induit un grand nombre de contacts entre les grains est dépassée ; «boueux» dans le cas contraire.

Modélisation des écoulements

C'est dans le domaine des fluides dits boueux que nous disposons actuellement des meilleures modélisations d'écoulement. Le seuil de contrainte est leur caractéristique essentielle et explique un certain nombre de leurs propriétés, notamment les dépôts épais de boue qui stagnent sur de relativement fortes pentes.

Par ailleurs, une instabilité hydrodynamique de type vague se manifeste aussi. Comme dans n'importe quel fluide, lorsque l'épaisseur du fluide est suffisamment faible et sa vitesse suffisamment forte, l'écoulement se déstabilise et se transforme en vagues déferlantes. Une petite perturbation de l'écoulement (variation de la rugosité du fond du canal, léger rétrécissement, etc.) provoque une ondulation de la surface libre de l'écoulement (en contact avec l'air), dont l'amplitude s'accroît jusqu'à occuper toute la hauteur de l'écoulement (voir la figure 5). L'écoulement permanent, uniforme au départ, se transforme en une succession de vagues plus rapides et plus hautes que l'écoulement initial. Finalement il existe souvent une gamme très étroite de pentes pour lesquelles un écoulement de boue est uniforme : au-dessous d'une pente critique, il n'y a pas d'écoulement, du fait du seuil de contrainte du fluide, au-delà d'une pente critique, à débit fixé, les vagues déferlantes apparaissent. Or ces deux pentes sont relativement proches.

Ces vagues augmentent le potentiel destructeur des écoulements de laves torrentielles. Par ailleurs, le

phénomène pourrait être à l'origine de la formation des bouffées successives observées dans les torrents.

On peut ensuite entrer dans le domaine de la modélisation des écoulements réels, à l'aide de modèles numériques notamment. Cela constitue par exemple l'objet des travaux d'équipes telles que celle de P.Y. Julien, à Fort Collins, aux États-Unis, ou D. Laigle au Cemagref, à Grenoble. Les modélisations effectuées permettent d'ores et déjà de prédire les zones susceptibles d'être touchées par d'éventuelles laves torrentielles dans les vallées. On a pu aussi réaliser des modèles réduits en similitude des écoulements naturels, de la même manière que l'on réalise des maquettes pour étudier le mouvement dans l'air ou dans l'eau des avions ou des bateaux. Cela a permis par exemple d'étudier la forme à donner à des ouvrages permettant le passage de torrents au-dessus de l'autoroute de la Maurienne actuellement en construction. Cette étude a été réalisée au travers d'une collaboration entre des bureaux d'études (HYDRATEC et SOGREAH) et avec l'aide d'un laboratoire de recherches (Cemagref). Ces modèles permettront aussi d'étudier l'impact des laves sur les ouvrages construits dans les torrents. Ce n'est plus le diable qui dirige les coulées de boue!

Archimède, émission scientifique de la Sept-ARTE, présentera *Les coulées de boue*, mardi 18 novembre 1997, à 20 h.

P. COUSSOT a été chercheur à la Division Protection contre les érosions au Cemagref de Grenoble. Il est actuellement chef de projet IRM (Imagerie par résonance magnétique) au Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil, à Champs-sur-Marne.

P. COUSSOT, *Mudflow Rheology and Dynamics*, IAHR monograph, Balkema, Rotterdam, 1997.

P. COUSSOT, *Les laves torrentielles. Connaissances de base à l'usage de l'ingénieur*, Coll. Études, Cemagref, 23, 1996.

S.B. SAVAGE, *The mechanics of rapid granular flows*, Adv. Appl. Mech., 24: 289-366, 1984.

