



Stratégie de l'Institut



8 LA PHYSIQUE DES PARTICULES AU SEIN DE L'IN2P3

PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET HADRONIQUE

12 Structure et dynamique nucléaire aux extrêmes :
une moisson de découvertes et un projet majeur
Spiral2 qui préparent l'avenir

15 Physique hadronique

17 ASTROPARTICULE ET NEUTRINO AU SEIN DE L'IN2P3

21 PROGRAMME PACE – AVAL DU CYCLE

23 POLITIQUE DANS LE DOMAINE DES ACCÉLÉRATEURS INSTRUMENTATION

25 L'INFORMATIQUE À L'IN2P3

27 L'INSTRUMENTATION À L'IN2P3

PROGRAMMES PLURIDISCIPLINAIRES

28 Interface avec les sciences de la vie

31 Le Spatial

33 ENSEIGNEMENT

LA PHYSIQUE DES PARTICULES AU SEIN DE L'IN2P3

François Le Diberder

La recherche en physique des particules a pour objectif de mettre en lumière les propriétés des constituants élémentaires de la matière et des interactions qui les relient. Pour ce faire, elle est amenée à explorer les états extrêmes de la matière, de façon à saisir les principes qui sous-tendent ces propriétés. Dans cette quête, les physiciens ont été conduits au fil des ans à mettre en œuvre des collaborations de tailles croissantes pour réaliser et maîtriser des expériences impliquant des technologies de plus en plus ambitieuses auprès de complexes d'accélérateurs qui tendent à échapper aux possibilités d'une seule nation, voir d'un seul continent.

Issue d'une lente progression théorique, la théorie actuelle des particules élémentaires s'est soudainement cristallisée au début des années soixante-dix pour donner naissance à ce qu'il est convenu d'appeler le Modèle Standard.

Après de nombreuses étapes, dont notamment la découverte du mécanisme de GIM (du nom des trois auteurs Glashow-Iliopoulos-Maiani) qui conduit à inférer dès 1970 l'existence du quark « charmé », c'est en 1973 que la dernière brique majeure vient s'insérer dans l'édifice théorique : après la composante de l'interaction électromagnétique, puis celle de l'interaction faible, c'est au tour de la composante de l'interaction forte. Il devient alors possible de décrire, via une théorie des champs de Yang-Mills, les interactions entre particules de matière et les vecteurs de cette interaction (les bosons, dénommés pour l'interaction forte les « gluons ») en les dotant notamment de la liberté asymptotique que suggéraient les résultats expérimentaux obtenus au Slac et au Cern. Cette contribution sera consacrée en 2004 par le prix Nobel de physique décerné à D. Gross, D. Politzer et F. Wilczek.

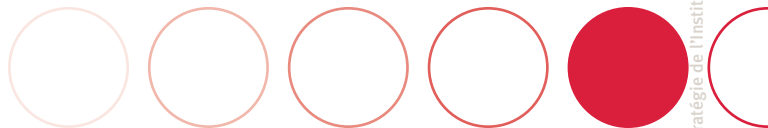
Une théorie de Yang-Mills est une théorie quantique des champs qui met en jeu des bosons qui, à l'encontre des photons, sont dotés de charges similaires à celles que portent les particules de matière qui y sont associées. Une telle théorie repose sur une symétrie exacte, vérifiée localement : c'est-à-dire qu'une forme d'invariance des lois de la physique est réalisée en tout point de l'espace-temps, et ce indépendamment d'un point à un autre. Pour l'interaction forte, la symétrie est celle de $SU(3)$.

C'est ce même type de champs de jauge qui avait été avancé quelques années plus tôt pour rendre compte des interactions faibles et électromagnétiques pour les combiner dans la théorie électrofaible : une autre théorie de jauge de Yang-Mills basée sur une autre symétrie, $SU(2)$, mettant en jeu trois types de bosons : le photon, les bosons chargés W^+ et W^- et le boson neutre Z .

Un élément clef de l'édifice théorique est le postulat de l'existence d'un champ scalaire (mis en avant par P. W. Higgs) dont l'interaction avec les particules de matière et certains champs d'interaction (lui-même y compris) conduit à l'apparition des masses des particules élémentaires. Ce champ scalaire, dit champ de Higgs, doit posséder une propriété étonnante : pour conduire à l'apparition des masses des particules, il ne doit pas être évanescent à l'équilibre dans le vide. En l'absence de source, ce champ doit prendre une valeur non nulle, laquelle échappe au pouvoir prédictif de la théorie.

Peu après cette cascade de percées théoriques qui permettent de rassembler les trois interactions dans un cadre théorique unique, les familles de leptons et de quarks prennent corps : il s'avère que pour rester cohérente la théorie doit comporter une séquence de familles, des quadruplets, chacun composé de deux leptons (pour la première famille, le neutrino électronique et l'électron) et de deux quarks (pour la première famille, les quarks « up » et « down »).

La même année 1973, avant même que la deuxième famille de leptons et de quarks ne soit expérimentalement complétée (il manque encore le quark « charmé » annoncé par le mécanisme de GIM) deux théoriciens Japonais, Kobayashi et Maskawa, remarquent que l'existence d'une troisième famille fournirait un mécanisme capable de rendre compte de la violation de CP, déjà observée dans



le secteur des mésons K et très tôt reconnue comme un des ingrédients essentiels à la disparition constatée de l'anti-matière dans l'Univers. En effet, un mélange entre les trois familles dans le secteur des quarks (ou des leptons), comme celui déjà quantifié entre les deux premières familles de quarks par l'angle de Cabibbo, conduit mécaniquement à une violation de CP. Ce mécanisme prend la forme d'une matrice 3×3 , dite matrice CKM, selon les initiales des noms des trois physiciens cités ci-dessus. Dans la matrice CKM, une phase non nulle est responsable à elle seule de l'intégralité des phénomènes de violation de CP. Ce paradigme, alors totalement hypothétique, est aujourd'hui validé pleinement. Il reste encore l'espoir que son étude très fine révélera une fissure dans l'édifice théorique manifestement incomplet du Modèle Standard.

En effet, si le Modèle Standard constitue un ensemble théorique expérimentalement très satisfaisant – il permet de rendre compte de tous les phénomènes observés en laboratoire, à ce jour – il est difficilement acceptable en tant que tel comme cadre théorique ultime : les formes différentes prises par les trois interactions n'y découlent pas d'un principe supérieur, elles ne sont donc pas unifiées ; plus grave, l'interaction gravitationnelle y est absente, car réfractaire à la quantification des champs, elle reste hors de portée du Modèle Standard ; l'existence de trois familles n'y reçoit aucune explication ; les valeurs observées des masses, pourtant spectaculairement différentes (un facteur de plus de 10^{12} entre la masse d'un neutrino et celle du quark top) échappent totalement au pouvoir prédictif de la théorie ; tout comme les valeurs prises par les éléments de la matrice CKM et en particulier la faiblesse du terme de violation de CP dans le secteur des quarks, etc.

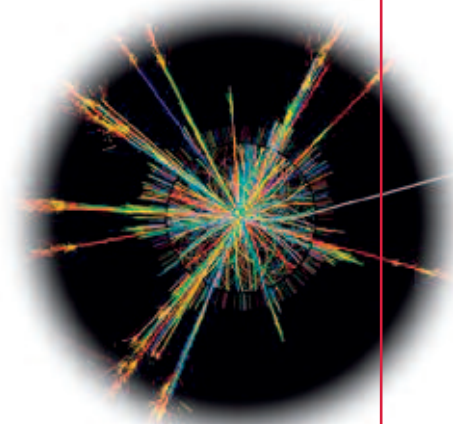
De plus, et ce point est extrêmement important, les résultats obtenus par l'étude du cosmos démontrent que l'Univers est constitué pour l'essentiel de substances absentes du Modèle Standard : la matière et l'énergie dites « noires ».

Les pistes poursuivies pour étendre le Modèle Standard sont multiples. L'une des plus attrayantes, « SuSy », met en jeu une « super symétrie » qui supprime certains des problèmes théoriques internes au Modèle Standard, prédit l'existence de nouvelles particules (dont certaines sont des candidates naturelles à la matière noire) et de nouveaux champs. Cette nouvelle symétrie offre en outre un élément permettant d'incorporer aussi la gravitation, à terme. Mais « SuSy » n'est pas la seule piste à poursuivre, loin s'en faut, comme en atteste, par exemple, les recherches destinées à dévoiler l'existence de dimensions supplémentaires aux quatre dimensions usuelles de l'espace-temps.

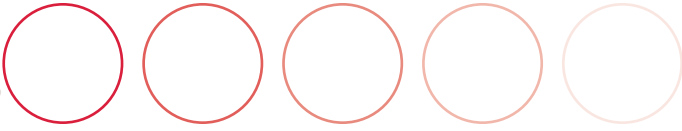
Avec l'avènement du Modèle Standard, mis à part des « alertes » parfois longues à s'éteindre, l'écrasante majorité des résultats expérimentaux vient compléter la validation de la théorie.

Ainsi, les courants neutres (prédits par l'existence du boson Z de l'interaction électrofaible) sont observés dès 1973, au Cern. Puis, dix ans plus tard, encore au Cern, les bosons W et Z de la même interaction électrofaible sont directement produits par le collisionneur proton-antiproton SppS, quelques années à peine après que les premiers signes de l'existence des bosons de l'interaction forte (les gluons) aient été mis en évidence à Desy (Allemagne).

En 1989, à l'avènement des accélérateurs électron-positron géants, le LEP au Cern et le SLC à Slac (USA), puis, peu après, du collisionneur électron-proton Hera à Desy, il ne manque plus que trois pièces au puzzle du Modèle Standard ; le neutrino de la troisième famille (celui associé au lepton « tau ») ; le deuxième quark de la même troisième famille (le quark « top » super massif) ; et enfin, le (ou les ?)



Simulation de la création d'un mini trou noir, lors d'une collision proton-proton, dans le détecteur Atlas du Large Hadron Collider. © Cern



boson(s) de Higgs. Il reste aussi à vérifier que les propriétés des bosons intermédiaires – tout comme celles du boson de Higgs (mais encore faut-il d'abord le découvrir... s'il existe!) – sont bien celles décrites par la théorie. Bien qu'aucune particule nouvelle n'ait été découverte au LEP, ce collisionneur a permis aux grandes collaborations mettant en œuvre les quatre détecteurs qu'il accueillait de valider le Modèle Standard en détail. Entre autres magnifiques résultats, le LEP aura démontré que les familles sont très précisément au nombre de trois, que le neutrino « tau » est léger, comme le sont les neutrinos des deux premières familles, que le quark « top » est dotée d'une masse très élevée. Par un tour de force expérimental et théorique, la masse du quark top sera même déterminée, à travers le biais des corrections quantiques de la théorie, avant qu'il ne soit observé. Qui plus est, l'ensemble des mesures de hautes précisions pointent vers « un » boson de

Higgs relativement léger, d'une masse aux alentours de $115\text{GeV}/c^2$, juste à la limite des capacités de détection du grand collisionneur. Sans oublier, entre autres prouesses touchant l'interaction forte, la démonstration expérimentale que la symétrie de Yang-Mills sous jacente est bien la symétrie $SU(3)$ postulée en 1973, que la constante d'interaction forte est bien la même quel que soit le processus étudié (que ce soit au LEP, à Hera ou ailleurs) et que l'évolution en énergie de cette « constante » est en accord avec la liberté asymptotique. La maîtrise de la mesure de la constante d'interaction forte est atteinte vers le milieu des années quatre-vingt-dix. Combinée aux déterminations très précises des deux constantes de couplage de l'interaction électrofaible, ces mesures semblent indiquer une unification approximative des trois forces, à très haute énergie. L'unification des forces semble même pouvoir être parfaite si une théorie comme SuSy est prise en compte.

Après ces succès remarquables, qui dépassent de très loin les espoirs initiaux, l'Europe perd peu à peu le tout premier rôle qu'elle tenait depuis les années quatre-vingt : après avoir été indirectement mis en évidence par le LEP et SLC, le quark « top » est directement observé en 1995 auprès du collisionneur Tevatron, à FNAL aux USA (avec la masse annoncée par le LEP et le SLC) et le neutrino « tau » est mis en évidence en 2001 dans le même laboratoire. Plus tard, le phénomène attendu d'oscillation des neutrinos qui établit simultanément l'existence de leurs masses et de leur mélange entre familles (analogue au mélange entre les familles de quarks à l'origine de la violation de CP) sera établi par un ensemble d'expériences dont la plus importante, SuperKamiokande, est située au Japon. C'est également hors des frontières de l'Europe que deux expériences jumelles se lancent dans un vaste programme d'étude de la violation de CP dans le secteur des mésons B, c'est-à-dire dans un domaine où la troisième famille de quarks joue le rôle principal; il s'agit des usines à B et de leur détecteurs, Belle, à KeK (Japon) et BaBar, à Slac (USA). Depuis l'an 2000, dans l'attente de la mise en service du LHC au Cern, Desy reste le seul site européen actif en physique des hautes énergies.

