LE CERN, DU LEP AU LHC

Malgré quelques alertes passées et un régime amaigrissant abusif, le CERN est un quinquagénaire plutôt bien portant. Fidèle aux objectifs qui lui ont été fixés il y a un demi-siècle, porteur de la conception novatrice d'une coopération scientifique ouverte, l'Organisation a su réunir la créativité d'un grand nombre de nationalités, d'horizons et de domaines scientifiques divers et devenir le centre mondial de la Physique des Particules. Ce statut fait naturellement du CERN un quinquagénaire très entreprenant, dont les activités sont en pleine évolution. Une revue des transformations ne saurait s'ouvrir que sur la raison d'être du CERN, son apport à la Physique des Particules.

Des électrons aux protons

La mutation qui conditionne toutes les autres est bien sûr le passage d'un collisionneur au suivant, du LEP au LHC, qui fait du CERN l'un des plus grands chantiers actuels au monde (La Recherche, n0 358, nov 2002).

Le LEP (Large Electron Positron Collider) a produit sa physique de juillet 1989 à novembre 2000*. Des électrons et des antiélectrons, groupés en quatre paquets (chacun de $\sim 10^{11}$ particules) et tournant en sens inverse dans un anneau souterrain de 27 km de circonférence (soit à raison de ~10000 tours par seconde), se rencontraient en quatre points d'interaction. Les particules produites dans les collisions d'un positon (e^+) et d'un électron (e^-) étaient détectées, mesurées et identifiées par quatre grands détecteurs*. Les projectiles, guidés par des aimants, focalisés par des lentilles magnétiques, circulaient dans un tube au vide meilleur qu'intersidéral, si bien qu'une fois injectés les faisceaux pouvaient subsister des heures.

Dans une première phase, dite du LEP1, l'énergie E conférée aux faisceaux était telle que la rencontre e^+e^- produise un Z^0, le quantum neutre de l'interaction faible, dont la masse est environ 91 GeV (donc E = 1/2 □ 91 GeV). 18 millions de

bosons Z^0 ont été enregistrés et toutes les propriétés de cette particule déterminées avec une extrème précision, ce qui, nous le verrons, n'est nullement de l'art pour l'art. Dans la seconde phase (LEP2), l'énergie des faisceaux a été augmentée progressivement. Franchi le seuil de production des paires de bosons $W^{\pm}$

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-,$$

environ 80000 de ces particules ont été produites et étudiées. Puis, à la recherche du Boson de Higgs ou d'autres nouveautés, l'énergie a été poussée aussi haut que possible. Les $e^{\pm}$, particules légères, "n'aiment pas les virages": accélérés transversalement, ils émettent du rayonnement synchrotron et subissent par tour une perte d'énergie croissant comme E^4. Au LEP, pour une énergie du faisceau E =100 GeV, cette perte était de 2.5 GeV, limite de ce que le parc de cavités accélératrices supraconductrices pouvait fournir.

Le LHC (Large Hadron Collider) est un collisionneur proton-proton qui sera situé dans le même anneau, d'où les composants du LEP ont été retirés, et fonctionnera à partir de 2007. Pour les protons, particules lourdes (environ 2000 fois plus que l'électron), l'énergie perdue par rayonnement synchrotron est négligeable. A rayon de courbure donné, l'énergie accessible ne dépend que du champ magnétique, qu'il s'agit donc de maximiser. Avec un champ de ~ 8.5 Tesla, on atteindra 7000 GeV (7 TeV) par faisceau.

Des cavités accélératrices aux aimants

Du LEP2 au LHC, le défi technologique passe donc des cavités accélératrices aux aimants. La conception, la réalisation et l'exploitation d'environ 300 cavités supraconductrices d'un type nouveau (figure 1a) fut la grande aventure du LEP2. Réaliser le parc des ~1250 aimants dipolaires de 15 m de long nécessaires au LHC est une entreprise de plus grande envergure encore dont la conception a été faite au CERN et la réalisation confiée à l'industrie européenne. Leur schéma est inédit: une configuration dite "deux-en-un" (figure 1b), offrant par aimant

deux canaux magnétiques à champs opposés, comme le veulent deux faisceaux de même signe circulant en sens inverse. Ces aimants fonctionnent à la température de l'hélium superfluide, soit 1.9 degré Kelvin. Après le tokamak Tore Supra de Cadarache, le LHC sera donc le second grand projet à tirer parti des exceptionnelles propriétés de l'hélium dans cet état. Le lecteur, invité à venir s'en rendre compte par lui-même en visitant les installations, imaginera aisément l'ampleur et la complexité du projet.