T. TAKAHASHI, *Debris flow*, IAHR monograph series, Balkema, Rotterdam, 1991.

H. Van DAMME, E. LEMAIRE et P. LEVITZ, *La physique de la boue*, Pour la Science, septembre, 1991.

La découverte du quark *top*

TONY LISS • PAUL TIPTON

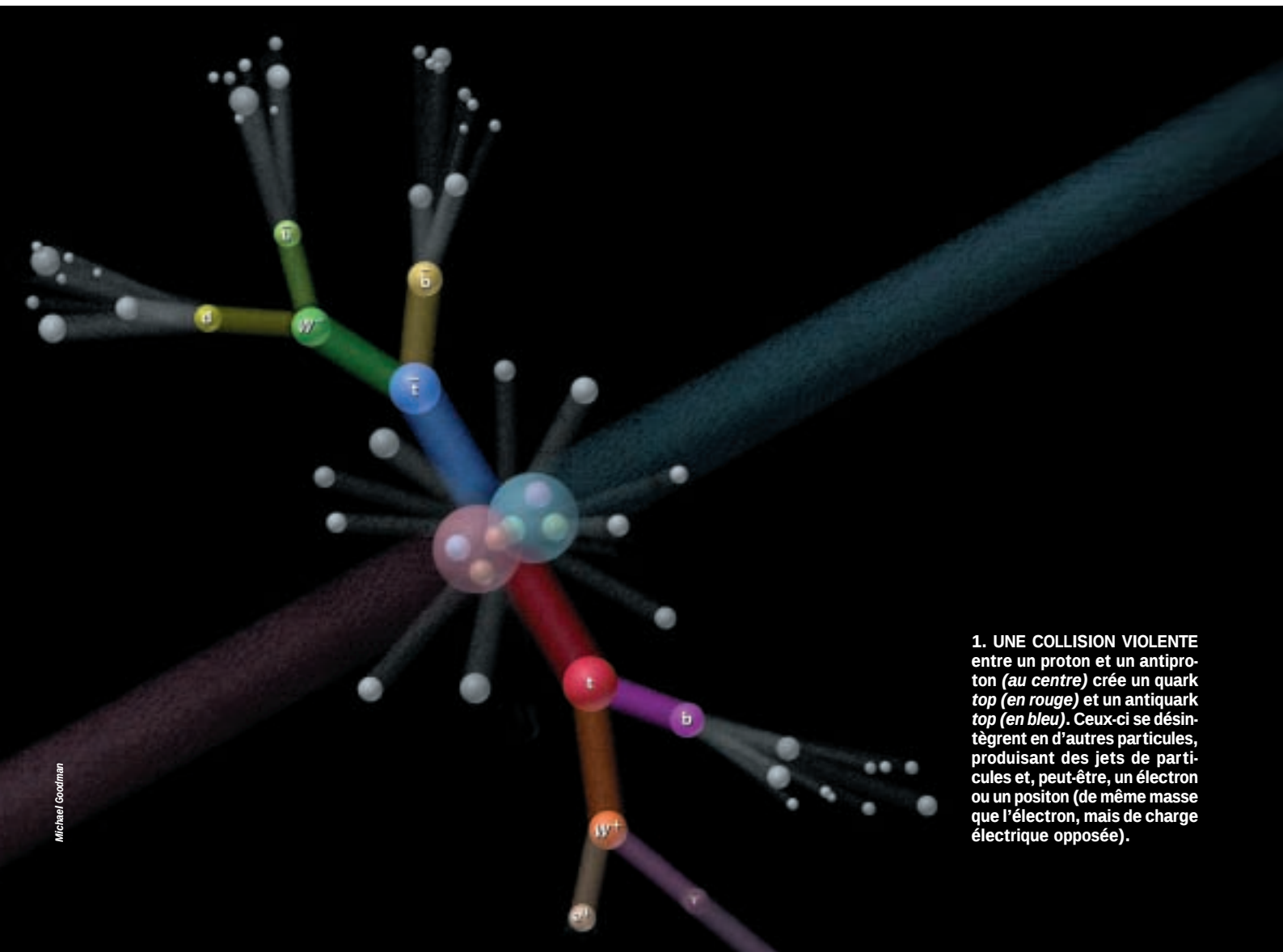
L'accélérateur de particules le plus puissant du monde, conduit par des milliers de personnes, a identifié le sixième et dernier quark.

En mars 1995, les physiciens rassemblés en hâte au Laboratoire Fermi, près de Chicago, assistèrent à un événement historique : les différentes équipes, chargées chacune d'un détecteur installé sur l'accélérateur, annoncèrent la découverte du quark *top*. Avec cette découverte de l'une des pièces manquantes du Modèle standard de la physique des particules, une quête de près de 20 ans s'achevait.

Le quark *top* est le sixième et, probablement, le dernier quark. Avec les leptons – l'électron et les particules du même type –, les quarks sont les briques fondamentales de la matière. Les quarks les plus légers, nommés *u* et *d* (pour *up* et *down*), sont les constituants des protons et des neutrons qui, en se liant à des électrons, forment tous les éléments de la Classification périodique de Mendeleïev. Les quarks plus lourds, comme les quarks *c* (charmé),

s (*strange*), *t* (*top*) et *b* (*bottom*) et les leptons lourds, bien qu'abondants juste après le Big Bang, ne sont produits aujourd'hui que dans les accélérateurs de particules. Selon le Modèle standard, qui décrit les interactions entre ces briques constitutives, les leptons et les quarks se groupent en paires, souvent nommées familles.

Depuis la découverte de son partenaire, le quark *b*, en 1977, les physiciens savaient que le quark *top* devait



1. UNE COLLISION VIOLENTE entre un proton et un antiproton (au centre) crée un quark *top* (en rouge) et un antiquark *top* (en bleu). Ceux-ci se désintègrent en d'autres particules, produisant des jets de particules et, peut-être, un électron ou un positon (de même masse que l'électron, mais de charge électrique opposée).

exister, mais il fut particulièrement difficile à trouver. Bien qu'il s'agisse d'une particule fondamentale, sans structure apparente, le quark *top* possède une masse de 175 milliards d'électronvolts/ c^2 (GeV/ c^2), égale à celle d'un atome d'or et bien supérieure à la plupart des prévisions (l'électron-volt est une unité d'énergie, reliée à la masse par la relation $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière). Le proton, composé de deux quarks *u* et d'un quark *d*, possède une masse légèrement inférieure à un GeV/ c^2 .

Des collisions par milliards

Pour créer un quark *top*, on devait donc concentrer une quantité considérable d'énergie dans une minuscule région de l'espace : c'est ce que font les physiciens quand ils accélèrent deux particules avant de les projeter l'une contre l'autre. Les expérimentateurs espéraient que, parmi les milliers de milliards de collisions provoquées, quelques-unes produiraient un quark *top*. À quelle énergie ? Le Modèle standard prédisait de nombreuses propriétés du quark *top*, comme sa charge électrique et son spin (ou moment cinétique intrinsèque), mais pas sa masse. La quête était hasardeuse...

Bien que les particules puissent être créées à partir d'énergie pure, certaines propriétés, comme la charge électrique, sont conservées : dans une collision, la charge électrique totale des particules est égale avant et après la collision. Un quark *top* ne peut naître par lui-même. La façon la plus simple de produire ce quark est de le créer avec son antiparticule, l'antiquark *top* : ce dernier possède la même masse que le *top*, mais le signe de toutes les autres propriétés est opposé, de sorte que toutes les quantités conservées s'annulent.

En 1985, quand le collisionneur du Laboratoire Fermi fut mis en service pour la première fois, la recherche du quark *top* avait commencé depuis huit ans. Les premières tentatives, menées au Collisionneur linéaire de Stanford, en Californie, et au Laboratoire DESY de Hambourg, n'avaient pas abouti. Au fil des ans, à mesure que les physiciens construisaient des accélérateurs plus puissants, la quête se poursuivait. Au début des années 1980, au CERN (le Laboratoire européen de physique des particules, près de Genève),

les collisions de faisceaux de protons et d'antiprotons de 315 GeV avaient engendré deux nouvelles particules : les bosons *W* et *Z*.