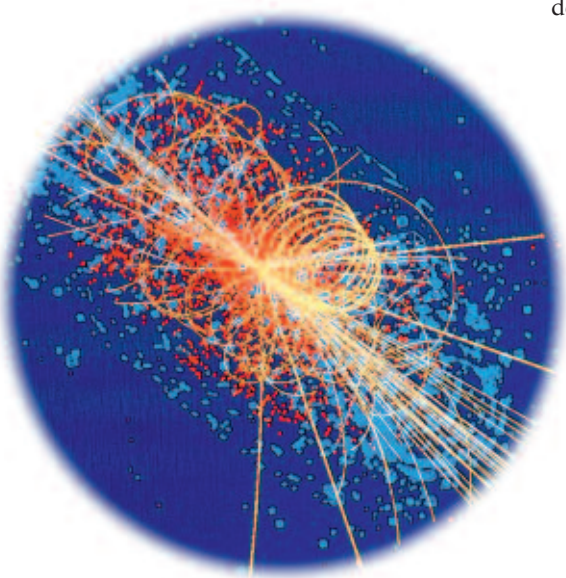
Outre sa très forte implication dans la réalisation des grands détecteurs du LHC : Atlas, CMS, LHCb et Alice – et c'est bien là que se situent les enjeux principaux de la physique des particules aujourd'hui – l'IN2P3 contribue à la poursuite de la recherche vive en physique des particules principalement à travers les collaborations : BaBar (PeP-II à Slac); D0 et CDF (Tevatron, à FNAL) et H1 (Hera, à Desy). Dans le même temps, l'Institut s'est engagé dans un intense effort de R&D, dédié à la définition des détecteurs qui seront placés auprès de la machine de la génération suivant celle du LHC : le collisionneur linéaire international e^+e^- , ILC.

La période 2004-2006 a vu la confirmation du triomphe des usines à B qui ont pulvérisé les pronostics les plus optimistes en délivrant près de quatre fois plus de données qu'espéré, qui plus est d'une

excellente qualité, aux deux détecteurs. La compétition est rude entre ces deux projets qui ont maintenant accompli leur mission première, fournir une validation précise du paradigme décrivant la violation de CP dans le cadre du Modèle Standard et qui tiennent toujours le devant de la scène internationale dans le domaine de la physique des particules. Ainsi la violation directe de CP dans le secteur des B a été observée en 2004.

Avant la mise en exploitation du LHC, la frontière des hautes énergies est explorée par le Tevatron à FNAL. L'IN2P3 a pris une place de premier plan dans la collaboration D0 et joue un rôle visible dans l'expérience CDF. Les équipes de l'Institut participent activement à la collecte d'une abondante moisson de résultats, jouant ainsi un rôle d'éclaireur pour la préparation à la physique du LHC. Depuis 2004, la qualité du fonctionnement du Tevatron rend concevable une découverte du boson de Higgs à FNAL, s'il est léger comme attendu et si la maîtrise des détecteurs tient ses promesses.

Pour BaBar comme pour D0, le Centre de calcul de Lyon a démontré qu'il faisait partie des meilleurs centres mondiaux en prenant dans les deux cas une responsabilité déterminante dans le calcul intensif, le stockage des grandes masses de données issues des expériences ainsi que de leurs exploitations simultanées.



Simulation de la désintégration d'un boson de Higgs en quatre muons dans le détecteur CMS du Large Hadron Collider.
© Cern

L'Institut concentre ses forces pour la fin de la construction et pour l'intégration des détecteurs du LHC. Fin 2006, l'intégration *in situ* des détecteurs Atlas, CMS et LHCb est considérablement avancée : les engagements de l'IN2P3 ont tous été tenus. Parallèlement, dans le cadre de la collaboration W-LCG (World LHC Computing Grid) l'Institut, en collaboration avec le Dapnia, participe à l'étape suivante : la mise en œuvre du calcul distribué du LHC. En 2004 a été fondé le projet LCG-France dont le premier objectif est de réaliser un nœud majeur (Tier1) de la grille, au Centre de calcul de Lyon. Le démarrage du LHC, prévu pour l'année 2008, marquera le retour en Europe du centre de gravité mondial de la recherche en physique des particules.

La machine de la prochaine génération sera un collisionneur linéaire à électron qui offrira un outil d'exploration, complémentaire du LHC, irremplaçable tant pour l'étude du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible que pour la compréhension de la nouvelle physique que le LHC devrait prochainement révéler. Avec un fort soutien de l'Europe, l'Institut contribue à l'effort mondial pour la conception de cette machine et des détecteurs devant être placés aux points de collisions. Leur réalisation pose de nouveaux défis technologiques auxquels s'attaquent de nombreuses équipes de l'Institut au sein de collaborations internationales de R&D où l'Institut joue souvent un rôle de leader.

PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET HADRONIQUE

1

Structure et dynamique nucléaire aux extrêmes : une moisson de découvertes et un projet majeur SPIRAL2 qui préparent l'avenir

Sydney Galès

Les grandes questions à résoudre en physique du noyau sont directement liées à l'exploration des propriétés des assemblages de protons (Z) et neutrons (N) aux extrêmes

- **Quelle limites en moment angulaire total ou/et en température peuvent supporter ces « petits systèmes » ? Quelles formes et symétries stabilisent le système dans ces conditions ? Quel est leur diagramme de phase et la relation avec l'équation d'état de la matière nucléaire ?**
- **Où se trouve la limite en Z et en masse A des noyaux ? La quête de l'îlot de stabilité *via* la formation de noyaux des super-lourds « stable » reste une question ouverte.**
- **Où se trouvent les frontières de la stabilité lorsqu'on accroît le rapport N/Z du nombre neutrons aux protons ? Comment l'organisation en couches de ces noyaux dits « exotiques » est-elle modifiée (halo, peau de neutrons, clusters, pertinence des nombres magiques). Quelles nouvelles composantes de l'interaction élémentaire ces phénomènes révèlent-ils (trois corps, force tenseur, appariement n-p) ?**
- **La physique de ces noyaux « exotiques », espèces rares et éphémères formés à l'origine dans les fournaies stellaires, nous permettent aussi l'exploration de l'origine des éléments dans l'Univers en forte interaction avec l'astrophysique.**

La moisson de résultats collectés ces dernières années permet de percevoir les grands axes de développement tant sur le plan théorique et expérimental que sur le plan des instruments et des infrastructures, projets qui sont presque tous élaborés et réalisés dans le cadre de collaborations européennes et internationales.

Le texte qui suit permet d'illustrer ces lignes de force à travers quelques faits marquants récents dont certains sont détaillés plus loin.

Lorsqu'on accroît le moment angulaire total J et/ou la température T de ces petits systèmes quantiques, les limites d'existence sont liées aux formes « exotiques » que peuvent prendre ces systèmes ou encore l'excitation de modes collectifs à très haute d'énergie d'excitation. Dans une récente étude de collisions $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ le mouvement de vibration d'amplitude la plus grande jamais observée dans les noyaux atomiques a été découvert au Ganil: un état à trois phonons construit avec des résonances géantes (PRL2006). Cette superposition (triple) de résonances géantes a été signée par son mode de décroissance par particules grâce au couplage de deux grands instruments, le spectrographe magnétique Speg et le multi détecteurs de particules chargées Indra.

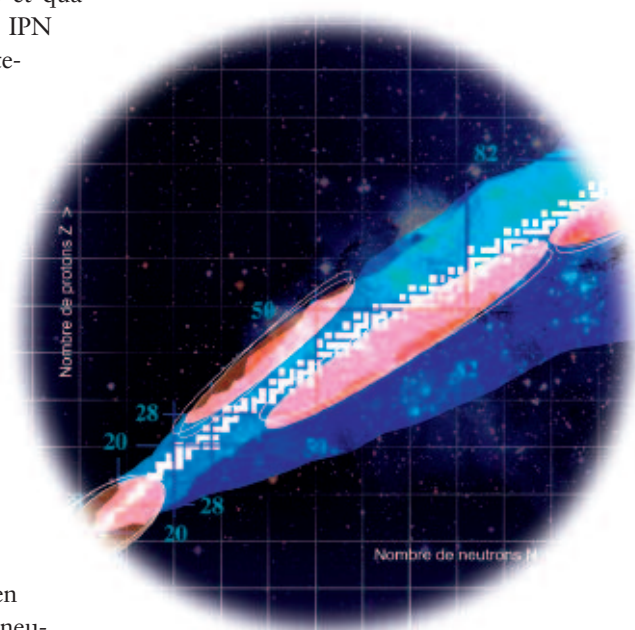
Enfin, au-delà de l'existence de modes collectifs, la multi fragmentation des noyaux observés dans les collisions d'ion lourds à énergie intermédiaire (50-200MeV/n) permet d'explorer le diagramme de phase de la matière nucléaire dans une région de densité élevée mais à température modérée.

C'est l'exploration des limites à basse énergie (autour de la barrière 5-10 MeV/nucléon) où se développe la « recherche de phénomènes rares à la limite de la cohésion nucléaire » : très hauts spins et

formes exotiques, drip-line proton, pairing et noyaux $N = Z$ par réaction de fusion-évaporation. Pour atteindre ces phénomènes rares, la communauté française mais aussi européenne a déjà fait évoluer ses moyens expérimentaux à travers la mise en service de deux générations successives de multi-détecteurs « gamma » voyageurs qui ont pour noms Eurogam et Euroball. Ces instruments ont fait reculer sans cesse les limites de détection des cascades gamma, signatures élégantes de formes extrêmes dans les noyaux. Or de tels phénomènes doivent être recherchés dans des voies de réactions qui ne représentent que quelques 10^{-6} de la section efficace de fusion.

C'est ainsi qu'a émergé, sous le nom d'Agata, la troisième génération de multi-détecteurs gamma « voyageur ». Le projet européen Agata est constitué d'une boule de germanium pur avec localisation du rayonnement gamma grâce à une large segmentation du détecteur. La collaboration européenne Agata regroupe onze pays (Allemagne, Bulgarie, Danemark, Finlande, France, Italie, Pologne, Roumanie, Royaume-Uni, Suède et Turquie) et quarante-cinq laboratoires dont sept français (CSNSM, Ganil, IPHC, IPN Lyon, IPN Orsay, LPSC, CEA-DSM-Dapnia Saclay). Ceux-ci sont fortement impliqués dans le projet par le développement de l'électronique frontale, de logiciels d'analyse de tracking γ et de l'acquisition de données à très haut débit, de l'analyse des données et de l'infrastructure d'Agata. Un démonstrateur correspondant à 10% d'Agata (six triples clusters) sera testé à partir de mi-2008 en conditions expérimentales au laboratoire de Legnaro, Italie. Cette phase de validation sera suivie d'une campagne de mesures d'un an avant le transfert au Ganil pour des expériences en couplage avec le spectromètre Vamos.

Carte des noyaux.
© Aprim



Dans la quête des éléments super-lourds, on recherche la très probable dernière fermeture de couches conduisant à l'îlot de stabilité des « super lourds », fermeture bien incertaine quand au nombre de protons et neutrons qui la réalisera ($Z = 114, 120, 126$), $N = 184$).

Dans ce domaine une collaboration franco-russe « Gabriela » étudie la structure des noyaux très lourds ($Z = 100$

et au-delà) au moyen de la spectroscopie de leurs descendants immédiats. Des résultats très encourageants ont été obtenus pour les isotopes $^{253,255}\text{No}$ et un isotope de $Z = 104$, le ^{259}Rf . Un projet d'un spectromètre magnétique, financé en partie par l'ANR est en cours de discussion avec Dubna.

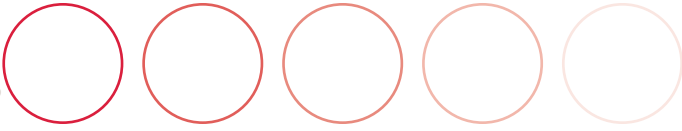
Enfin c'est la physique des noyaux « exotiques », et son potentiel de découvertes, qui mobilise l'ensemble de la communauté nationale mais aussi européenne et internationale.