De 100 GeV au TeV d'énergie disponible

A priori le gain en énergie du LEP au LHC est d'un facteur 70. En réalité les $e^{\pm}$ sont des particules élémentaires, actuellement considérées comme "ponctuelles" (leur taille est inférieure à 10^{-17} cm soit un dix-millième du rayon du proton): leur collision produit donc une densité d'énergie très élevée. Au contraire les protons sont des "sacs à partons", quarks, antiquarks et gluons. Ce sont surtout les collisions "dures" entre partons qui présentent de l'intérêt. L'énergie moyenne des partons n'est qu'une fraction de celle du proton et le gain réel du LEP au LHC est plutôt d'un facteur dix: on passe de 100-200 Gev à ~1-2 TeV, ce qui est déja un progrès remarquable. En outre il n'y a pas de coupure brutale et des collisions d'énergie plus élevée, mais moins fréquentes, sont possibles.

Ce domaine d'énergie correspond en effet à la " transition électrofaible", phase au cours de laquelle les particules élémentaires ont acquis leur masse et la symétrie électrofaible s'est brisée, le photon et le Z^0, jusque là frères jumeaux, devenant fort dissemblables. En termes d'évolution de l'Univers, cela s'est passé environ 10^{-11} seconde après le Big Bang. Alors que le LEP a seulement abordé la région basse de ce domaine d'énergie, le LHC l'explorera totalement.

L'intéret de couvrir ce domaine vient de la conviction qu'il doit s'y passer quelque chose, même si on peut hésiter sur la nature exacte des nouveautés. Un petit retour en arrière nous aidera à mieux saisir l'argument. La version initiale de

l'interaction faible, dite de Fermi, était une interaction de contact entre les particules protagonistes, sans l'intervention d'une particule intermédiaire. Mais la probabilité de cette interaction de Fermi croissait de manière déraisonable avec l'énergie. Par contre la version moderne de l'interaction faible, qui fait appel à l'échange de bosons massifs, prédit correctement sa dépendance en énergie. La découverte au CERN des "Courants Neutres" en 1973, celle des bosons W et Z en 1983, puis les mesures précises du LEP l'ont triomphalement validée. Reste cependant un problème: les bosons massifs, en plus de leurs deux états transverses de spin (analogues aux polarisations circulaires droite et gauche du photon), possèdent un état de spin longitudinal. L'interaction faible entre bosons dans cet état de spin continue à se mal comporter: elle croît trop vite avec l'énergie et violerait l'unitarité, c'est-à-dire conduirait à une probabilité d'occurrence des phénomènes supérieure à un, si rien de nouveau ne se produisait en dessous du TeV. Fort des enseignements du passé, on peut donc imaginer que le médiateur de cette interaction soit une particule lourde nouvelle. C'est en effet le rôle que remplit le boson de Higgs dans le Modèle Standard (MS). Une autre possibilité serait que les bosons, dans leur état de spin longitudinal, se mettent à interagir d'une façon particulière, similaire à l'interaction forte entre pions étudiée dans les années 60, mais intervenant à une toute autre échelle d'énergie, trois ordres de grandeur plus haut.

De la précision de mesure à l'observation directe

L'apport scientifique du LEP a été célébré à juste titre. Avec le collisionneur américain SLC (SLAC Linear Collider, de Stanford), il a révolutionné la variété, la qualité et la précision des tests auxquels ont été soumises les prédictions du Modèle Standard (MS). Dans le secteur du Z^0 (dit des "Courants Neutres") la confrontation avec le MS s'est faite au niveau du pour mille. En aucun cas le MS n'a été pris en défaut. Par contre son secteur scalaire (le secteur de Higgs), a priori le plus discutable, n'a subi qu'un début d'exploration.

Le succès du LEP tient à la subtilité des effets observés. Le vide quantique fluctue sans cesse en paires particule-antiparticule, qualifiées de virtuelles, et dont la durée de vie est d'autant plus brève qu'elles sont lourdes. Il va de soi que ce discret remue-ménage est hors de portée de l'observation courante. Mais avec une sonde de la finesse du LEP leur existence peut néanmoins conduire à des effets observables et mesurables.