Tandis que les quarks et les leptons constituent la matière, ces particules véhiculent les forces entre particules, telle la force nucléaire faible, responsable de certaines désintégrations radioactives. Leur découverte renforçait le Modèle standard, qui avait cor-

rectement prédit leurs masses. On pensait alors que la découverte du quark *top* au CERN était imminente.

Ce fut plus difficile qu'on ne l'imaginait. À haute énergie, lors d'un choc entre des protons et des antiprotons, la collision se déroule entre leurs quarks et gluons constitutifs. Ainsi, chaque quark ou gluon n'a qu'une petite partie de l'énergie totale du proton ou de l'antiproton, et la collision doit être suf-

CONSTITUANTS DE LA MATIÈRE						CHARGE
QUARKS	MASSE (GeV/c ²)	 UP	 CHARM	 TOP		
		0,3	1,5	175		
		 DOWN	 STRANGE	 BOTTOM		
		0,3	0,5	4,5		
LEPTONS	MASSE (GeV/c ²)	 ÉLECTRON	 MUON	 TAU		
		0,0005	0,106	1,7		
		 NEUTRINO ÉLEC- TRONIQUE	 NEUTRINO MUONIQUE	 NEUTRINO TAUIQUE		
		0?	0?	0?		
PARTICULES VÉHICULANT LES FORCES						
	MASS (GeV/c ²)	BOSONS VECTEURS			PHOTON	GLUON
		 W ⁺	 W ⁻	 Z ⁰	 γ	 g
		80	80	91	0	0
		CHARGE	+1	-1	0	0
FORCE	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	ÉLECTRO- MAGNÉTIQUE	FORTE	

Le monde selon le Modèle standard

La matière est formée de deux types de particules : les quarks et les leptons, groupés en familles. Les quarks *u* et *d*, par exemple, forment les atomes avec les électrons ; ils appartiennent à la première famille. Les quarks plus lourds, tels le *top* et le *b*, ne sont créés que dans les accélérateurs. À chaque quark ou lepton correspond un antiquark ou un antilepton de charge opposée (non représentés).

Les forces sont transmises par un ensemble différent de particules : les bosons *W* et *Z*, le photon et les gluons. Les bosons *W* et *Z* transmettent la force nucléaire faible, en jeu dans les désintégrations radioactives. Par exemple, un quark *u* peut se transformer en un quark *d* en émettant un boson *W*, qui se désintègre alors en un quark ou en une paire de leptons. Le photon transmet la force électromagnétique, laquelle, à haute énergie, se confond avec la force faible. Les gluons transportent la force nucléaire forte, qui lie les quarks *u* et *d* en protons et en neutrons. Les physiciens croient à l'existence d'une particule supplémentaire, le boson de Higgs, mais ils ne l'ont pas encore découverte.

fisamment énergétique pour produire des quarks *top*. De telles collisions sont rares, et plus l'énergie nécessaire est élevée – c'est-à-dire plus la masse du quark *top* est grande –, plus elles sont rares.

Fin 1988, le CERN n'avait toujours pas observé le quark *top*, de sorte que sa masse était supérieure à $41 \text{ GeV}/c^2$. Entre-temps, le collisionneur proton-antiproton du Laboratoire Fermi (Tevatron) entra en service avec son détecteur CDF (l'acronyme de *Collider Detector at Fermilab*, soit «Détecteur de collisions du Laboratoire Fermi»). Malgré une brève et intense compétition entre nous et un groupe du CERN, la décennie 1980 s'acheva sans que le *top* apparaisse ; on savait seulement que sa masse était supérieure à $77 \text{ GeV}/c^2$.

À cette époque, le CERN avait atteint sa limite : il ne pouvait trouver le quark *top* si sa masse était supérieure à $77 \text{ GeV}/c^2$. En revanche, une autre équipe fut chargée d'un second détecteur, de l'autre côté de l'anneau du Laboratoire Fermi, nommée DØ (prononcez D-zéro) en raison de sa position le long de l'anneau. Dès 1992, la collaboration DØ commença à accumuler des données. Non seulement le fonctionnement des deux détecteurs créait une émulation bénéfique, mais les deux groupes pouvaient confronter leurs résultats et les vérifier.

Les expériences CDF et DØ sont deux collaborations internationales de

plus de 400 physiciens, auxquels s'ajoutent de nombreux ingénieurs, techniciens et personnels de soutien. Les deux équipes sont indépendantes et ne collaborent jamais aux analyses. Entre ces deux collaborations une compétition amicale s'est instaurée.

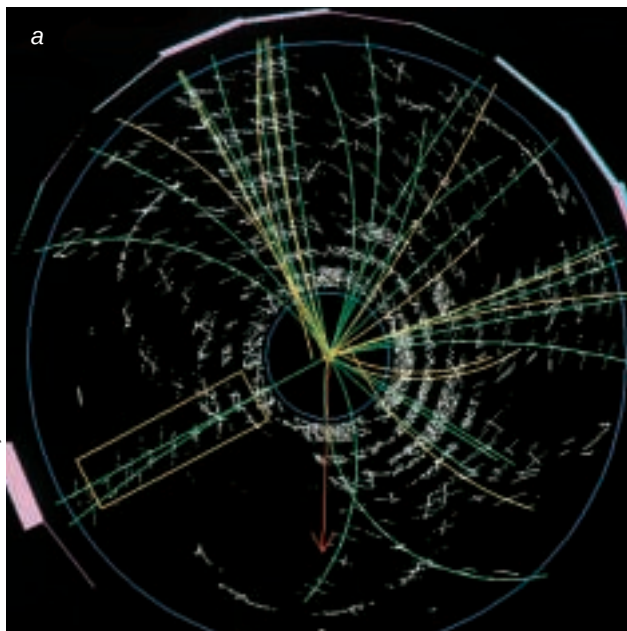
Conformément à une règle implicite, les résultats des analyses ne sont pas discutés en dehors de chaque groupe tant que les analyses ne sont pas terminées. Cependant, comme au moins trois physiciens ont un conjoint dans l'autre équipe, le secret dans la recherche du quark *top* paraissait difficile. Afin d'éviter les rumeurs, nous étions convenu que si l'un des groupes était sur le point de faire une annonce importante, il avertirait l'autre une semaine à l'avance. En nous fondant sur les meilleurs calculs théoriques, nous avions prévu qu'environ une collision sur dix milliards produirait un quark *top*. Le détecteur doit être suffisamment sensible pour extraire ces événements rares des différentes sources de bruit de fond.