Les avancées techniques en matière d'accélérateurs d'ions de haute intensité ont permis un début d'exploration de continent inconnu de plus de 6000 espèces « exotiques ». Les premiers pas font apparaître des structures inattendues et/ou des propriétés nouvelles.

Pour « la physique des noyaux loin de la stabilité », le Ganil et ses faisceaux d'ions lourds parmi les plus intenses au monde dans leur domaine d'énergie (20-100 MeV/nucléon) et la nouvelle installation Isol Spiral1, qui a maintenant atteint son régime de croisière, ont permis une vraie moisson de « découvertes ».

Les systèmes à trois corps « Borroméens » dont les sous-systèmes à deux corps sont instables, ou encore possédant une structure en « clusters », sont l'objet d'intenses recherches expérimentales grâce aux faisceaux d'hélium riche en neutron (^6He) de Spiral1. Le fait marquant est la découverte de l'isotope d'hydrogène « super-lourd » ^7H , une résonance étroite du système $1p+6n$.

De plus, en 2005 et 2006, les expériences conduites au Ganil ont démontrés que les nombres magiques, associés au remplissage des couches pour les protons et pour les neutrons, ne s'appliquaient pas aux noyaux exotiques. Sur le plan théorique, il a été avancé que le terme tenseur de l'interaction



nucléaire effective, ignoré jusqu'à présent modifiait profondément sur la structure en couche de ces noyaux. Deux faits marquants sont à retenir. Ils sont associés à l'observation des propriétés des premiers niveaux excités du ^{42}Si et ^{46}Ar qui remettent en cause la fermeture de couche bien établie à $N=28$.

Avec Spiral1, seule une fraction limitée d'espèces rares (principalement des noyaux légers) est accessible à des intensités suffisantes. Il faut donc étendre la gamme des ions secondaires radioactifs disponibles, en particulier vers les noyaux moyens et lourds, riches en neutrons, tout en augmentant considérablement les intensités. Le projet Spiral2 préparé depuis plusieurs années à ces deux objectifs. La décision de construire Spiral2 au Ganil a été prise en mai 2005 par le Ministère de la recherche, le CNRS et le CEA.

L'objectif est de faire du Ganil l'un des quatre grands centres mondiaux de la recherche sur les noyaux exotiques. Construire Spiral2 et le doter d'instruments de détections innovants, le tout dans un cadre européen voir mondial, est la priorité de l'Institut dans ce domaine.

Rappelons que la méthode de production choisie pour Spiral2 est la fission induite par neutrons rapides. Le *driver* sera constitué d'une source intense de deutons suivie d'un RFQ et d'un linéaire supraconducteur qui produira un faisceau de deutons de 5mA à 40 MeV (200 kW). Ce faisceau sera converti en flux intense de neutrons dans un convertisseur qui produira $5 \cdot 10^{13}$ fissions/s dans une cible épaisse de carbure d'uranium. Après diffusion et ionisation, on pourra disposer de faisceaux très intenses d'ions très riches en neutrons, ayant des masses situées entre 70 et 150, qui seront triés puis

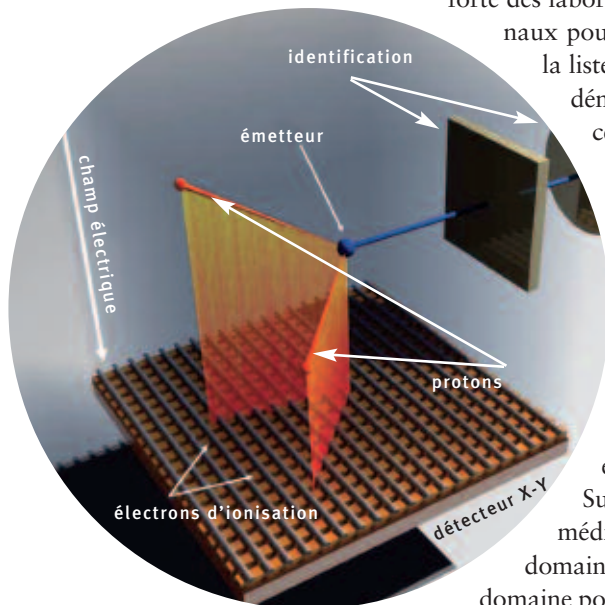
injectés et accélérés à des énergies autour de 6 MeV/nucléon par le cyclotron Cime. À titre d'exemple, on pourra disposer d'un faisceau de ^{132}Sn d'environ 10^9 pps. L'ensemble envisagé peut aussi se doter d'une source très intense (1mA) d'ions lourds qui pourront être accélérés par l'ensemble RFQ+Linac à 15 MeV/nucléon. Cet accélérateur produira les faisceaux d'ions lourds stables les plus intenses au monde à l'aube de la prochaine décennie. Le projet est chiffré à 130M€ (salaires compris), il est financé dans le cadre d'une convention CEA, CNRS, Région de Basse-Normandie.

Un groupe de construction du projet a été nommé dès mi-2005. Depuis, on assiste à la mobilisation forte des laboratoires français et à la mise en place d'accords européens et internationaux pour l'accélérateur et les nouveaux instruments. Spiral a été retenue dans la liste des infrastructures européennes à réaliser (ESFRI) et la construction a démarrée en 2006. Il pourrait être opérationnel vers fin 2011 pour les faisceaux stables et vers mi 2013 pour les faisceaux radioactifs. Un vaste programme de R&D a été lancé, en particulier lié à la production des noyaux riches en neutrons.

Dans ce cadre l'ensemble accélérateur Alto de l'IPN d'Orsay, de production du même type d'ions exotiques riches en neutrons que Spiral2 mais à des taux de production 100 à 1000 fois moins élevés, au moyen de la photofission, a fourni son premier faisceau en juillet 2006 et devrait être complètement opérationnelle dès le début de 2008. Alto est un beau succès sur le chemin de Spiral2. Un programme de physique dédiée et des équipements de physique sont aussi en cours de construction.

Sur la feuille de route européenne de la discipline Spiral2 est l'étape intermédiaire indispensable sur la route de la machine européenne ultime du domaine Eurisol. Le plan à long terme (2015-2020) de NuPECC dans ce domaine pour l'Europe repose sur le déploiement de deux installations complémentaires: l'une autour du projet de GSI, de production par des ions lourds relativistes intenses (1 GeV/nucléon) et l'autre avec une installation Isol de nouvelle génération.

Vingt instituts européens sont en charge de la définition de la machine Eurisol qui a reçu un support financier européen dans le cadre du 6^e PCRD, Eurisol Design Study, 9,5 M€. Les caractéristiques de ce projet futur sont détaillées dans ce rapport. La coordination du projet Eurisol est assurée par le Ganil La forte synergie entre les performances retenues pour Eurisol et la technologie mise en œuvre pour Spiral2 montre que Ganil pourrait être un excellent site pour accueillir Eurisol.

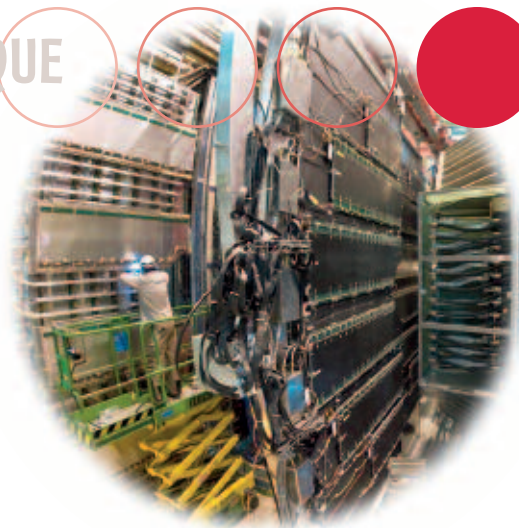


2

Physique hadronique

Barbara Erazmus

Les grands thèmes abordés dans le domaine de la physique hadronique à l'IN2P3 concernent le plasma de quarks et de gluons, les effets du milieu nucléaire et la structure du nucléon.



Le spectromètre à muons d'Alice. © Cern

Plasma de quarks et de gluons

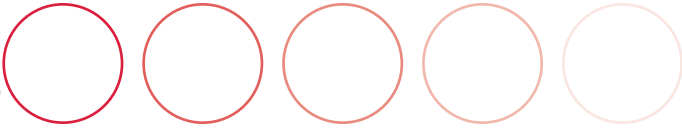
Les recherches d'un nouvel état de la matière, le plasma de quarks et de gluons déconfinés, ont débuté au SPS du Cern dans les expériences NA38/NA50 et, ensuite NA60, dédiées à la production de paires de muons dans les collisions proton-noyau et noyau-noyau. L'expérience NA60 a confirmé l'absorption anormale, au delà des effets nucléaires standards, du J/ψ mise en évidence par NA50. Cette observable est l'une des signatures prédites de la création d'un milieu déconfiné.

Les études de la production des mésons J/ψ sont poursuivies avec l'expérience Phenix auprès du collisionneur RHIC au Laboratoire national de Brookhaven aux États-Unis. L'analyse des collisions d'ions lourds démontre à nouveau l'absorption anormale du J/ψ . Toutefois, cette suppression est moins importante que celle prédite par des simples extrapolations des résultats du SPS. Un des mécanismes entrant en jeu pourrait être la recombinaison de quarks charmés formés en abondance au RHIC. Au delà de l'analyse des données, les efforts des chercheurs et des ingénieurs de l'IN2P3 ont également porté sur la conception de cartes d'électronique Silicon Pixel Interface & Read-Out.

Une autre expérience située auprès du RHIC, Star, a permis aux équipes de l'IN2P3 de caractériser l'état de la matière à de très hautes valeurs de densité et de température à travers les propriétés des particules étranges et multi-étranges. Afin d'améliorer la précision des mesures de l'étrangeté, les laboratoires français ont réalisé et installé en 2004 le détecteur en capteurs en silicium à micropistes (Silicon Strip Detector). Le SSD constitue désormais la partie essentielle de l'ensemble des détecteurs de vertex de l'expérience Star.

L'ensemble des signatures du plasma de quarks et de gluons pourront bientôt être accessibles grâce à Alice qui est la seule de quatre expériences au LHC dédiée à l'étude des collisions d'ions lourds. Les conditions expérimentales caractérisées par une augmentation considérable de la densité d'énergie et de la température seront particulièrement favorables à l'exploration du diagramme de phase de la matière nucléaire. Les laboratoires français ont apporté une contribution importante à la construction de plusieurs détecteurs de l'expérience Alice. L'IN2P3 et le Dapnia sont impliqués dans la construction et l'installation du spectromètre à muons, l'un des grands sous-systèmes d'Alice. Les deux couches du système de trajectographie interne, basées sur la technologie du silicium à micropistes double face, qui a fait ses preuves dans l'expérience Star, ont été construites et installées avec succès au Cern en décembre 2006. Les équipes de l'IN2P3 ont souhaité élargir davantage la contribution au développement de l'expérience Alice en se joignant au projet de la construction du calorimètre électromagnétique Emcal en collaboration avec des laboratoires américains et italiens.

Aux vues d'excellentes performances des laboratoires, démontrées lors de la construction des différents sous-ensembles d'Alice, la direction de l'IN2P3 a approuvé ce nouveau projet. En parallèle de la construction et de l'installation des détecteurs, la collaboration poursuit un effort considérable de développement d'outils d'analyse et de calcul. Les physiciens de l'IN2P3 coordonnent plusieurs groupes de travail préparant l'analyse des données.



Effets du milieu nucléaire

L'un des principaux objectifs concerne l'étude du comportement des hadrons (baryons, mésons étranges et mésons vecteurs) dans la matière dense et chaude formée lors de collisions d'ions lourds délivrés par l'accélérateur SIS du GSI à Darmstadt.

Les laboratoires de l'IN2P3 participent aux expériences Fopi et Hades.

L'expérience Fopi a permis d'obtenir des résultats très intéressants en mettant en évidence notamment un potentiel répulsif des K^+ et un signal de Sigma (1385) sous le seuil de création. Par ailleurs le laboratoire LPC de Clermont-Ferrand assume la responsabilité du détecteur de scintillateurs plastiques. La participation française dans l'expérience Fopi sera bientôt achevée, les physiciens impliqués ayant rejoint la collaboration Alice.

L'expérience Hades est dédiée à la mesure de paires de leptons dans le but d'étudier la fonction spectrale des mésons vecteurs dont la modification dans le milieu nucléaire pourrait être considérée comme le signe de la restauration de la symétrie chirale. Les conditions de résolution sont sans cesse améliorées permettant d'effectuer prochainement une analyse des données de très bonne qualité.