Le premier est que la valeur de quantités comme les "constantes" de couplage des diverses forces dépend en fait de l'échelle d'énergie du processus considéré. Le LEP a mesuré avec une grande précision les couplages des interactions forte, faible et électromagnétique à l'échelle électrofaible. On sait, dans le cadre d'un modèle donné, les extrapoler vers les très hautes énergies. Cet exercice indique une convergence approximative des couplages dans le cadre du MS, mais celle-ci devient quasi-exacte dans sa version supersymétrique (figure 2). Ce résultat frappant suggère une "Grande Unification" (GU) vers 10^{16} GeV et constitue le meilleur indice en faveur de la Supersymétrie (SUSY) (la Recherche, n0 338, jan 2001).

Le second effet potentiel des particules virtuelles est de modifier légèrement la valeur numérique de certaines observables physiques. Une précision suffisante peut alors fournir indirectement de l'information sur ces particules, même si elles sont trop lourdes pour être "réellement" produites dans la réaction. Au LEP deux au moins étaient dans ce cas: le quark top, pesant 178 GeV environ et donc trop lourd pour être produit en paire top-antitop, mais dont l'existence ne faisait guère de doute, et le toujours hypothétique boson de Higgs. Les effets indirects attendus de ces objets sont toutefois bien différents: fort pour le top (quelques pourcents) et quadratique en fonction de sa masse, très petit pour le boson de Higgs et ne dépendant que logarithmiquement de sa masse. Pour reprendre une image due à G. Altarelli, le chercheur du LEP était comme un chasseur de brousse, l'oreille collée au sol et voulant détecter le pas feutré d'un tigre alors qu'un éléphant piétinait le sol non loin. Le LEP s'est vite trouvé en mesure de "sentir" l'effet du top et d'évaluer

sa masse (figure 3a), qui s'est révélée être en parfait accord avec la valeur "directe"obtenue plus tard par le Tevatron de Fermilab quand il a découvert le top en 1995. L'éléphant ainsi calmé, il a été possible d'entendre le tigre, ou du moins un bruit ressemblant à son pas. La figure 3b montre la masse attribuée au boson de Higgs à partir des mesures des quantités électrofaibles du LEP/SLC, interprétées dans le cadre strict du MS, où ce boson est l'unique objet manquant. On trouve qu'il est léger, de masse inférieure à 220 (280) GeV pour une masse de top de 175 (180) GeV. Ce résultat est en fait une moyenne qui masque un certain désaccord (2.7 σ) entre les deux mesures les plus précises. La recherche directe infructueuse du boson de Higgs au LEP2 l'exclut jusqu'à une masse de 114 GeV (avec toutefois une légère indication positive vers 115 GeV, la Recherche n0 364 mai 2003), ce qui est parfaitement compatible avec l'indication indirecte. Il est certes possible, surtout si l'on sort du cadre du MS, d'imaginer des conspirations d'effets simulant celui d'un boson léger. Mais, avant de chercher midi à quatorze heures, il faut tester en priorité son existence en allant y voir, et telle est la première mission du LHC.

La sensibilité des phénomènes de basse énergie à des particules lourdes, connues ou hypothétiques, peut paraître une aubaine, en particulier à qui rêve d'économies. Hélas, même si l'effet du top était net, pour des raisons spécifiques, et celui du présumé Boson de Higgs encore décelable, la règle est plutôt l'inverse, les hautes masses se découplant des effets à basse énergie. Il en va ainsi de SUSY, particulièrement apte à se dissimuler: même si elle était aux portes d'une découverte directe, les mesures électrofaibles ne nous le diraient pas clairement. Les ajustements globaux des données actuelles renvoient dos-à-dos le MS et SUSY. Le LEP, faute d'avoir couvert la région de masse attendue pour le plus léger de ses bosons de Higgs (<130 GeV dans les modèles usuels de SUSY), ne peut donc pas se prononcer sur sa réalité. Le seul indice encourageant reste la convergence des couplages citée plus haut.

A basse énergie non plus, les indicateurs potentiels de nouvelle physique les plus en vue (le facteur g-2 du muon*,

certains modes rares du B, etc), malgré la qualité du travail accompli, n'apportent actuellement aucune conclusion ferme.

En bref, rien ne saurait remplacer l'observation directe des phénomènes nouveaux et donc la quête des plus hautes énergies et luminosités possibles. Telle est la mission du LHC.