Dix ans durant, les collaborations CDF et DØ ont construit d'énormes instruments, avec des centaines de milliers de canaux électroniques, afin d'identifier la «signature» du *top*, c'est-à-dire la trace qu'il laisserait dans le détecteur. Le détecteur CDF suit avec précision les particules individuelles dans un champ magnétique (en vue de mesurer leurs quantités de mouvement). La détection avec DØ est fon-

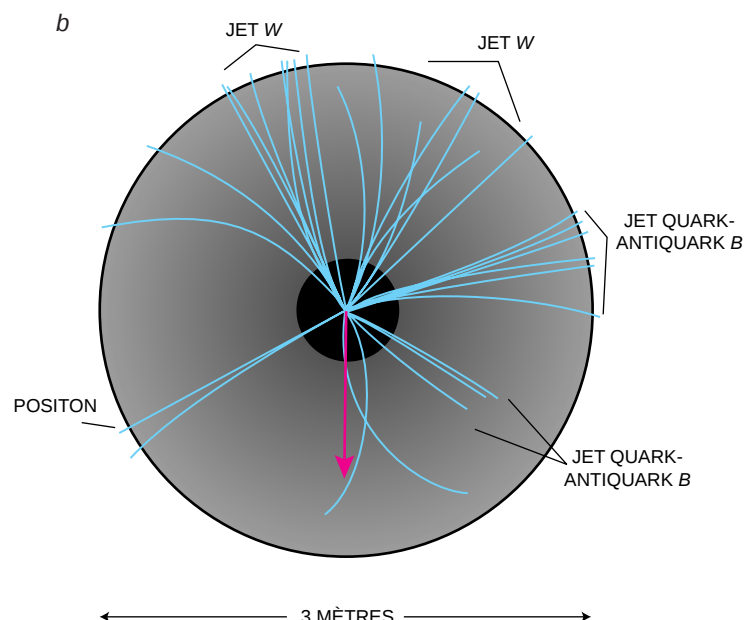
dée sur un calorimètre segmenté, qui mesure avec précision l'énergie de chaque collision.

Aussitôt produits, le quark *top* et son antiparticule se désintègrent. Contrairement aux quarks *u* et *d*, qui sont stables, le quark *top* a une durée de vie d'un millionième de milliardième de milliardième de seconde (10^{-24} seconde). Le Modèle standard prédit que, si le quark *top* est suffisamment lourd, il se désintégrera presque toujours en un boson *W* et en un quark *b*. Ainsi, la création d'un quark *top* conduit à deux bosons *W*, un quark *b* et un antiquark *b*.

Malheureusement, ni les bosons *W* ni les quarks *b* ne sont observables directement. La durée de vie du boson *W* est analogue à celle du quark *top*. Le quark *b* est lui aussi instable, bien qu'ayant une vie moyenne plus longue que celle du *top*. En outre, des quarks isolés – ou «nus» – ne sont jamais observés : en raison de la force nucléaire forte qui lie les quarks, ceux-ci apparaissent toujours couplés à d'autres quarks ou à des antiquarks. Les quarks sont ainsi rassemblés par paires, nommées mésons, ou par triplets, nommés baryons (les protons et les neutrons, par exemple, sont des baryons). Lorsqu'un quark est créé lors d'une collision, il «s'habille» d'un nuage de quarks et d'antiquarks. On observe alors un jet de particules qui se meuvent à peu près dans la même direction que le quark originel.



Fermilab National Accelerator Laboratory



Des jets partout

Le boson W peut se désintégrer en un quark et un antiquark de la même famille, comme un quark u et un antiquark d . Dans ce cas, le quark et l'antiquark se présentent dans un détecteur de particules sous la forme de deux jets. Cependant, le boson W peut aussi se désintégrer par la voie «leptonique», en un lepton chargé et un lepton neutre de la même famille, par exemple un électron et un neutrino.

Si le lepton chargé est un électron ou un muon (analogue à l'électron, mais plus massif), il peut directement être observé dans le détecteur. Toutefois, si c'est un tau (une version encore plus lourde de l'électron), il se désintègre assez rapidement, ce qui le rend difficile à identifier. D'autre part, le neutrino (dont la masse est nulle ou très petite) qui accompagne le lepton n'est pas détecté, car il interagit avec la matière par l'intermédiaire de la force faible. On détermine sa présence indirectement, car il emporte une partie de la quantité de mouvement de la collision : lorsque l'on additionne les quantités de mouvement de toutes les particules vues dans le détecteur et que l'on observe une diminution notable de la quantité de mouvement, après la collision, on suppose qu'elle a été emportée par un neutrino.

En août 1992, nous avons repoussé la masse minimale du quark top à 91 GeV/c². C'était un progrès impor-

tant, parce qu'il nous aidait à trouver le quark top . En effet, le boson W véhicule les forces entre quarks de la même famille, comme entre le top et le b . Ainsi ces particules sont couplées et peuvent se désintégrer les unes en les autres. Si le quark top avait été léger – moins de 75 GeV/c² environ –, un boson W , dont la masse est égale à 80 GeV/c², aurait pu se désintégrer en un quark top et un antiquark b . Nous savions alors que la seule manière de produire un quark top était de créer une paire quark-antiquark top .