Structure du nucléon

Les études de la structure du nucléon sont effectuées avec des faisceaux d'électrons au Jefferson Laboratory aux États-Unis. Les équipes de l'IN2P3 et du Dapnia y sont impliquées depuis de nombreuses années. La qualité de la participation française a toujours été très appréciée, tant au niveau de la contribution technique qu'au plan de l'analyse des données et du développement des concepts originaux. Les physiciens français sont porte-paroles de deux expériences visant à mesurer pour la première fois les sections efficaces de la diffusion Compton profondément virtuelle (DVSC) qui permettent d'accéder aux Distributions de Partons Généralisées donnant l'image complète du nucléon. Une autre série de mesures a eu pour objectif d'étudier la contribution du quark étrange aux distributions électrique et magnétique du nucléon. Les résultats qui sont encore en cours d'analyse montrent pour la première fois une contribution significative du quark étrange au contenu du nucléon.

Le projet de développement de l'accélérateur d'électrons au Jefferson Laboratory, impliquant l'augmentation de l'énergie du faisceau du 6 à 12 GeV, a été accepté aux États-Unis. La nouvelle machine présentera des performances uniques au monde et permettra d'explorer la structure du nucléon au-delà des limites existantes. La direction de l'IN2P3 a approuvé la participation de ses équipes au projet JLAB 12 GeV, toujours en collaboration étroite avec le Dapnia.

Ainsi, dans le domaine de l'étude de la structure du nucléon des perspectives nouvelles et très prometteuses s'ouvrent désormais avec le projet d'extension du Jefferson Laboratory. Une vraie synergie, existante déjà, entre les laboratoires de l'IN2P3 et du Dapnia et une participation des théoriciens, plus forte encore, permettra de maintenir une implication forte, visible et appréciée par la collaboration internationale.

Dans les années à venir, Alice sera le projet phare en physique d'ions lourds relativistes. Il s'agira d'exploiter son énorme potentiel d'analyse des données en étudiant les propriétés de l'état des partons deconfinés créés dans les collisions des noyaux tout en prenant soin de progresser dans la compréhension des phénomènes de référence présents dans les collisions des protons et entre les protons et les noyaux.

Les mesures auprès du collisionneur du RHIC restent complémentaires. Leur poursuite dépendra des disponibilités des faisceaux d'ions au LHC ainsi que de l'implication des équipes.

*ci-contre:
Assemblage du cœur
de l'expérience Alice.
©Antonio Saba,
juillet 2006*

ASTROPARTICULE ET NEUTRINO AU SEIN DE L'IN2P3

Stavros Katsanevas



Le XX^e siècle a vu naître les deux théories majeures qui forment le cadre, encore indépassable, de notre connaissance de l'infiniment petit et de l'infiniment grand : la mécanique quantique et la relativité générale. Il a aussi vu la compréhension détaillée des 3 interactions qui régissent la physique de l'infiniment petit dans le cadre du Modèle Standard de la physique des particules. À l'opposé de l'échelle la relativité générale, théorie de la gravitation, a permis pour la première fois de prendre l'Univers comme objet et décrire sa naissance et évolution. Le modèle du Big Bang, a eu aussi une confirmation spectaculaire à travers la découverte du fonds diffus cosmologique et de ses fluctuations, en cohérence avec la compréhension de la nucléosynthèse primordiale des éléments. La cosmologie, à la fin du siècle précédent, est devenue une cosmologie de précision. Pourtant, à l'aube de ce nouveau siècle, on ne peut pas considérer la compréhension de la physique fondamentale des deux infinis comme une tâche accomplie.

En ce qui concerne la physique des particules, la confirmation expérimentale que les neutrinos ont une masse, pointe vers une théorie au-delà du Modèle Standard. La majorité des mécanismes théoriques inventés pour expliquer la masse du neutrino impliquent une nouvelle physique aux très hautes énergies proches, d'ailleurs, à l'échelle d'unification des trois interactions prédite par les expériences du LEP. La masse du neutrino devient ainsi le seul indice expérimental d'existence d'une physique au-delà du Modèle Standard. Comprendre alors ses paramètres (ses angles de mélange et l'échelle absolue de sa masse), sa nature (est-il sa propre antiparticule?) et l'éventuelle violation de la symétrie entre particule et antiparticule (violation CP) forment le cœur du programme expérimental de l'IN2P3 pour le neutrino.

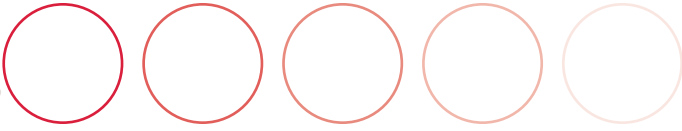
En ce qui concerne la cosmologie, même si les paramètres cosmologiques nous sont connus à quelques pour cent près on constate que 96% de l'Univers serait constitué de matière et énergie noire dont la nature nous échappe. De même le mécanisme dit d'inflation de création des structures du cosmos à partir d'infimes fluctuations quantiques reste toujours inconnu. On se trouve à une situation similaire à celle de la fin du XIX^e siècle quand les lois des gaz étaient connues mais on ignorait encore la nature des particules qui les composaient.

En ce début de XXI^e on connaît la thermodynamique de l'Univers avec précision mais on ne connaît pas toute sa microphysique. Comprendre la nature du processus de l'inflation, de l'énergie et matière noire forme le cœur du programme cosmologique de l'IN2P3.

Les extensions du Modèle Standard de la physique des particules (supersymétrie, dimensions supplémentaires...) prédisent des candidats naturels pour cette nouvelle microphysique. De même, la compréhension des paramètres du neutrino aurait des répercussions importantes sur la cosmologie : la violation de CP au secteur des neutrinos pourrait être à l'origine de l'asymétrie matière-antimatière. En parallèle, la découverte, ces dernières décennies, des émissions de rayonnement de haute énergie en provenance de plusieurs sites cosmiques (pulsars, supernovae, sursauts gamma, noyaux actifs de galaxie...) a catalysé le rapprochement de la physique des particules avec l'astrophysique.

On pense que derrière ces phénomènes violents se trouvent des corps cosmiques compacts (trous noirs, étoiles à neutrons...). Leurs processus d'explosion, d'accrétion ou fusion donneraient lieu à des fantastiques accélérations de particules et une production de rayonnement bien au-delà de ce qui peut être produit aux accélérateurs terrestres. La compréhension de ces phénomènes passe par leur étude à plusieurs longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique et à travers la détection des particules chargées de très haute énergie, des neutrinos et des ondes gravitationnelles.

Ce nouveau domaine est dans un certain sens un retour aux sources, puisque l'énigme de l'origine du rayonnement cosmique a accompagné la physique des particules à ses débuts, et plusieurs particules élémentaires y ont été découvertes. Aujourd'hui encore les sites extrêmes de production de ce rayonnement pourraient mettre en difficulté nos idées sur les interactions fondamentales. Les observatoires de l'astroparticule pourraient aussi apporter plusieurs éléments à notre image cosmologique à tra-



vers la détection indirecte de la matière noire, la standardisation des sources, et l'atténuation des signaux par le rayonnement ou l'espace-temps intergalactique. L'ouverture des nouvelles fenêtres sur le cosmos et l'inauguration de nouvelles branches de l'astronomie à travers la détection des nouveaux messagers forme le cœur du programme de l'IN2P3 en ce qui concerne l'astroparticule.

Les projets de l'astroparticule à l'IN2P3 concernent, en 2006, deux cents chercheurs et enseignants chercheurs ou un total de 365 ETP (Equivalent Temps Plein) avec les ingénieurs et techniciens; le budget annuel est de l'ordre de 10 M€ (en incluant les ressources des programmes IN2P3, le financement des TGE Virgo et Hess, les ressources du programme interdisciplinaire des astroparticules, et les ressources propres en provenance du Cnes, de l'ANR et de l'UE). Ce budget sert à financer les programmes suivants :

Neutrino

Les deux programmes neutrino majeurs de l'IN2P3 entre 2004 et 2006 ont été Nemo3 et Opera. Nemo3, située au Laboratoire Souterrain de Modane au Fréjus (LSM), est une expérience de recherche de la masse du neutrino à travers la mesure de la désintégration double bêta d'isotopes rares. Nemo3 est en prise de données depuis 2003 et la collaboration a publié des limites importantes sur la masse du neutrino.

Par ailleurs, la construction de la partie électronique du détecteur Opera, principale responsabilité de l'IN2P3, a été achevée en 2006, et le remplissage du détecteur par des éléments de cible sensible (briques d'émulsion) est en cours. L'expérience Opera située au tunnel du Gran Sasso et illuminée par un faisceau neutrino en provenance du Cern cherche à mettre en évidence l'oscillation neutrino mu en neutrino tau, dans le mode d'apparition. Les premiers événements en provenance du faisceau issu du Cern ont été enregistrés vers la fin de 2006.

Deux nouvelles expériences pour l'étude du troisième angle de mélange des neutrinos ont été approuvées en 2006 : Double Chooz, un ensemble de deux détecteurs installés auprès du réacteur de Chooz dans les Ardennes et la participation française à l'expérience T2K, au Japon, expérience d'oscillation utilisant le faisceau neutrino JParc illuminant un nouveau détecteur proche et le détecteur SuperKamioka.

Cosmologie

La construction de l'observatoire spatial Planck a été achevée en 2006. Planck a pour but la mesure des fluctuations du fonds diffus cosmologique avec une précision de 1 %. Cette mesure permettra d'étudier le mécanisme d'inflation. La charge utile de Planck est maintenant en cours de test pour un lancement au cours de 2008.

L'équipe de l'IN2P3 qui a participé au Supernova Cosmology Project (SCP) a partagé avec ses collaborateurs le prestigieux prix Gruber. SCP fut l'un des deux projets qui en 1998 ont mis en évidence, l'accélération de l'Univers, accélération qui serait due à une force répulsive, appelée énergie noire. Plusieurs chercheurs de l'IN2P3, en collaboration avec les équipes d'Insu et du CEA, ont développé une série d'instruments qui vont permettre l'approfondissement de ces premières mesures : Nearby Supernova Factory (SNIFS) et Supernova Legacy Survey, (SNLS). En 2006, Snifs a détecté les premières dizaines de Supernovae proches, dont l'analyse permettra d'augmenter la précision de mesure de l'équation d'état de l'énergie noire. SNLS, de l'autre côté, a publié en 2006 des résultats très cités, de grande sensibilité, qui ont permis une détermination de l'équation d'état de l'énergie noire avec une précision inégalée jusqu'à aujourd'hui.

En ce qui concerne la recherche de matière sombre, la collaboration de recherche de matière sombre baryonique Eros a publié ses résultats finaux, mettant des contraintes sévères sur l'existence de ce type de matière sombre. Par ailleurs l'observatoire de matière sombre non-baryonique Edelweiss est entré dans sa deuxième phase (Edelweiss-II) en installant une vingtaine de bolomètres dans une cuve cryogénique blindée au laboratoire de Modane. La prise de données a commencé à la fin de 2006.

Les équipes étudiant les micrométéorites, pour trouver des traces de la formation et de l'évolution de notre système solaire ont fait d'importantes publications sur le sujet à des revues prestigieuses (Nature...). Par ailleurs, deux expériences n-EDM et Granit utilisent les neutrons de l'III pour étudier le moment dipolaire du neutron et les états quantiques d'un potentiel gravitationnel, respectivement. Ils approchent le domaine de sensibilité où leur résultats auraient des répercussions sur les théories du Modèle Standard et des dimensions supplémentaires.

Observatoires de l'astroparticule

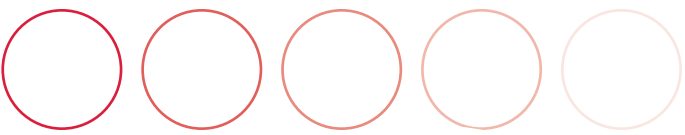
En ce qui concerne les expériences étudiant les phénomènes cosmiques de haute énergie l'IN2P3 est impliqué dans 2 observatoires majeurs au sol (Hess et Auger), un au fond de l'océan (Antares), deux observatoires spatiaux (Glast et AMS) et une expérience ballon (Cream). L'IN2P3 participe également à l'observatoire d'ondes gravitationnelles Virgo et la construction de Lisa-Pathfinder, mission spatiale technique préparant le lancement de l'observatoire spatial d'ondes gravitationnelles Lisa (à l'horizon 2018).