Des diverses extensions du MS susceptibles de résoudre les plus sérieux de ses problèmes, SUSY est la plus en vue. Elle remplit bien son rôle à condition que les partenaires introduits soient relativement légers (100 GeV à quelques TeV), ce que semble réclamer également la convergence des couplages (figure 2b). SUSY possède une autre propriété très alléchante. On sait que la majeure partie de la matière de l'Univers est "sombre", c'est-à-dire non détectée autrement que par ses effets gravitationnels (la Recherche n0 338, jan 2001). De quoi est-elle faite? Le portrait-robot du partenaire de SUSY le plus léger, ou LSP (Lightest Supersymmetric Particle), en fait le suspect numéro un de cette ténébreuse affaire. Le LEP ne l'a pas vu, jusqu'à une masse de ~ 45 GeV, mais rien ne l'oblige à être aussi léger. La GU Supersymétrique, qui offre en prime la réponse à d'autres questions et pourrait détenir la clé de la masse des neutrinos et de l'asymétrie matière-antimatière, est donc actuellement le paradigme le plus porteur.

C'est une autre mission du LHC que de découvrir la Supersymétrie, si elle est au rendez-vous, ce qui du même coup jettera un éclairage nouveau sur le mystère de la Matière Sombre. Bien entendu le LHC saura également révéler d'autres effets nouveaux éventuels, comme par exemple cette nouvelle interaction forte entre bosons citée plus haut. Une aventure fabuleuse serait d'y mettre en évidence des "grandes" dimensions d'espace supplémentaires, dont la taille pourrait aller de ~ 100 micron s'il y en a deux à celle du proton si elles sont au nombre maximum de huit .

L'expérimentation: du relativement facile au très difficile

L'énergie disponible accrue promet l'apparition d'effets nouveaux. Le revers de la médaille est que leur taux de production décroit comme $1/E^2$, l'inverse au carré de l'énergie nécessaire pour les produire. Il faut donc compenser cela en augmentant comme E^2 la "luminosité" des collisions, à savoir la fréquence de rencontre des projectiles et leur densité par unité de surface. Passer des électrons aux protons, avec une luminosité accrue de plus de deux ordres de grandeur, est tout sauf anodin, et les conditions expérimentales deviennent vraiment très sévères.

Le LEP offrait 10000 fois par seconde la rencontre de paquets d'$e^{\pm}$, particules à interaction faible. Au LHC se rencontreront $4\ 10^7$ fois par seconde (il y aura près de 3000 paquets par faisceau) des protons, particules à interaction forte. D'environ une interaction par seconde au LEP, on passera au LHC à 10^9 interactions par seconde, dont seulement une toute petite fraction (les interactions "dures" entre partons) peut nous intéresser.

Les conséquences sont multiples, et feront des détecteurs du LHC des géants, certes, mais d'une subtilité sans précédent. Le flux de particules produites sera tel que les détecteurs doivent être extrèmement fragmentés en canaux indépendants, pour que chaque canal ait une bonne chance d'être "libre" quand un évènement "intéressant" se produira. On passera donc de la centaine de milliers de canaux, typique du LEP, à la dizaine de millions au LHC. Les détecteurs, surtout près des faisceaux, seront très fortement irradiés par ce bombardement de particules. De quelques kilorad d'irradiation cumulée au LEP, on passera à 10 ou 100 mégarad au LHC. Ces détecteurs, ainsi que leur électronique, doivent donc être "durs" au rayonnement. Ne pouvant enregistrer le contenu de 10^9 interactions par seconde, le détecteur devra faire un "tri" en temps réel sur des critères simples pour n'en retenir qu'une centaine environ, a priori intéressants. Alors qu'au LEP on enregistrait toutes les interactions notables, il faudra au LHC obtenir, sans erreur, une sélectivité de $\sim 10^{-7}$. Néanmoins le volume d'information ainsi retenu, à raison d'un méga-octet par évènement, restera très

élevé. Du LEP au LHC, on passera des téraoctet (10^{12} octets) aux pétaoctets (10^{15} octets) d'information à stocker et analyser. Le volume annuel par expérience, d'une dizaine de pétaoctets, équivaudra à 20 millions de CD-ROM. Le flux instantané augmentera en proportion: le "tri" impliquera le traitement de ~ 40000 Gb/s.