L'une des caractéristiques d'une telle production est la présence de jets provenant des quarks b . Le quark b est éjecté avec d'autres particules qui constituent un méson ou un baryon, et il se désintègre un demi-millimètre après son point de création. En 1992, nous avons commencé à suivre précisément la trace des particules des jets en utilisant un instrument placé près de la région de collision des faisceaux (voir *Les détecteurs de particules en silicium*, par Alan Litke et Andreas Schwarz, *Pour la Science*, juillet 1995). Ce «détecteur de vertex» localise la trace d'une particule à 15 micromètres près (on nomme vertex le point de production des particules). En identifiant la plupart des traces dans un jet et en les extrapolant vers l'origine, nous espérons découvrir le point de désintégration du quark b et identifier ainsi le jet comme provenant d'un quark b .

À l'époque, la technique des détecteurs en silicium était neuve, et nous

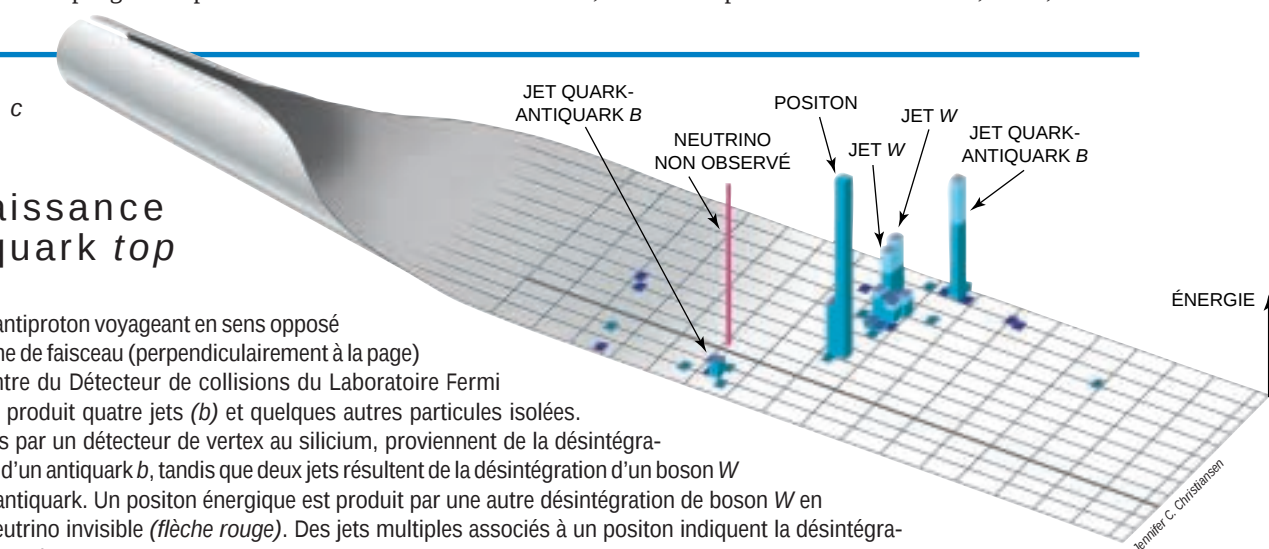
redoutions l'impact des milliards et des milliards de particules à travers le détecteur. Nous savions que le détecteur tout entier grillerait en une fraction de seconde si un incident dans l'accélérateur projetait le faisceau dessus. Aussi avons-nous conçu un dispositif de protection qui écarterait le faisceau du silicium en cas de problème. Alors même que nous apprêtions à nous servir du nouveau détecteur de vertex, l'équipe DØ mettait en service son nouveau détecteur, de l'autre côté de l'accélérateur.

En octobre 1992, à peine trois mois plus tard, nous apercevions le premier indice de la présence du quark top : une collision avait engendré un muon et un électron très énergiques, au moins deux jets, avec une quantité de mouvement totale qui avait beaucoup diminué. Nous avons analysé cet événement dans ses moindres détails et conclu qu'il provenait probablement de la désintégration d'un quark top . L'équipe DØ avait également observé un événement similaire, dont l'interprétation la plus probable était la présence d'un quark top . Cependant, un seul événement ne suffisait pas. Il nous fallait observer le quark top de diverses manières, afin de vérifier que nous n'étions pas en présence d'un bruit de fond reproduisant aléatoirement la signature du quark top . Nous avons alors poursuivi l'analyse de nouvelles données encore plus méticuleusement, mais, devant

La naissance d'un quark top

Un proton et un antiproton voyageant en sens opposé le long de la ligne de faisceau (perpendiculairement à la page) se heurtent au centre du Détecteur de collisions du Laboratoire Fermi (CDF) (a). L'impact produit quatre jets (b) et quelques autres particules isolées. Deux jets, identifiés par un détecteur de vertex au silicium, proviennent de la désintégration d'un quark b et d'un antiquark b , tandis que deux jets résultent de la désintégration d'un boson W en un quark et un antiquark. Un positon énergétique est produit par une autre désintégration de boson W en compagnie d'un neutrino invisible (flèche rouge). Des jets multiples associés à un positon indiquent la désintégration possible d'un quark top .

Un champ magnétique parallèle au faisceau courbe les trajectoires des particules chargées : la direction de courbure donne le signe de la charge de la particule, et le rayon de courbure indique sa quantité de mouvement. En outre, un calorimètre qui entoure la ligne du faisceau mesure les énergies des particules émergentes. Ses résultats sont représentés en (c). La hauteur d'un bloc indique l'énergie libérée par les particules dans le segment du calorimètre correspondant. La combinaison des dispositifs permet aux expérimentateurs de reconstruire l'événement originel (représenté page 68).



Une masse prévue

Pendant près de 20 ans, le quark *top* a été l'une des pièces manquantes du Modèle standard de la physique des particules. Après la découverte de son partenaire, le quark *b*, en 1977, les recherches entreprises dans des accélérateurs d'énergies de plus en plus élevées sont restées infructueuses, ce qui indiquait une masse de plus en plus élevée pour le quark *top* (la gamme de masse couverte par un accélérateur est limitée par son énergie).