L'observatoire Hess, constitué de quatre télescopes déployés en Namibie, étudie les gerbes induites par des photons de très haute énergie (100 GeV à plusieurs TeV) à travers leur rayonnement Cherenkov. Il est en prise des données depuis 2003, et une extension (Hess-II) par un cinquième télescope de très grande surface est en construction avec date de mise en opération mi-2009. Le nombre et la qualité des résultats de Hess sont tels que l'on dit de lui qu'il inaugure l'astronomie de photons de haute énergie. Là où, avant lui, on ne connaissait qu'une petite dizaine de sources de rayons gamma énergétiques le nombre des sources détectées par Hess approche la centaine. Des données importantes sur la morphologie des sources et leur variation fine en temps permettent des analyses inégalées et des tests cruciaux des théories de l'origine des rayons cosmiques. Les exploits de Hess ont été couronnés par le prestigieux prix européen Descartes 2006.

L'observatoire Auger-Sud, constitué d'un ensemble de mille six cents détecteurs de particules associé à un système de vingt-quatre télescopes à fluorescence en phase finale de déploiement en Argentine, étudie les gerbes induites par des rayons cosmiques ultra-énergétiques (supérieures à un million de TeV). Auger a publié récemment l'évidence de corrélation des rayons cosmiques de très haute énergie avec les Noyaux Actifs de Galaxie. Ce dernier résultat peut aussi être considéré comme un pas très important vers l'astronomie avec des rayons cosmiques chargés de très haute énergie.

Une cuve du détecteur Auger. © Auger





Le télescope sous-marin Antares, qui sera constitué de douze lignes, instrumentées de photomultiplicateurs à une profondeur de 2400 m au sud de la Seyne-sur-Mer (Toulon), étudie les neutrinos de très haute énergie (100 GeV à plusieurs centaines de TeV). Au cours de 2006, cinq lignes ont été déployées qui font déjà d'Antares le plus grand télescope neutrino de hautes énergies de l'hémisphère nord et le seul en opération dans l'océan. Quelques centaines de neutrinos ont été détectées. Le déploiement sera complété au printemps de 2008.

Glast, le satellite Nasa pour l'étude du ciel gamma à haute énergie (de quelques dizaines de MeV à quelques dizaines de GeV), est un des projets majeurs du domaine; il augmentera le nombre des sources connues de phénomènes violents par deux ordres de grandeur.

Les contributions de l'IN2P3 ont été achevées (structure du calorimètre, calibration, *software* d'analyse et analyse) pendant la période 2004-2006. Il est en cours de test pour un lancement au printemps 2008.

AMS est l'observatoire de la station spatiale internationale (ISS) pour l'étude des rayons cosmiques de haute énergie et la recherche d'antimatière. Les contributions de l'IN2P3 (calorimètre et détecteur Rich) ont été achevées en 2004-2006. La charge utile est en cours d'intégration au Cern. AMS souffre des incertitudes du calendrier de la navette spatiale survenues après l'accident de 2003. La collaboration vise à un lancement au cours de 2009. Une partie du programme d'AMS sera effectuée par Cream, un ballon de vol de longue durée pour la détection des rayons cosmiques chargés. Le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo est un interféromètre laser constitué de deux bras orthogonaux de trois kilomètres de longueur, situé à Cascina/Pise en Italie et opéré par le consortium franco-italien (CNRS/INFN) Ego. La collaboration Virgo a fait de très gros progrès, en 2004-2006, dans la mise au point de l'interféromètre. L'augmentation de la sensibilité, maintenant proche de celle de Ligo, antenne d'ondes gravitationnelles américaine, a permis la prise de données continue en coïncidence pour une période de quatre mois en 2007.

Il y a trois infrastructures de l'IN2P3 pour l'astroparticule et le neutrino qui demandent des relations étroites de coopération avec la région: le télescope Antares (région Paca), le Laboratoire Souterrain de Modane (région Rhône-Alpes) et le détecteur Double Chooz auprès du réacteur Chooz (région Champagne-Ardenne). Des améliorations des infrastructures, des extensions ou de nouvelles constructions sont en discussion dans des cadres bilatéraux et de CPER avec les régions respectives. Mener à terme ces constructions est une des grandes priorités de l'IN2P3 pour les années à venir.

PROGRAMME PACE – AVAL DU CYCLE

Hubert Doubre

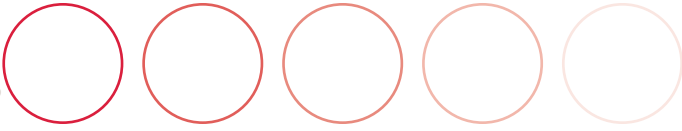


Le programme PACE a pris fin en 2006, après les quinze ans de recherches prévus par la loi Bataille de 1991. Beaucoup d'efforts ont été consacrés à présenter le bilan de huit années du programme.

Ils se sont tout d'abord concrétisés par la parution d'une brochure résumant le travail des groupements et actions concertées de recherche : il était important que, même modeste, la contribution du CNRS puisse être mise en regard des rapports que le CEA et l'Andra, pilotes des recherches sur les trois axes, ont remis en 2006. Mi-2005, le CNRS a participé au colloque organisé par le ministère de la Recherche : « Recherches sur les déchets nucléaires, acquis et perspectives à l'échéance 2006 ». Des documents illustrant les recherches ont également été présentés à l'Office Parlementaire des Choix scientifiques et Techniques. Le travail du CNRS sur les années passées a été reconnu, et le rôle de l'organisme a été précisé, dans ce domaine, pour les années à venir.

L'objectif du groupement de recherche Gedepeon (Gestion des Déchets et Production D'énergie par des Options Nouvelles) qui réunit le CEA, le CNRS, EDF et Areva, est l'étude de systèmes nucléaires innovants, dans une approche intégrée portant aussi bien sur la réduction de la quantité et de la radiotoxicité des déchets que sur la production d'énergie. Les travaux ont concerné des mesures (directes à Bordeaux, Geel et au Cern, indirectes à Orsay) de sections efficaces d'intérêt, en particulier capture et fission des neutrons sur les actinides mineurs et noyaux du cycle du thorium, complétées par des études de sensibilité et de propagation des incertitudes dans les calculs de neutronique. La réalisation de composants de systèmes sous-critiques a franchi deux étapes : les conclusions tirées de l'expérience Museiv à Cadarache et la réussite de l'expérience Megapie (un semestre de faisceau d'1 MW) sur une cible de Pb-Bi liquide. Les cavités Spoke pour la partie « énergie intermédiaire » de l'accélérateur haute intensité de protons sont en cours de qualification. Sur les systèmes innovants, les travaux ont été consacrés aux réacteurs à sels fondus, dont le combustible est à base de thorium : coefficients de sûreté, surgénération, transition depuis les réacteurs actuels vers de tels systèmes. On notera l'évolution des thèmes vers les systèmes surgénérateurs et les matériaux associés, et aussi la production d'hydrogène dans des réacteurs fonctionnant à haute température (au-delà de 800°C). Pareille évolution est également observée avec le groupement Paris (Physicochimie des Actinides et autres Radioéléments aux Interfaces et en Solution, en collaboration avec l'Andra, le CEA et EDF), qui consacre maintenant une partie de ses activités aux problèmes de séparation et de retraitement par voie pyrochimique dans des sels fondus à basse et haute température, d'extraction par fluides supercritiques... Ces travaux sont soutenus par le Programme commun de recherches (PCR) sur les sels fondus (études thermodynamiques de différents milieux, extraction et comportement des produits de fission en milieu sels fondus, structure physicochimique du milieu, simulation par dynamique moléculaire, recherche et validation de matériaux en contact avec les sels fondus). Une évolution encore plus nette est observée pour le groupement de recherches Nomade (Nouveaux matériaux pour déchets) devenu Matinex (Matériaux innovants en conditions extrêmes), en collaboration avec le CEA, EDF et Areva. En effet, les travaux consacrés aux matrices de conditionnement pour les actinides sont d'une part terminés pour l'essentiel, d'autre part ne correspondent plus à une option à long terme. Par contre, il est apparu indispensable de faire porter les efforts sur cette partie de chimie du solide qui peut être associée au fonctionnement de systèmes nucléaires à haute température. C'est pourquoi le groupement s'est recentré sur l'étude et la caractérisation des matériaux céramique, en particulier pour le combustible.

Les travaux du groupement Forpro (Formations Profondes) ont été étroitement couplés à l'implantation du laboratoire souterrain sur le site de Meuse/Haute-Marne, pour caractériser le comportement à long terme de la formation géologique susceptible d'accueillir un stockage. Dans une première phase, accompagnant les forages de l'Andra, les échantillons recueillis ont fourni une image détaillée des formations géologiques rencontrées, de l'évolution passée de la pile sédimentaire et des transferts l'ayant affectée. Une seconde phase, pendant le fonçage des puits, a poursuivi l'analyse structurale, paléontologique, sédimentaire et géochimique des sédiments remontés. Via la géochimie (mise au point d'une méthode de datation des eaux souterraines à l'aide du ⁸¹Kr et couplage avec la méthode au ³⁶Cl), l'accent a été mis sur la détermination des vitesses d'écoulement des eaux des



niveaux perméables résiduels des formations calcaires encadrant la couche d'argilites. D'autre part, la très faible évolution diagénétique de l'argilite de Bure et en particulier l'absence d'interaction eau-roche détectable à l'échelle des minéraux ont été confirmées. La zone d'endommagement en parois de galeries et de puits a été reconnue et caractérisée.

Depuis l'été 2005, les équipes du CNRS réalisent deux expériences dans le laboratoire souterrain, sur les déformations différées de la paroi en fonction des conditions de saturation en eau et sur l'impact de l'ouverture d'une galerie sur les propriétés de confinement de la couche hôte. Par ailleurs des méthodes physiques innovantes d'imagerie 3D de la zone d'endommagement ont été testées au laboratoire du Mont-Terri (Suisse). Des analyses systématiques microbiologiques ont été menées avec succès sur les argilites de Bure et du Mont-Terri afin de distinguer les populations bactériennes autochtones dormantes des populations exotiques introduites lors des travaux souterrains.

En chimie, Paris a réorienté une partie de ses travaux vers la rétention et la migration des radionucléides dans les milieux argileux : modélisation des échanges, mécanismes réactionnels aux interfaces (mécanismes de sorption), et constitution d'une base de données thermodynamiques. Les données recueillies ont permis de décrire les équilibres en jeu dans les processus de rétention des ions par les minéraux. Le taux de rétention des ions des radionucléides est maintenant évalué pour un ensemble de solides, dont la plupart intéressent le stockage. Les équipes se sont aussi attaché à comprendre les transformations structurales subies par le combustible usé au cours de son entreposage ou d'un éventuel stockage.

L'ampleur des échelles temporelles et spatiales pertinentes dans les analyses de sûreté et la complexité des phénoménologies en jeu (physique, chimie, mécanique, hydrogéologie) rendent indispensable la simulation numérique pour enrichir les données expérimentales.

Le groupement de Recherches Momas (Modélisations mathématiques et Simulations numériques liées à la gestion des déchets nucléaires), centré sur les mathématiques appliquées, fédère autour de lui cinq autres partenaires : l'Andra, le BRGM, le CEA, EDF et l'IRSN. Les travaux du GDR ont porté sur la consolidation des bases mathématiques et la production de nouveaux modèles, le développement de méthodes d'approximation, la production d'algorithmes efficaces et la quantification des incertitudes. Ces travaux concernent donc le stockage souterrain des radionucléides tel qu'il est envisagé en Meuse/Haute-Marne et les simulations doivent permettre d'arriver à des prédictions sûres pour des périodes de temps s'étendant jusqu'au milieu d'année. Les thèmes scientifiques abordés sont structurés sur quatre thématiques : les écoulements di-phasiques, le transport réactif et l'hydrologie, les méthodes multi-échelles et l'homogénéisation, enfin le traitement des incertitudes. Une part importante du travail est consacrée à des exercices de *benchmarking*, qui seuls permettent une mesure des outils de simulation utilisés et l'appropriation de nouvelles méthodes numériques et algorithmiques. Ces *benchmarks* ont porté sur le transport des RN en milieu bi- et tri-dimensionnel sur un horizon allant au million d'années et sur la simulation d'excavation en comportement hydromécanique fragile. Ces *benchmarks* sont évidemment une opportunité de collaboration étroite avec l'Andra.

Le GDR a réorienté une partie de ses efforts vers la rétention et la migration des radionucléides dans les milieux argileux : modélisation des échanges, mécanismes réactionnels aux interfaces (mécanismes de sorption), et constitution d'une base de données thermodynamiques.