Cependant, mise en perspective, cette évolution est moins effrayante qu'il n'y paraît. A l'heure actuelle tournent déja des programmes (HERA, Tevatron, RHIC, cibles fixes) dans des conditions sévères, intermédiaires entre celles du LEP et du LHC. Certaines des technologies requises progressent de manière impressionante dans le monde industriel. En électronique, par exemple, le passage aux technologies en "quart-de-micron", offrant des produits intrinsèquement plus résistants aux radiations, a largement contribué à résoudre les problèmes. L'informatique également est en perpétuel progrès: la loi de Moore, une croissance exponentielle avec le temps du rapport performance/prix, s'applique toujours largement.

Néanmoins, dans la plupart des domaines, la Physique des Particules est si exigeante qu'elle ne peut compter que sur elle même et doit mener de forts programmes de R/D. La conviction de savoir exploiter pleinement le potentiel du LHC n'a été acquise que progressivement, au terme de tels programmes entrepris il y a vingt ans. Les maintenir est impératif si l'on veut progresser davantage. La Physique des Particules reste très innovante et conserve son rôle incitatif vis-à-vis de l'industrie.

Du WEB au GRID

Un bon exemple concerne le traitement de l'information.

Loin d'être un laboratoire isolé, le CERN est le foyer d'une communauté d'environ 80 pays et de quelques 6500 physiciens utilisateurs. Ceux-ci forment de grandes collaborations internationales à l'intérieur desquelles le maintien de bons contacts et la distribution électronique de données, logiciels et documentation sont essentiels. C'est pour leur permettre d'accéder d'une façon simple et cohérente aux

informations, où qu'elles soient, que fut inventé au CERN en 1989 le World-Wide-Web, dont l'impact n'est plus à illustrer.

Le CERN, allant de l'avant et soucieux d'assurer une bonne "digestion" de la masse de données que le LHC produira, s'est fait le maître d'oeuvre d'un nouveau projet d'une portée potentielle plus considérable encore, la Grille de Calcul. Après que le WEB ait réalisé la mise en commun de l'information documentée, la Grille vise celle des moyens de calcul et ambitionne, en étapes successives, de relier les détecteurs du LHC à près de 10000 scientifiques, ainsi que des dizaines de milliers d'ordinateurs à travers le monde, constituant ainsi un "laboratoire ouvert".

Le changement dans la continuité

Le LHC, bien que coûteux, l'est beaucoup moins que s'il avait été réalisé en rase campagne à partir de rien. La réutilisation des infrastructures existantes, site du CERN, chaîne des injecteurs successifs, dûment entretenus et améliorés, zones d'interaction, et surtout tunnel du LEP, une opération planifiée de longue date, en a réduit le prix d'un facteur 2 à 3.

D'autre part les défis technologiques multiples n'auraient su être relevés sans l'apport des compétences acquises lors des programmes précédents, au CERN et ailleurs: les ISR, premier collisionneur de protons, le collisionneur antiproton-proton, etc. Le LEP, par exemple, a révolutionné deux domaines-clé: la technologie des cavités radio-fréquence supraconductrices et l'ultravide. C'est au LEP que pour la première fois un système de pompage "getter" (un "ruban adhésif" de titane-zirconium capturant non les mouches, mais les dernières molécules présentes) a été déployé à très grande échelle pour atteindre des vides de 10^{-11} Torr ou mieux. Cette technique, brevetée et exportée vers l'industrie, sera également vitale au LHC.

Il en va de même des détecteurs. L'état actuel est l'aboutissement d'une longue évolution des méthodes de détection et de leurs performances, marquées par des innovations décisives. Ainsi le "mai 68" de l'instrumentation,

mené par G.Charpak, dont les chambres multifils et leurs variantes supplantèrent les chambres à bulles ou étincelles d'antan. Actuellement se déroule une autre révolution avec l'irruption massive des détecteurs de traces au silicium. Là aussi les programmes antérieurs, et les expériences du LEP en particulier, ont pavé la voie en développant des détecteurs de microvertex à haute résolution spatiale (~10□) de plus en plus performants. Cependant le "saut" actuel est spectaculaire et audacieux: du mètre carré de silicium au LEP, on passe à plusieurs centaines de m^2 au LHC, de qualité au moins égale et cent fois plus résistants aux radiations.