En parallèle des recherches directes, l'interprétation théorique de nombreuses mesures effectuées avec d'autres accélérateurs (dont le collisionneur électron-positon LEP du CERN) a permis de cerner la masse du quark *top* : même s'il n'apparaît pas directement dans la désintégration des bosons *W* et *Z*, il intervient de manière virtuelle. Ainsi, en mesurant précisément la masse du boson *W* et du *Z* et leur probabilité de désintégration en différentes particules, on estime indirectement la masse du quark *top*.

Dans le cadre du Modèle standard, ces interprétations indiquaient un intervalle de masse accessible au collisionneur proton-antiproton du laboratoire Fermi, le Tevatron. La masse estimée se situait en effet entre 140 et 200 GeV/c², et l'énergie des faisceaux du Tevatron (900 GeV par faisceau) est suffisante pour produire des quarks de cette masse. Dans le Tevatron, cette énergie est atteinte à l'aide de dipôles supraconducteurs dont le puissant champ magnétique courbe les faisceaux dans un accélérateur circulaire de 6,28 kilomètres de circonférence.

Finalement, après les premières indications obtenues en 1994, la découverte du quark *top* a été annoncée officiellement en 1995 par les deux expériences fonctionnant sur le Tevatron, CDF et DØ. Pour obtenir quelques dizaines d'événements où un quark *top* a été détecté, il a été nécessaire d'observer plusieurs milliers de milliards de collisions entre protons et antiprotons car la production du quark *top* dans ces collisions est un phénomène rare. Pour extraire cette aiguille de

la botte de foin de toutes les collisions, il a fallu utiliser des traitements élaborés. Le nombre de collisions est tel qu'on ne les enregistre pas toutes : l'analyse en temps réel présélectionne les données intéressantes en utilisant toutes les possibilités des détecteurs. Les données sont ensuite exploitées par une analyse «hors-ligne».

Les détecteurs sensibles et compliqués, dont la taille est de l'ordre d'une dizaine de mètres et dont certains éléments permettent de mesurer les points de passage des particules à la dizaine de micromètres près, ont été construits par des collaborations internationales regroupant plusieurs centaines de physiciens provenant de différents continents. Un groupe français, du Commissariat à l'énergie atomique de Saclay, a ainsi participé à l'expérience DØ pour la construction d'une partie du système d'identification des traces.

Avec les données accumulées auprès du Tevatron entre 1992 et 1996, certaines caractéristiques du quark *top* ont été mesurées, et sont en accord avec les prévisions théoriques. Des mesures plus précises seront effectuées lors de la prochaine campagne de prises de données du Tevatron, qui commencera en 1999, et se poursuivront dans le collisionneur proton-proton du CERN, le LHC, dont le démarrage est prévu en 2005. Cet accélérateur devrait aussi permettre d'étudier un des aspects les plus méconnus de Modèle standard, qui est l'origine de la masse des différentes particules, notamment en cherchant le boson de Higgs. Après la découverte du quark *top*, ce boson de Higgs reste la seule particule prédite par le Modèle standard encore non observée à ce jour. La masse élevée du quark *top*, par rapport aux autres particules de matière, indique que celui-ci jouerait également un rôle particulier dans l'origine de la masse des particules.

Guillaume UNAL,
Laboratoire de l'accélérateur
linéaire, Orsay.

l'absence de résultats spectaculaires, nous savions que ce serait un travail de longue haleine.

Trois équipes analysaient les données fournies par le détecteur CDF. Notre premier candidat quark *top* fut découvert par un groupe qui recherchait les événements à deux leptons (issus de la désintégration de deux bosons *W*) et à au moins deux jets (provenant probablement des quarks *b*). Les deux autres groupes examinaient les événements à un lepton (désintégration d'un boson *W*) accompagné de jets (émanant de la désintégration de l'autre boson *W* et de quarks *b*). Ces deux équipes utilisaient des méthodes différentes : l'une employait les signaux de la chambre de vertex pour identifier les jets de quarks *b* ; l'autre recherchait les leptons de faible énergie, un signe révélateur de la désintégration d'un quark *b*.

Après un peu moins d'un an d'expérimentation, la limite de masse était poussée à 108 GeV/c² par l'équipe CDF et plus tard à 131 GeV/c² par l'équipe DØ, et nous étions toujours en train de chercher. Puis, en juillet 1993, lors d'une réunion de toute l'équipe CDF, les trois groupes présentèrent les résultats de leurs analyses en cours. Elles étaient très ambiguës individuellement, mais, mises ensembles, elles offraient un indice probant de l'existence du quark *top*. L'un de nous (P. Tipton) devait bientôt se rendre à une conférence et présenter nos derniers résultats, mais nous avons jugé que cela serait prématuré, car la communauté des physiciens conclurait que nous possédions de fortes indications de l'existence du quark *top* et demanderait à les vérifier. P. Tipton présenta donc seulement nos méthodes et les difficultés rencontrées dans la quête du *top*, sans mentionner les derniers résultats. Les rumeurs qui circulèrent alors immanquablement s'amplifièrent quand nous annulâmes un exposé prévu pour une conférence importante, au printemps 1994.

Parmi les milliers de milliards de collisions provoquées dans le détecteur CDF, nous avons isolé 12 événements qui semblaient provenir de la désintégration d'une paire quark-antiquark *top*. Comme d'autres mécanismes physiques ont une signature analogue, nous devions en estimer la probabilité. Après des mois d'efforts, nous avons calculé que 5,7 de ces événements devaient être des parasites. La probabilité que seul le bruit de fond

soit responsable des 12 événements était d'environ un sur 400 seulement.

Nous avons donc approfondi l'analyse des 12 événements. Une étude cruciale consistait à essayer de «reconstruire» la masse du *top*. En additionnant les énergies des jets et des leptons émis par une éventuelle paire quark-antiquark *top*, nous devions déduire la masse du quark *top*. Si les événements provenaient bien d'une paire, les masses calculées pour les différents événements devraient avoir toutes la même valeur : la masse réelle du quark *top*. Les masses calculées se révélèrent proches, ce qui donnait une masse du quark *top* d'environ 175 GeV/c². Beaucoup d'entre nous furent alors convaincus que nous avions enfin détecté le quark *top*.