Dès son origine, le programme Pace a noué des relations fortes avec certains chercheurs en sciences humaines et sociales. Cette ouverture disciplinaire s'est traduite par plusieurs opérations menées en partenariat avec le programme « Risques Collectifs et Situations de Crise » (CNRS) et le Centre de Sociologie de l'Innovation (CSI-École des Mines de Paris). En 2005, un séminaire interdisciplinaire a été organisé par l'Axe Risques collectifs et Situations de Crise de la MSH-Alpes et le CSI, avec le soutien de Pace. Il a donné lieu à la publication d'une brochure « Recherche et déchets nucléaires – une réflexion interdisciplinaire » largement diffusée, après un intense échange entre chercheurs de disciplines différentes. Cet échange a permis de bien caractériser les divers points de vue et de rapprocher les communautés.

Le conseil d'administration du CNRS a mis en place en mars 2007 un nouveau programme interdisciplinaire nommé Pacen sur les mêmes thèmes, suivant en cela les recommandations émises au cours de la discussion de la loi de juin 2006.

POLITIQUE DANS LE DOMAINE DES ACCÉLÉRATEURS INSTRUMENTATION

Alex Mueller

Les accélérateurs sont des outils essentiels du développement scientifique dans les domaines de la physique nucléaire et des hautes énergies. Une forte activité de R&D (pouvant être suivie d'une phase de construction) existe au sein de l'IN2P3 et de la DSM. Elle vise à accompagner les besoins exprimés à travers les évolutions de nos champs scientifiques. Par ailleurs plusieurs programmes scientifiques du futur exigent le développement (dans la mesure du possible en partenariat avec des industriels) de nouvelles techniques de détection assurant des performances de pointe en termes de résolution spatiale et temporelle, une intégration accrue, une complexité croissante et un coût maîtrisé (détecteurs CMOS et à micropattern, détecteurs bolométriques, développements en microélectronique...).

L'Institut a toujours considéré le caractère stratégique d'une activité de R&D vigoureuse dans le domaine des accélérateurs. En effet, les avancées de la recherche fondamentale sont largement conditionnées par les progrès réalisés sur ces instruments de plus en plus complexes. Il est clair que les retombées sociétales sont également très importantes. Comme pour les autres pays, cela passe par une concentration des moyens et une coordination efficace entre les laboratoires: en 2005 avait été mis en place une structure copilotée entre l'IN2P3 et le CEA/DSM/Dapnia, le pôle accélérateurs. Des collaborations, en particulier avec le Cern sont également mises en place. Le projet Spiral2, dont la construction a démarré au Ganil (Caen) est une bonne illustration de la politique menée par l'Institut: la R&D entamée depuis des années sur les cavités accélératrices et les accélérateurs de forte puissance a pu ainsi se concrétiser. À plus petite échelle, la mise en service progressive de l'accélérateur linéaire d'électrons Alto au tandem d'Orsay soutient la R&D sur la production d'ions radioactifs au profit de Spiral2.

Cette politique s'est poursuivie, en particulier dans les domaines privilégiés suivants, dans le cadre européen le plus souvent:

- R&D sur les cavités accélératrices supraconductrices de fort gradient et les coupleurs de puissance en vue des projets ILC ou Eurisol, ainsi que sur les sources de protons et d'ions lourds intenses (>1mA), nécessaire pour tous les accélérateurs de forte puissance. Ces accélérateurs ont des champs d'application multiples: outre la recherche fondamentale en physique nucléaire et des particules, on peut citer la source de spallation européenne, la transmutation des déchets radioactifs avec un couplage réacteur/accélérateur, nécessitant un accélérateur à très haute fiabilité pour garantir un fonctionnement stable du réacteur. La R&D se poursuit également dans le domaine des sources, afin d'en améliorer constamment les performances, en particulier le dispositif « multiplicateur de charge » est



crucial pour les installations de production d'ions radioactifs, tels Spiral2 ou Eurisol.

- Continuation des efforts en vue de l'achèvement de l'injecteur de protons de haute intensité Iphi pour le Cern (3 MeV, 100 mA, horizon 2008) en vue d'augmenter l'intensité des machines du Cern (projet Linac4, 160 MeV 10 mA) et de se préparer à des faisceaux intenses de neutrinos ou d'ions lourds radioactifs (projet SPL) au Cern couplés éventuellement à Eurisol (beta beams horizon 2015-2020). L'IN2P3 a en charge dans le projet Iphi la ligne de faisceau, les diagnostics, le vide et le bloc d'arrêt notamment. En effectuant des essais de longue durée, Iphi permettra un test en vraie grandeur des aspects fiabilité, important pour les ADS. Pour la partie accélérateur linéaire à plus haute énergie de ces accélérateurs pour ADS, des concepts innovants sont développés.
 - Développement des sources d'électrons pour ILC, avec le travail mené par le Lal sur le photo injecteur dans le cadre d'un projet européen du 6^e PCRD. Des développements sur la source de positrons, par la canalisation ou le processus Compton sont également poursuivis au Lal.
 - Participation à la R&D sur Clic, avec le Cern, en vue d'un collisionneur linéaire $e^+ e^-$ au Cern multi-TeV au delà de 2020.
 - Travail sur la problématique du point d'interaction des futurs collisionneurs (ILC, Clic) au Lal : à l'interface de la physique des particules et des accélérateurs, les performances ultimes en sont complètement dépendantes.

Plusieurs sujets sont abordés : interaction faisceau-faisceau, schémas d'extraction post collision, participation au projet ATF2 avec le Kek (Japon) pour la validation de nouveaux principes de focalisation finale et conception de la zone d'interaction.

- Veille technologique sur les techniques d'accélération, en incluant celles très innovantes (accélération par laser par exemple).
- Mise à la disposition de la société les progrès accomplis : machines médicales, couplage d'accélérateurs à des réacteurs de recherche pour préparer les réacteurs hybrides du futur en vue du retraitement des déchets nucléaires (projet Guinevere après Genepi).
- Pour mener à bien toutes ces missions, les laboratoires Lal et Ipno ont monté en collaboration avec le CEA une plateforme technologique de recherche distribuée en Ile-de-France, SupraTech. Cette plateforme comprend des installations à Saclay pour le CEA, à l'Ipno et au Lal pour l'IN2P3. Comme fait marquant de l'année 2006 on peut citer le lancement de la salle blanche à l'Ipno.

L'INFORMATIQUE À L'IN2P3

François Étienne



Au cours de la période 2004-2006, les développements logiciels entrepris dans les laboratoires de l'IN2P3 s'inscrivent la plupart du temps dans des projets de grande envergure impliquant plusieurs dizaines voire centaines de contributeurs, et font donc appel à des technologies de production collective de logiciels, qui ont fait l'objet d'une école thématique en octobre 2004 (<http://ecoleinfo04.lal.in2p3.fr/>). Plusieurs laboratoires offrent des structures d'hébergement de projets logiciels avec des fonctionnalités de documentation collaborative (wikis¹), de gestion de code (svn²), et de rapport de défauts et de demande de changements, dont Trac³ est un exemple typique. De nombreux outils collaboratifs (forums, publication d'agenda, systèmes de gestion de réunions et de conférences, de réservation de salles) ont été mis en place.

Il faut souligner les nombreux contacts qui ont lieu entre les informaticiens de l'IN2P3, soit directement de laboratoire à laboratoire, mais aussi très souvent grâce au point de focalisation naturel qu'est le centre de calcul de l'IN2P3. Cet aspect communautaire, déjà ancien mais renforcé par la mise en place des infrastructures de grille, a culminé lors de la tenue des cinquièmes Journées Informatique à Lyon en septembre 2006 (<http://lapp.in2p3.fr/JI06/>).

Une grande tendance préfigurant l'évolution globale de l'informatique à l'IN2P3 est la mise en place progressive d'opérations de mutualisations impliquant une décentralisation de services communs à l'ensemble de la discipline en France, comme la sauvegarde des données des laboratoires à distance, désormais économiquement viable. Cette approche permet de trouver un bon équilibre entre la mise à disposition des chercheurs de l'Institut de ressources informatiques massives tout en conservant une proximité des personnels chargés de leur mise en œuvre.

Ces évolutions ont généralement entraîné des modifications importantes des infrastructures matérielles (multiplication et diversification des machines à gérer, parfois refonte radicale des salles machines) et logicielles (importance croissante des produits open-source, renforcement de la sécurité). Mais elles ont aussi impliqué la réorganisation des ressources humaines des services informatiques (place grandissante du support du poste de travail, y compris à distance, problématique de l'intégration des ressources locales et des ressources partagées au niveau de la grille).

À ce titre on peut citer parmi les évolutions qui ont le plus marqué l'informatique locale des laboratoires de l'IN2P3 :

- la mise en place des premiers sites Tier-2 et Tier-3 du projet LCG
- la banalisation de l'ordinateur portable comme poste de travail
- la systématisation de la couverture des bâtiments en réseau sans fil
- l'émergence de l'emploi d'outils de virtualisation au niveau des serveurs centraux.

1 Un wiki est un système de gestion de contenu de site Web qui rend les pages Web librement et également modifiables par tous les visiteurs autorisés.

2 Subversion (parfois abrégé SVN) est un logiciel informatique de gestion de versionnement.

3 Un wiki orienté développement et support technique.

La sécurité informatique à l'IN2P3

Pendant la période 2004-2006 le caractère stratégique de la sécurité informatique à l'IN2P3 s'est confirmé. En effet la dépendance de toutes les activités de l'Institut envers l'outil informatique s'est renforcée, la disponibilité des ressources informatiques est devenue un enjeu majeur que ce soit pour les applications de bureautiques et de messagerie ou pour les simulations du LHC. Parallèlement le périmètre de la sécurité s'est élargi avec l'accroissement fort de la mobilité la mise en réseau systématique des systèmes de contrôle/commande et l'ouverture de l'IN2P3 à la grille de calcul.

Dans la même période les attaques informatiques se sont intensifiées. À titre d'exemple les serveurs SSH de l'IN2P3 enregistrent chacun, aujourd'hui environ 10 000 tentatives frauduleuses de *login*/mois à comparer à quelques tentatives/mois en 2003 !

Face à ces risques le groupe sécurité informatique de l'IN2P3 a réagi par le renforcement des règles de filtrage en entrée de site (les accès Telnet, Imap, Shell ont tous été remplacés par leur version sécurisée SSH, Imaps), par le cloisonnement des réseaux avec par exemple la mise en place systématique de réseaux visiteurs, par le renforcement de l'authentification grâce à l'école authentification d'octobre 2005, et enfin par la mise en place de systèmes de détection d'intrusion avec en particulier le déploiement du logiciel Extra développé grâce à la mutualisation des efforts du LPSC de l'IPNL et du CC. Cet outil a été adapté pour être conforme avec la politique de gestion de trace du CNRS déclarée à la Cnil en 2005.

Le Centre de Calcul de l'IN2P3/CNRS (<http://cc.in2p3.fr>)

Le Centre de Calcul de l'IN2P3/CNRS fournit des ressources de calcul et de stockage massif à l'ensemble des chercheurs de l'IN2P3, ainsi que des services de communication, de travail collaboratif et de multimédia (hébergement sites web, vidéoconférence, courrier électronique, agenda, gestion de documents électroniques, etc.). Il est financé à 80% par les Très Grands Équipements (TGE) du CNRS et à 20% au titre d'une convention avec le Laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Dapnia) du CEA. Principalement utilisé par des chercheurs en physique corpusculaire, le CC-IN2P3 a ouvert ses ressources aux chercheurs d'autres disciplines (principalement des sciences de la vie). Dans le cadre de la politique de valorisation de l'IN2P3, le CC-IN2P3 mène également une stratégie d'ouverture auprès des industriels, notamment dans la région Rhône-Alpes. Depuis 2004, le CC-IN2P3 a conforté son rôle dans le développement des grilles de calcul : il est l'un des onze centres mondiaux de traitement de premier niveau (Tier 1) des données du LHC et l'un des quatre seuls centres qui devront fournir la capacité de stockage et de calcul pour l'ensemble des quatre expériences installées sur l'accélérateur. Une fraction importante du personnel participe au déploiement et à l'opération de la grille pluridisciplinaire Egee (Enabling Grids for E-Science).

Depuis 2004, les ressources du CC-IN2P3 sont en forte augmentation afin de répondre aux besoins des expériences du LHC prévu pour démarrer en 2008. Aujourd'hui, le CC-IN2P3 dispose de près de 1200 machines biprocesseurs, équivalent à plus de onze millions de SpecInt2000 (~26 Téraflopps), utilisées en permanence et simultanément par environ 6000 tâches différentes. Le CC-IN2P3 a également considérablement augmenté ses capacités de stockage qui atteignent aujourd'hui 2 Pétaoctets sur disques et plus de 5 Pétaoctets sur cartouches magnétiques.