Dans le domaine de la calorimétrie, de même, il aurait été impensable pour CMS (Compact Muon Solenoid, l'un des deux détecteurs géants du LHC) d'envisager la construction d'un détecteur de photons fait de 80000 cristaux de tungstate de plomb, dont les voies devront être équilibrées au demi-pourcent, si L3 au LEP n'avait déja réalisé et exploité un détecteur de 10000 cristaux de BGO. Quant au calorimètre original en "accordéon" d'ATLAS (l'autre détecteur géant), il est né de la rencontre heureuse d'une idée novatrice, la calorimétrie projective, et d'une longue expérience de l'usage de l'argon liquide comme milieu calorimétrique.

De l'Europe restreinte à l'Europe large

Le CERN fête son cinquantenaire d'Organisation Européenne Intergouvernementale. Parti de douze états membres à sa fondation en 1954, il n'a cessé d'en accueilir de nouveaux, en particulier après l'effondrement de l'URSS, et en compte vingt actuellement. Désormais une période probatoire sera requise pour les Etats-candidats à venir. Priorité est donnée à la qualité des relations avec les Etats-membres "proches".

Le rôle du Conseil du CERN est actuellement en voie d'être restoré dans sa forme originelle: "promouvoir et orienter les activités de l'Europe en Physique des Particules, représenter l'Europe dans le planning de nouveaux projets".

Le CERN entretient des relations de longue date avec les grands laboratoires européens. Pour ne prendre qu'un exemple, la collaboration CERN-Saclay est vieille de 40 ans et a marqué presque toutes les phases de l'aventure scientifique, du Synchrotron à Protons en 1963 au LHC, machine et expériences.

L'Europe de la Science se structure progressivement: le CERN entend y tenir un rôle important, par exemple dans le Projet CARE, qui coordonne la recherche européenne en techniques d'accélération, et le projet EUROTEV, regroupant les sujets de R/D liés à un collisionneur linéaire futur.

De l'Europe au monde

Au fil des projets, LEP et plus encore LHC, le CERN s'est ouvert au monde et accueille les physiciens et les contributions, tant aux machines qu'aux expériences, d'états non-membres dont plusieurs ont acquis le statut d'Observateur auprès du Conseil. Au LHC 25% du financement du projet et des utilisateurs provient d'états non-membres: USA, Canada et Japon, mais également Russie, Inde, Chine, etc. Plus de la moitié des physiciens des Particules du monde sont maintenant impliqués dans les programmes du CERN. Grâce à l'Internet et au WEB les collaborations les plus lointaines sont monnaie courante.

Concernant les pays en développement, on peut prendre l'exemple de l'Inde. Ce pays a contribué a l'équipement et aux équipes techniques du LEP, au complexe injecteur du PS et aux expériences cible-fixe. Un accord de coopération, signé en 1991, a été étendu en 2001 pour une décennie. L'Inde a acquis le statut d'Observateur en 2002. Elle construit une partie notable des aimants de correction du LHC, contribue à ses détecteurs ALICE et CMS, participe à l'activité du département de Technologie de l'Information. Le CERN paye cash les composants livrés, ce que le pays utilise en support de ses propres activités scientifiques. On s'efforce également de faire bénéficier des technologies de l'information des groupes plus larges que celui des physiciens.

Le CERN, qui à aucun moment de la guerre froide n'a cessé d'entretenir des relations scientifiques avec les physiciens de l'URSS, en particulier avec son homologue, le JINR de Dubna, est un lieu convivial où travaillent en harmonie Pakistanais et Indiens, physiciens de Chine continentale et de Taiwan, etc.

Le CERN participe à l'effort mené pour connecter les pays émergents, en particulier d'Amérique du Sud, au réseau mondial de l'information. Il vient d'être un acteur majeur du Sommet Mondial sur la Société de l'Information, tenu en décembre 03, en particulier sur le rôle de que la Science doit y tenir.

En quelques années, un ancien directeur-général du CERN, H.Schopper, sous l'égide de l'UNESCO et fort de son expérience du CERN, a fédéré plusieurs communautés scientifiques du Moyen-Orient, dont celles d'Israel et de Palestine, autour du projet de rayonnement synchrotron SESAME, en cours de construction (la Recherche, n0 329, mars 2000).

… et à part le LHC?