Nous pensions initialement écrire quatre articles, un pour chaque type d'analyse et un résumant les résultats. À la réunion suivante de notre groupe, ce que nous avons nommé entre nous le massacre d'octobre, les quatre équipes présentèrent les articles au reste de la collaboration. Les critiques furent sévères et justifiées, car les articles étaient incomplets et donnaient une image incohérente du travail. Nous avons abandonné l'idée de quatre articles, et un petit groupe (dont les deux auteurs) se mit à rédiger un article unique.

La conciliation des vues des 400 coauteurs fut un tour de force. En outre, alors que nous approchions du but, après quelques mois de travail, nous recevions des corrections de physiciens qui n'appartenaient pas à l'équipe CDF et qui n'auraient pas dû avoir le manuscrit. Après de nombreux débats, nous avons décidé de ne pas présenter les résultats comme une découverte, mais de signaler que nous avions une indication de l'existence du quark *top*. L'article fut soumis pour publication le 22 avril 1994, et la plupart d'entre nous pensaient que c'était un très bon article, le résultat d'un excellent processus démocratique que nous espérions ne jamais devoir renouveler.

Toutes les épreuves et la documentation furent dissimulés dans un sous-répertoire de l'ordinateur de notre secrétaire, mais cette protection fut inefficace car, juste avant l'annonce officielle, deux postdoctorants publièrent sur le réseau Internet un article théorique ironique. Sur la base d'une théo-

rie extravagante, ils «prédisaient» la masse du quark *top* – la valeur mesurée par CDF jusqu'à la dernière décimale – et proposaient leurs services par la même occasion.

L'aboutissement

Quelques jours après la soumission de l'article, nous avons organisé un séminaire et une conférence de presse au Laboratoire Fermi pour annoncer la découverte. L'équipe DØ présenta aussi ses résultats : leurs données, bien que cohérentes avec celles de CDF, ne fournissaient pas d'indice convaincant de l'existence de quarks *top*, sauf dans le cas d'un événement enregistré au début de leur campagne de mesure. Cependant, le groupe avait supposé une valeur faible de la masse du quark *top* et n'avait donc pas optimisé la recherche pour des valeurs élevées.

L'équipe DØ reprit alors ses analyses et trouva quelques signes de

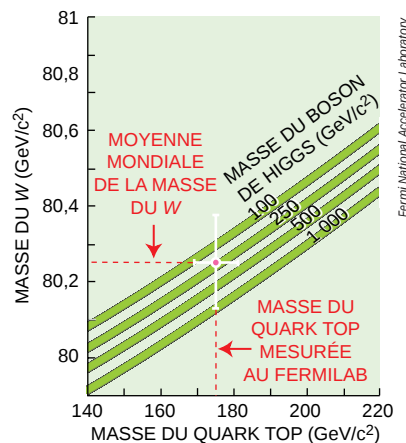
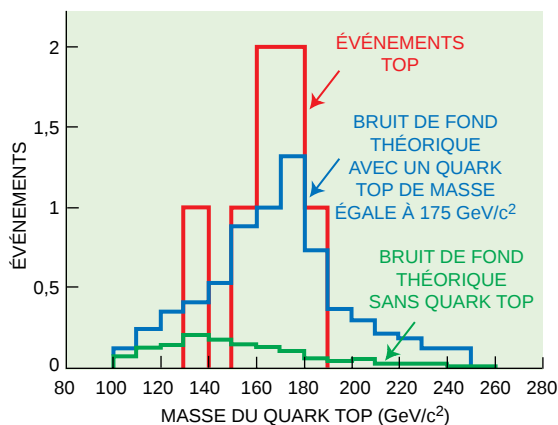
quark *top*. Entre-temps, les deux équipes collectèrent de nouvelles données, car nous avions besoin de deux fois plus d'événements pour confirmer la découverte. L'équipe CDF installa un nouveau détecteur de vertex au silicium, car le précédent avait été endommagé par irradiation. Nous avons mis au point de nouveaux algorithmes pour utiliser le détecteur de vertex dans la recherche d'événements *top*, mettant à profit notre expérience acquise. Lorsque suffisamment de données furent accumulées, le traitement révéla le quark *top* presque immédiatement.

Les présentations finales, le 2 mars 1995, montrèrent de façon convaincante que les détecteurs CDF et DØ avaient identifié des quarks *top*. Les deux équipes annoncèrent une probabilité combinée de moins d'une chance sur 500 000 pour que les événements retenus soient issus seulement du bruit de fond.

Aujourd'hui, nous avons enregistré plus de 100 événements où apparaît un quark *top*. Nous avons également entamé certaines recherches préliminaires de phénomènes au-delà du Modèle standard. La masse très élevée du quark *top* – la valeur actuelle est de 175,6 GeV/c² – suggère qu'il serait fondamentalement différent des autres quarks. Ainsi, la physique sous-jacente pourrait nous conduire au-delà du Modèle standard qui, malgré son succès, laisse de nombreuses questions ouvertes.

Dans le Modèle standard, la force faible, assurée par les bosons W et Z, et l'interaction électromagnétique, transmise par les photons, sont unifiées, aux très hautes énergies, en une seule interaction nommée électrofaible. Ces énergies existaient au début de l'Univers, mais le refroidissement de ce dernier nous montre les forces électromagnétique et faible sous des jours très différents. Le mécanisme de la brisure de leur symétrie initiale (ou découplage) est inconnu ; dans l'hypothèse la plus simple, elle serait provoquée par une particule, non encore découverte, nommée boson de Higgs.