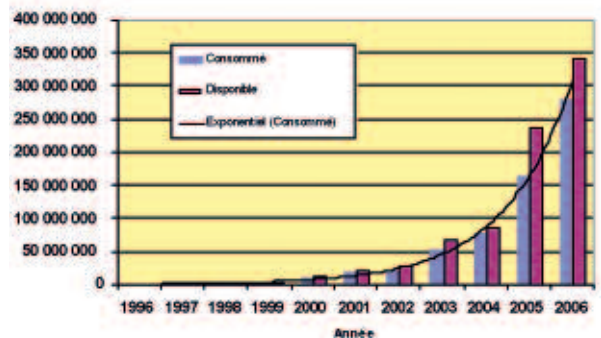
Parallèlement à la forte montée en puissance pour le LHC, le CC-IN2P3 continue de faire évoluer ses ressources et son environnement pour satisfaire les besoins des autres expériences. Le Centre de Calcul continue à jouer un rôle majeur pour l'exploitation des données de BaBar à Slac et de D0 à Fermilab. Plusieurs expériences d'astroparticules utilisent largement le CC-IN2P3, et en particulier sa capacité à stocker, distribuer et traiter des masses énormes de données.

Depuis plusieurs années, la salle informatique du CC-IN2P3, tout comme celles de la plupart des grands centres informatiques, doit faire face à une demande de plus en plus grande en termes de puissance électrique et de capacité de refroidissement. En 2006 d'importants travaux de remise à niveau des infrastructures de la salle machine ont dû être entrepris afin de porter à 1 MW la puissance électrique utilisable pour l'informatique et de remettre complètement à niveau le système de climatisation. D'autre part, même après cette jouvence, la salle machine ne pouvant pas supporter à elle seule l'évolution des ressources du CC-IN2P3 après 2009, une extension du bâtiment est engagée. Ce projet prévoit un doublement de la surface de la salle machine et la construction de nouveaux espaces de travail (bureaux, salles de réunion, amphi). Ce projet est inscrit dans le Contrat de Projets État Région 2007-2013 et est fortement soutenu par le CNRS.

Entre 2004 et 2006, le personnel du CC-IN2P3 a augmenté de plus de 10 «équivalents temps pleins», une grande partie de cette main d'œuvre très qualifiée est liée à la mise en place et à l'exploitation du projet Egee.

Le CC-IN2P3 est un acteur important du processus de mutualisation des ressources informatique à l'IN2P3. L'acquisition en 2006 des licences pour le logiciel GPFs pour l'ensemble des laboratoires intéressées ainsi que la centralisation des sauvegardes des données pour quelques laboratoires pilotes, illustrent cette politique. Enfin, 2006 a été l'occasion pour le CC-IN2P3 de fêter ses vingt ans à Lyon, en présence de près de 300 personnes.

Évolution de la capacité CPU au CC-IN2P3



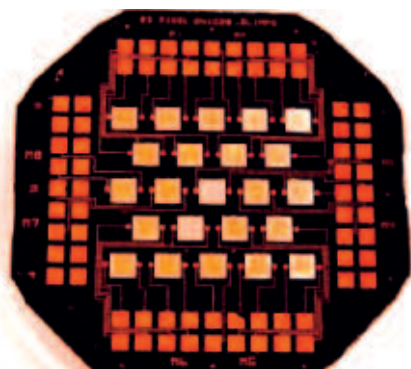
L'INSTRUMENTATION À L'IN2P3

Pascal Dargent

Les activités de R&D en « Instrumentation » à l'IN2P3 sont à la source de la construction des détecteurs tant en Physique des Particules qu'en Physique Nucléaire et en Astroparticules. Par « Instrumentation » on entend les développements de *Capteurs* (ou *senseurs*), *monocomposants* ou *matriciels*, et leur *électronique de proximité*. Ces produits constituent des *sous-systèmes de détecteurs*, ou d'*accélérateurs*. Les besoins des projets de l'IN2P3 sont souvent très spécifiques, mais amènent des développements précurseurs pour des applications pluridisciplinaires, voir industrielles.

Les technologies mises en œuvre couvrent les domaines des scintillateurs, des tubes photomultiplicateurs, des détecteurs silicium, germanium, des détecteurs à gaz, des bolomètres, de la microélectronique CMOS et des technologies intégrées de traitement numérique et analogique du signal.

Matrice de 23 senseurs
TES



Bolomètres

Le programme DCMB (Développement Concerté de Matrices de Bolomètres), cofinancé par le Cnes, coordonne les efforts de dix laboratoires du CNRS, dont trois de l'IN2P3 (APC, CSNSM et LPSC). Il vise à résoudre, en amont des expériences futures telles que celles destinées à l'étude du fond cosmologique micro-ondes, les problèmes liés à la fabrication et à la lecture de matrices de bolomètres fonctionnant à très basse température.

Il se traduit par la réalisation de matrices (23 et 204 pixels) sur wafers de Silicium avec membranes de Si_3N_4 , et la maîtrise de deux types de thermomètres en couches minces adaptés à la lithographie :

- Thermomètres Haute Impédance (HI)
- Thermomètres Supraconducteurs (TES)

L'électronique cryogénique associée fait également l'objet d'études avancées, notamment la lecture multiplexée de TES par Squid.

Matrices CMOS

Les capteurs CMOS sont développés à l'IPHC depuis de nombreuses années, avec pour premier objectif d'équiper des détecteurs de trajectoires (détecteurs Star, CBM...). Les récents développements de composants EB-CMOS (Electron bombarded CMOS), associant les technologies de tube à vide à celles des capteurs CMOS amincis, ouvrent des champs d'application pluridisciplinaires grâce à des performances exceptionnelles d'imagerie à comptage de photon.

Une première européenne, rendue possible grâce à une collaboration fructueuse de l'IPHC et de l'IPNL avec la société Photonis SA, a pu se concrétiser avec la réalisation d'un démonstrateur (ebMimosa5) de 1024x1024 pixels, apportant une résolution de 13 μm et une vitesse de lecture de 50 images par seconde.

Les objectifs sont maintenant d'atteindre un pitch de 10 μm , et une vitesse de lecture de 10 à 100 fois plus élevée, tout en conservant la sensibilité au photon unique. Un tel composant permettra notamment d'améliorer la microscopie par bioluminescence et par fluorescence *in vivo*, et l'analyse du comportement de molécules dans les cellules vivantes.

L'avenir de ces travaux est stratégique pour la physique des hautes énergies, et les équipes de l'Institut restent à la pointe de la technologie. Les évolutions de la microélectronique vers les techniques d'intégration multicouches (3D) est, notamment, un axe très prometteur.

PROGRAMMES PLURIDISCIPLINAIRES

1

Interface avec les sciences de la vie

Gérard Montarou

Le contexte au sein de l'Institut

Les activités situées à la frontière entre la Physique, la Biologie et la Médecine connaissent depuis 2000 un véritable essor au sein de l'IN2P3. Cette thématique implique actuellement 10 des 20 laboratoires de l'Institut. Dans tous ces laboratoires ce domaine d'activité est maintenant reconnue et accepté comme une thématique de recherche à part entière. Dans certains de ces laboratoires, les équipes impliquées dans cette thématique ont atteint une taille suffisante qui leur permet de jouer un rôle majeur au côté de partenaires issus du domaine des Sciences de la Vie et de la Santé, que ce soit par des collaborations locales avec des CHU et des centres anticancéreux, ou avec des laboratoires de l'Inserm, du CEA, du CNRS et de l'IRSN. Globalement le nombre de chercheurs et d'ingénieurs impliqués dans ces équipes atteint une soixantaine de personnes, dont un nombre non négligeable provient maintenant d'autres partenaires (CHRU, hôpitaux, département SDV du CEA ou du CNRS). Par exemple le Groupe Interface Physique-Biologie de l'IPN d'Orsay est devenu une UMR interdisciplinaire (l'IMNC), relevant à la fois du département SDV et de l'Institut et qui regroupe des physiciens, des biologistes et des médecins. Chaque année, environ une dizaine de doctorants et post-doctorants obtiennent des financements par l'intermédiaire de partenariats avec des acteurs publics ou privés externes à l'Institut.

Les grands thèmes de recherche abordés au sein des équipes de l'Institut sont clairement identifiés :

- La caractérisation physico-chimique pour le vivant utilisant des méthodes d'analyse nucléaires ;
- L'utilisation de nanotechnologie pour la mise au point de biomatériaux ;
- L'interaction rayonnement-matière biologique pour la radiobiologie sur un vaste domaine d'échelle ; c'est-à-dire de l'interaction de rayonnement avec des molécules d'ADN, en passant à l'irradiation de cellule par microfaisceau ou macrofaisceau d'ions dans le cadre de protocoles expérimentaux de plus en plus sophistiqués ;
 - La simulation de l'interaction rayonnement-matière au moyen d'une plateforme de calcul commune (Geant4), basée au CCIN2P3, avec un domaine d'application allant du microscopique (échelle de la cellule pour la radiobiologie) jusqu'au macroscopique (plan de traitement en radiothérapie) ;
 - Développements en imagerie médicale et biologie pour la conception de sondes per-opératoires chirurgicales diverses, pour le développements de systèmes multimodaux pour l'imagerie du petit animal (corrélation de l'image tomographique fonctionnelle à l'image anatomique par combinaison TEP/CT ou TEMP/CT), et enfin pour l'utilisation de concepts technologiques innovant pour l'amélioration des tomographe cliniques ;
 - Plus récemment, deux nouvelles thématiques ont pris un essor considérable :
 - La thérapie par rayonnement ionisant ; du développement de systèmes évolués de dosimétrie pour la métrologie des faisceaux en radiothérapie à la mise au point de système de contrôle de la qualité des traitements de tumeurs localisées par faisceau d'hadron (proton et carbone) ;
 - L'utilisation des grilles de calculs pour la simulation en imagerie médicale, l'exploitation des capacités de calcul pour la génomique et le stockage des données pour le traitement des données médicales ;

Les atouts de l'Institut

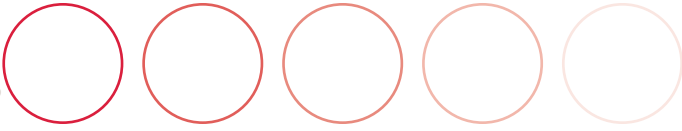
L'Institut présente toutes les caractéristiques pour jouer un rôle majeur à l'interface entre la Physique, la Biologie et la Médecine. La liste des activités déjà existantes et ébauchées dans la section précédente en témoigne largement. Ces atouts relèvent bien entendu des compétences des laboratoires en instrumentation, en simulation, en électronique, et de la force de leurs services techniques qui sont autant d'éléments favorables au développement d'outils originaux et innovants pour les Sciences de la Vie. C'est le cas pour les systèmes d'imagerie médicale nucléaire actuels qui sont très souvent issus de développements issus de la recherche fondamentale en Physique.

En règle générale, les laboratoires de Biologie ou les services de Médecine initient des demandes spécifiques nécessaires pour répondre aux nouveaux besoins de diagnostics plus performants dans les domaines de la santé, mais n'ont en général pas les ressources et l'expertise nécessaires au développement de ces instruments. *A contrario*, les laboratoires de l'Institut possèdent les capacités en terme d'instrumentation qui permettent la mise des instruments répondant à ces besoins.

Un modèle de coopération entre médecins et physiciens est intervenu notamment lors des développements de systèmes de détection radioactifs et optiques per-opératoire dont le but est de guider le chirurgien au cours d'une intervention. La culture de projet et de coopération communément ancrée dans la culture des laboratoires de l'Institut a largement favorisé le dialogue permanent entre groupes partenaires provenant de domaines différents pour l'amélioration de systèmes médicaux performants. Parmi les nombreux exemples que l'on pourrait mettre en avant, trois particulièrement remarquables peuvent être mis en avant. Le traitement des données sur grille informatique constitue un enjeu majeur pour les équipes de recherche des Sciences de la Vie et le développement des biotechnologies appliquées au domaine de la santé. Le développement des technologies de grille figure parmi les choix stratégiques des agences de financement de la recherche. En collaboration avec le département SDV, l'Institut a été activement impliqué dans ces développements à travers des projets européens DataGrid (FP5) et Egee (FP6) et le réseau d'excellence Embrace (FP6) conduit par l'Institut Bioinformatique Européen. La mise en place de l'Institut des Grilles, dont le centre de calcul de l'Institut est un des éléments majeurs est également un atout fondamental pour déployer efficacement les applications de grille pour les Sciences de la Vie.