Le CERN, on l'aura compris, est fort occupé par son objectif prioritaire: la préparation et la réussite du LHC, et lui consacre plus de 80% de son potentiel. Il est également soucieux de renforcer et de promouvoir au niveau mondial un R/D suffisant concernant la technologie d'un collisionneur e^+e^- multi-TeV éventuel. Il va de soi qu'il ne peut se disperser beaucoup plus. Mais il garde tout de même plusieurs cordes à son arc.

Un évènement majeur de la décennie est le retour en force de la Physique des Astroparticules. Comme aux premiers temps de notre science, mais avec des moyens centuplés, on se tourne vers les projectiles cosmiques, pour les interroger, soit sur les objets cosmiques dont ils sont issus, soit sur eux-mêmes. Jusqu'ici le seul succès concernant ce dernier aspect, mais un succès de taille, est la mise en évidence de la masse non nulle des neutrinos (la Recherche, n0 345, sept 2001). Le CERN "reconnait", sans y participer, un petit nombre d'expériences

d'astroparticules relativement proches de ses préoccupations et leur offre de tirer parti de son potentiel.

En fait, problématique, méthodes et instruments, tout exige que physique hors accélérateur et physique des accélérateurs avancent de pair et en forte symbiose. Ainsi la traque de la matière noire, LSP ou autre, sera menée de manière complémentaire par le Tevatron et le LHC, aptes à la produire et à la détecter, et par les expériences hors-accélérateur, éventuellement sensibles aux collisions de telles particules fossiles. Les neutrinos issus d'accélérateurs (et de réacteurs) prennent le relais des neutrinos atmosphériques et solaires. Le CERN construit un faisceau qui enverra des neutrinos vers deux expériences du Gran Sasso, près de Rome, afin de confirmer que l'oscillation du muon-neutrino vue par SuperKamiokande* mène bien à un tau-neutrino.

Un programme minimal de physique de cible fixe, qu'un atelier prochain va préciser, sera maintenu afin d'élucider certains aspects de questions majeures auxquelles le CERN a déja beaucoup apporté: de quoi est fait le spin du nucléon? Quelle est la la nature de la violation de la symétrie CP*, clé de l'asymétrie matière-antimatière, donc de notre existence? En collision d'ions lourds, observe t-on le déconfinement des quarks et gluons, reprenant un instant leur liberté confisquée quelques microsecondes après le Big Bang (la Recherche, n0 357, oct 2002)?

Le CERN continuera ses programmes traditionnels et prospères de basse énergie (l'exploitation des faisceaux radioactifs d'ISOLDE, la production d'antiprotons froids et d'antiatomes d'hydrogène à l'Anneau de Déccélération AD), enrichis par l'entrée en scène de nTOF, un intense faisceau de neutrons d'énergie fort précisément connue.

En progressant à pas comptés, le CERN se donne en outre la possibilité d'accroître le nombre de protons à injecter dans ses machines, ce qui peut bénéficier à de nombreux programmes, en particulier le LHC, et le cas échéant, si la physique du neutrino et sa planification mondiale le dictent, à une phase ultérieure de celle-ci.

Même si les activités hors LHC sont réduites, on est assez loin de l'hibernation redoutée pour le CERN (La Recherche, n0 354, 06/2002).

Légendes des figures:

Figure 1a: une cavité accélératrice supraconductrice du LEP en niobium. Une telle cavité délivre sur son axe un champ électrique oscillant et intense. Les particules chargées arrivant au moment où il est accélérateur reçoivent un incrément d'énergie. La plupart des cavités du LEP étaient en fait en cuivre, avec un revêtement interne de niobium. Leur champ accélérateur a atteint 7.5 MV/m.

Figure 1b: un aimant du LHC en test.

Figure 2: la convergence des constantes de couplage des interactions électromagnétique, faible et forte, approximative dans le MS, exacte dans sa variante supersymétrique. On notera l'échelle horizontale logarithmique en énergie. Cette évolution des couplages ne doit pas être confondue avec celle de l'intensité des forces. L'encadré montre l'évolution de la constante de couplage forte effectivement observée dans le domaine d'énergie du LEP.

Figure 3a: en fonction de l'année, la masse du top trouvée indirectement par le LEP (cercles ouverts) et la masse mesurée directement par le Tevatron (triangles) après sa découverte.

Figure 3b: la région préférée (près du fond de la courbe en cloche) pour la masse du Boson de Higgs, interprétée dans le cadre du MS, d'après les indications indirectes du LEP. Selon ce résultat il n'y a que 5% de chances que le boson soit plus lourd que ~ 250 GeV.