À haute énergie, lorsque les forces électromagnétique et faible sont unifiées, les bosons W et Z, les photons, les leptons et les quarks sont tous de masse nulle. Aux énergies inférieures, lorsque la symétrie se brise, les bosons W et Z interagissent avec les



2. LA MASSE DU QUARK TOP calculée (en haut) à partir des 12 premiers événements identifiés par le détecteur CDF est voisine de 175 GeV/c². Malheureusement, la précision sur les masses du quark *top* et du boson W est insuffisante (en bas) pour prédire la masse de la particule de Higgs. Cette masse est comprise entre 100 à 1 000 GeV/c².

bosons de Higgs et deviennent massifs ; simultanément, les quarks et les leptons acquièrent également une masse.

Toutefois, tandis que les masses du boson W et du Z sont prédites par le Modèle standard, les physiciens doivent mesurer les masses des quarks et des leptons pour les décrire théoriquement : ils ajustent des paramètres qui décrivent l'intensité du «couplage» de chaque type de quark et de lepton avec le boson de Higgs.

Pour un électron, très léger, l'intensité de l'interaction est égale à 3×10^{-6} ; pour un quark *top*, elle est voisine de un. Ce couplage relativement fort avec le boson de Higgs et, dans une certaine mesure, la mystique associée à la valeur un, indiquent que le quark *top* jouerait un rôle particulier, mais lequel ?

En raison de sa masse élevée, le quark *top* est certainement le plus influent, en termes de ses interactions avec les autres particules. Une mesure précise de la masse du quark *top* et de la masse du boson W conduirait à une prédiction de la masse du boson de Higgs.

Certaines descriptions de la brisure de symétrie électrofaible ne font pas apparaître de boson de Higgs. Notamment l'une de ces théories parallèles le remplace par une paire quark-antiquark *top*. S'il existe ainsi des particules lourdes qui se désintègrent en paires quark-antiquark, on devrait observer plus de quarks *top* qu'on n'en attend dans le cadre du Modèle standard.

Le top du top

Avec sa forte masse, le quark *top* devrait se désintégrer en nouvelles particules. Certains théoriciens ont proposé que quelques-uns des événements enregistrés par le détecteur CDF contiennent des particules supersymétriques (voir *La nature est-elle supersymétrique ?*, par Howard Haber et Gordon Kane, *Pour la Science*, août 1986). La supersymétrie est une symétrie postulée qui attribue à toute particule du Modèle standard des partenaires encore non découverts. Si ces partenaires existent et sont plus légers que le quark *top*, ils pourraient apparaître dans les événements que nous avons identifiés. Par exemple, un quark *top* peut se désintégrer en son partenaire supersymé-



3. PRÈS D'UN MILLIER DE PHYSICIENS et de très nombreux techniciens ont utilisé les détecteurs CDF et DØ pour découvrir le quark *top*. Les premières pages de leurs articles respectifs relatant la découverte ne contiennent que des noms.

trique (le «*stop*»), tandis qu'un «gluino» (le partenaire hypothétique du gluon) se désintégrerait en une paire *top-stop*. Aujourd'hui, les possibilités sont variées : si l'augmentation du nombre de quarks *top* due au second mécanisme était compensée par la raréfaction due au premier mécanisme, on n'observerait pas plus, ni moins de quarks et d'antiquarks *top* que le Modèle standard n'en prévoit.

La supersymétrie ne prédit pas l'existence d'un seul boson de Higgs, mais d'une famille de quatre particules ou plus. Si elles existent et sont plus légères que le quark *top*, certaines de ces particules pourraient résulter des désintégrations des quarks *top*. Les équipes CDF et DØ cherchent ces particules hypothétiques, mais elles ne les ont pas trouvées.

Nous étudions une autre question fondamentale : les quarks sont-ils vraiment des particules élémentaires, sans constituants ? L'équipe CDF a récemment mesuré plus de jets de haute énergie qu'on n'en prévoyait. Au début du siècle, Ernest Rutherford révéla la présence des noyaux au sein des atomes par une diffusion des électrons à grand angle. De manière analogue, l'excès de jets énergétiques pourrait résulter de collisions entre des constituants des quarks plus petits qu'eux.

On ne retiendra cette conclusion que lorsqu'on aura éliminé toutes les autres possibilités. Notamment, on doit d'abord vérifier que la production

«excessive» de jets ne résulte pas de petites erreurs de prédiction. Nous étudions les différentes possibilités, et les données actuelles favorisent l'une de ces explications moins spectaculaires. Pour l'instant, nous devons conclure que le quark *top*, malgré sa masse importante, est dépourvu de sous-structure.

Tandis que le Laboratoire Fermi rénove son accélérateur, les équipes CDF et DØ améliorent considérablement leur détecteur. Nous recommençons à étudier des collisions en 1999. L'accélérateur modifié produira 20 fois plus de quarks *top* que précédemment, et les détecteurs les identifieront avec plus d'efficacité. Les deux groupes trouveront ainsi des quarks *top* 30 fois plus vite que par le passé, ce qui permettra

d'examiner plus en détail les caractéristiques de ce quark. En 2005, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN entrera en service. Il produira deux faisceaux de protons se heurtant à 14 TeV (téra, ou 10^{12} , électronvolts), soit sept fois l'énergie du collisionneur du Laboratoire Fermi, engendrant presque une paire de quark-antiquark *top* par seconde.

Ainsi, dans quelques années, les physiciens utiliseront le quark *top* pour étudier les nombreuses questions en suspens sur la matière et les forces qui gouvernent le monde physique. Quelles nouvelles lois physiques émergeront au-delà de ce que nous connaissons aujourd'hui ?

Tony LISS est physicien à l'Université de l'Illinois. Paul TIPTON travaille à l'Université de Rochester. Ils ont tous deux participé à la construction du détecteur CDF, au Laboratoire Fermi.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

F. ABE et al., *Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2626-2631, 3 avril 1995.

S. ABACHI et al., *Observation of the Top Quark*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2632-2637, 3 avril 1995.

Chris QUIGG, *Top-Ology*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 20-26, mai 1997.