Les électroniques de lecture associées aux photodétecteurs de plus en plus performants sont également un domaine où l'expertise des laboratoires de l'Institut impulse de plus en plus d'applications innovantes dans le domaine de l'imagerie. Le réseau des microélectroniciens de l'ensemble des laboratoires de l'Institut a été impliqué et de nombreux développements ont été entrepris par les groupes impliqués dans cette activité.

Enfin les derniers développements émergents pour la radiobiologie et la radiothérapie qui exploitent l'expérience acquise par les chercheurs et les ingénieurs auprès des accélérateurs, ainsi que le contrôle des faisceaux et des systèmes de détection associés, prennent une importance de plus en plus grande dans le contexte des nouveaux centres de traitement actuellement en cours de construction (Nouveaux centre de Protonthérapie à Orsay, Centre Etoile à Lyon, centre CNAO à Pavie, projet Archade à Caen).



La mise en place d'une stratégie d'ouverture et de coopération adaptée

Ces dernières années ont été marquées par une ouverture de plus en plus importante des équipes de l'Institut et les différents établissements de recherche en lien avec de domaine de la santé et des sciences de la vie. Cela se traduit par des partenariats très forts au niveau régional, ainsi que par des participations de plus en plus nombreuses aux campagnes d'appel à projet national lancées par le CNRS ou l'ANR, voir européen dans le cadre des Programmes Cadre de Recherche de l'Union européenne. Cette ouverture vers les autres acteurs de la recherche dans le domaine des sciences de la vie et de la santé par une politique de co-évaluation des activités de certaines équipes de l'institut.

C'est dans ce sens que les laboratoires les plus investis ont demandé un rattachement secondaire à la section 30 (thérapeutique et médicaments : concepts et moyens) et que l'IN2P3 conforte son association aux départements liés à cette même section (SPI, SDV).

La mise en place du plan national contre le cancer, avec la création de l'Inca et de sept cancéropôles régionaux, en charge de la coordination de ce plan, a également impulsé un plus grand nombre de partenariat entre des équipes de l'Institut et des établissements cliniques (CHRU ou centre anticancéreux régionaux). Parmi les actions retenues par l'Inca, l'utilisation de faisceaux d'hadrons pour le traitement d'un certain nombre de pathologies cancéreuses est une thématique qui a suscité un grand écho dans la communauté des équipes de l'IN2P3. La rénovation du Centre de protonthérapie d'Orsay a impliqué la participation d'ingénieurs de l'Institut, notamment de l'IPN d'Orsay. La décision par le ministère de la Santé de construire le centre Etoile à Lyon a impulsé la mise en place d'une synergie de partenariat entre divers établissements de Rhône-Alpes. De même le LPSC a participé ces dernières années de manière active à la construction du centre d'hadronthérapie CNAO à Pavie.

Dans ce contexte très dynamique, la mise en place du projet Archade (Advanced Resource Centre for HADrontherapy in Europe) pour la création à Caen un Centre européen de ressources en hadronthérapie, équipé d'une machine dédiée capable de délivrer des protons et des ions carbone pour faire de la recherche et du développement au plan technologique, de la formation. Ce centre pourrait devenir dans le futur l'élément central d'un programme structurant au niveau national voir européen et où les équipes de l'IN2P3 pourraient jouer un rôle majeur.

Une volonté de coordination

Les équipes de recherche d'une dizaine de laboratoires de l'IN2P3 se sont associées pour demander fin 2004, la création d'un groupement de recherche dont le thème principal concernait le développement de nouvelles approches méthodologiques pour l'imagerie biomédicale que ce soit dans le domaine de l'instrumentation ou de la modélisation (GDR MI2B). Le but de ce groupement est de :

- faciliter les échanges entre les équipes de recherche de l'IN2P3 travaillant à l'interface entre la Physique et les Sciences de la Vie (Biologie, Médecine, Radiothérapie),
- faire émerger des projets de développement communs,
- favoriser l'ouverture vers des partenaires des Sciences du Vivant.

À son renouvellement, en 2006, le GDR MI2B a été favorablement évalué par les départements Mippu et SDV du CNRS qui exerce maintenant la cotutelle scientifique. Ce groupement devrait être une des solutions opérationnelles judicieuses pour la mise en place d'une réelle interdisciplinarité et de la valorisation des travaux engagés. Les spécialistes des diverses disciplines doivent pouvoir s'y retrouver à intervalles réguliers et y développer des projets pertinents du point de vue des différentes disciplines.

2

Le Spatial

Stavros Katsanevas

Recherche et développement pour le Spatial

Les chercheurs de Nemo3 se sont engagés dans un effort de R&D en vue d'un détecteur appelée Super-Nemo, qui aurait une sensibilité à la masse du neutrino supérieure à Nemo3 d'un ordre de grandeur. D'autres chercheurs ont développé des méthodes innovantes, et à la pointe au niveau mondial, de détection des gerbes atmosphériques à travers leur impulsion radio (projet Codalema).

Il y a aussi une activité intense en ce qui concerne les détecteurs bolométriques, tant pour la recherche de matière noire (Edelweiss) que pour la détection du fonds diffus cosmologique (matrices) dans un cadre interdisciplinaire. Des méthodes alternatives (He superfluide, scintillation) sont aussi étudiées pour la détection directe de matière noire. Le projet Brain a fait des tests de communication à la station Concordia de l'Antarctique et continue des tests au laboratoire en vue d'un détecteur de mesure de la polarisation du fonds diffus cosmologique. Des chercheurs de l'IN2P3 ont construit (en collaboration avec l'Insu, et l'aide du Cnes et du DOE) le prototype d'un spectrographe pour le projet de satellite Snap pour l'étude de l'équation d'état de l'énergie noire.

Il y a eu aussi en 2004-2006 des efforts importants de R&D pour l'amélioration des méthodes de photodétection (photodétecteurs de grande taille, hybrides, à grande sensibilité ou en silicium) conduites dans le cadre d'un GIS avec la société Photonis. Le Laboratoire des Matériaux Avancés de Lyon a continué à fournir des miroirs et autres éléments optiques avec des propriétés de pointe au niveau mondial.

Finalement, des systèmes d'acquisition larges, intelligents, synchrones, autonomes et distribués ont été développés dans le cadre des programmes de l'astroparticule et du neutrino (Opera, Auger, Antares). Ils pourraient avoir plusieurs autres applications qui vont du suivi de l'environnement à la prévision des risques et à la prévention des catastrophes.

Le Spatial est une très grande priorité transversale de l'IN2P3 en ce qui concerne l'astroparticule et la cosmologie. Pendant les années 2004-2006 les laboratoires de l'IN2P3 ont fourni une série de réalisations majeures pour le Spatial (Planck, Glast et AMS). Dans le futur proche on attend deux lancements importants en 2008 (Planck et Glast) et un pour 2009-2010 (AMS). Grâce à ces réalisations, Le Cnes a commencé à considérer l'IN2P3 comme un partenaire à part entière (collaboration Planck, coordination de projet pour LisaPathfinder et Lisa, collaboration sur le spectrographe Snap). Finalement le rôle de l'IN2P3 dans Glast et AMS, projets Nasa/Doe, est bien reconnu.

Feuille de route européenne

Les années 2004-2006 ont vu la fin de construction d'une série d'expériences ou observatoires qui ont été projetées autour de 2000. Ces réalisations ont commencé à porter leurs fruits et plusieurs publications majeures et résultats d'importance historique ont commencé à voir le jour (Hess, Auger, SNLS). Ceci montre que les risques pris il y a cinq à sept ans ont été bien mesurés. Aujourd'hui une nouvelle génération d'infrastructures se dessine, elle est du type Très Grand Équipement. Le futur doit être préparé en coordination avec nos partenaires européens et aussi mondiaux.

Cette coordination, traditionnellement faite dans le cadre d'ApPEC (Astroparticule European Coordination), a reçu une aide importante de la part de l'Union européenne en 2006. Cette dernière a financé le réseau d'agences Aspera (ASTroparticule European Research Area Network), émanation d'ApPEC,



coordonné par le
 DAS Astroparticules
 IN2P3 au nom du CNRS.
 L'UE a aussi financé un
 réseau voisin pour l'astrophysique,
 Astronet, coordonné par le DAS
 astrophysique Insu.

Dans le cadre d'Aspera une feuille de route et une série de priorités pour les grandes infrastructures de la décennie prochaine (2010-2020) est en préparation. En ce qui concerne les phénomènes cosmiques de haute énergie elles sont: un télescope sous-marin de taille 1 km³ en mer Méditerranée (suite d'Antares) pour l'astronomie neutrino, un grand réseau de Télescopes Cherenkov (suite de Hess) pour l'astronomie gamma de haute énergie et une réplique d'Auger à l'hémisphère Nord. En ce qui concerne les ondes gravitationnelles la suite du programme Virgo à advVirgo et jusqu'à une antenne de troisième génération (Einstein Telescope) est soutenue. En ce qui concerne les laboratoires souterrains, des détecteurs de l'ordre d'une tonne pour la détection de matière noire et la mesure de la masse du neutrino ainsi qu'un grand détecteur de l'ordre du mégatonne pour étudier le temps de vie du proton et l'astrophysique du neutrino ont une grande priorité. Pour abriter ces trois derniers il faudra étudier la modernisation et l'agrandissement du laboratoire souterrain de Modane dans un cadre international. Les décisions pour l'ordre de réalisation de ces infrastructures seront prises à l'horizon de 2010-2012 dans un contexte européen (ApPEC, Aspera) et mondial. En parallèle une grande mission spatiale d'astronomie gravitationnelle (Lisa) et un grand programme d'énergie noire complémentaire sol-espace (Large Synoptic Survey Telescope LSST et Snap/JDEM) sont à discuter avec les agences américaines DoE/NSF, l'Esa, la Nasa et le Cnes.

Une gerbe de rayon cosmique. © Aspera.

L'IN2P3 mène conjointement recherches fondamentales et appliquées en physique subatomique et actions de formation. La mission de formation recouvre un spectre très large, du monde académique au grand public, et cette mission s'avère particulièrement essentielle dans un pays où les choix politiques en matière énergétique ont donné une place dominante à la filière nucléaire. Cette préoccupation au niveau de l'enseignement s'est par ailleurs concrétisée par la mise en place, fin 1999, d'un groupe de travail, le GREPS (Groupe de Réflexion sur l'Enseignement de la Physique Subatomique) conjoint entre l'IN2P3 et le CEA, groupe qui a fonctionné jusqu'en 2004. Ce groupe devait proposer des actions, pour tenter de « réagir » à la désaffection des jeunes pour les disciplines scientifiques et tout particulièrement la Physique. Il s'agissait également d'élargir la mission de l'Institut en termes de formation et d'information du public, notamment des jeunes, au niveau des thématiques sociétales sensibles que sont le nucléaire et ses applications.

Le Greps a mis en place plusieurs actions en direction des jeunes et de leurs enseignants dont les deux principales sont la création d'une école d'été annuelle et la préparation de conférences pour les lycéens. Depuis 2001 est ainsi organisée une école d'été annuelle appelée E2PHY (Ecole d'Été de Physique) traitant, au travers de l'implication de la physique, de problèmes sociétaux majeurs comme l'énergie, la santé ou le climat. Cette école s'adresse d'abord aux enseignants du secondaire, mais également à leurs collègues du supérieur, et offre une formation à la fois « culturelle » et « pratique ». L'aspect « culturel » permet une ouverture vers des champs disciplinaires dans lesquels la physique joue *de facto* un rôle important, en particulier « en amont ». L'aspect « pratique » vise à relier, dans la mesure du possible, les thématiques sociétales abordées aux contraintes des programmes d'enseignement, pour faciliter l'ouverture des élèves et des étudiants vers la Physique. Cette école, soutenue depuis sa création par le CEA et l'IN2P3, attire chaque année plusieurs centaines de participants de toute la France et de certains pays francophones.

Le Greps a également apporté une contribution importante au mouvement initié par les conférences Nepal (Noyaux Et Particules Au Lycée) à l'occasion du centenaire de la radioactivité à la fin des années quatre-vingt-dix. Le groupe Nepal avait préparé et diffusé, à l'intention des lycéens, quatre conférences sur des thèmes de recherche propres à l'IN2P3. Le Greps a étendu les thématiques abordées par ces conférences, désormais au nombre de douze. Une place importante a été faite, dans ces nouvelles conférences, aux implications sociétales de la physique subatomique, comme par exemple les applications de la radioactivité, les problèmes de déchets nucléaires ou de production d'énergie. Le travail de mise en place de nouvelles conférences continue aujourd'hui encore au sein des laboratoires de l'IN2P3.