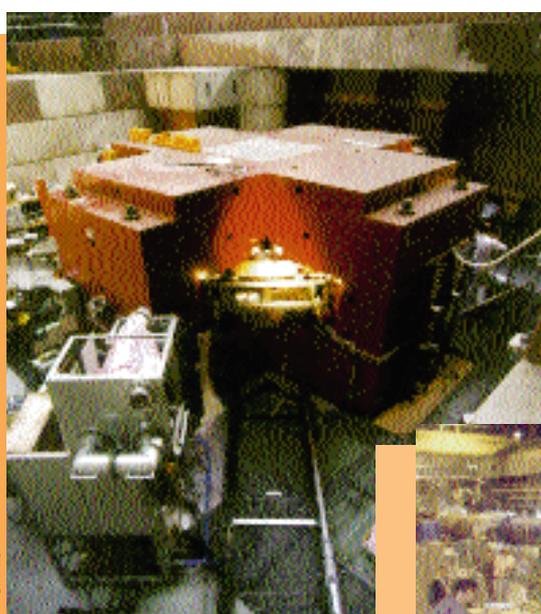


# PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET CORPUSCULAIRE IN2P3

LETTRES DES DÉPARTEMENTS SCIENTIFIQUES DU CNRS

numéro spécial - décembre 1997

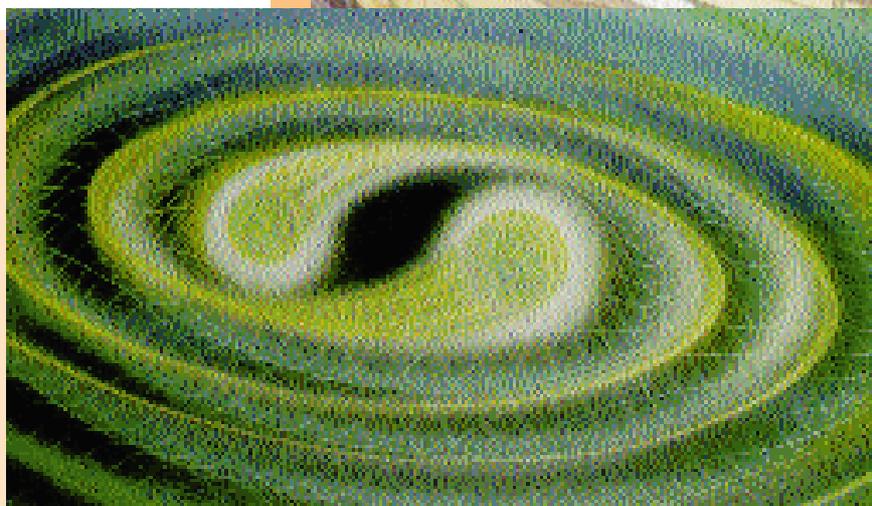


© GANIL

## Plan d'action 1997-2000



© CERN



© INFN



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## Sommaire

■ Introduction	4
■ Quarks et leptons	6
■ Matière nucléaire	10
■ Physique hadronique	14
■ Particules et noyaux dans l'univers	16
■ Les demandes de la société	19
■ La technologie à l'IN2P3	21
■ Les ressources humaines	24
■ Perspectives d'évolution des moyens budgétaires	26
■ Résumé des mesures nouvelles	30

*Légendes des photos de couverture :*

- *La construction de Spiral, le post-accélérateur d'ions radioactifs de Ganil à Caen (photo Jean-Michel Enguerrand, Ganil).*
- *Les aimants supraconducteurs pour le LHC futur grand collisionneur de protons du Cern (photo Cern)*
- *Les ondes gravitationnelles pour la détection desquelles l'antenne Virgo est en cours de construction (Image INFN)*

## Introduction

**L**e champ scientifique de l'IN2P3 porte sur les interactions fondamentales dans la matière, les particules constitutives (quarks, leptons et bosons porteurs des interactions) et tous leurs assemblages, depuis les plus élémentaires (les hadrons) jusqu'à la matière qui compose les noyaux.

**A**près une période d'élucidation et de consolidation qui a permis de constituer le "modèle standard" des particules et d'élaborer une description remarquablement prédictive des noyaux - deux des grandes réussites scientifiques de ce siècle - nos sciences semblent s'acheminer vers un basculement, une nouvelle rupture. Les pistes que nous poursuivons s'attachent à dépasser le modèle standard et sa part d'arbitraire, illustrée par les paramètres ad-hoc qu'il contient encore : d'où vient la masse des particules ? Quelle symétrie sous-jacente lie quarks et leptons, bosons et fermions ? Elles doivent aussi nous mener à découvrir les propriétés et les lois qui régissent la matière nucléaire dont les noyaux d'atomes ne constituent qu'un cas très particulier. Elles doivent encore nous éclairer sur le comportement des quarks dans un milieu de quarks, sur la propriété fascinante de leur confinement qui leur interdit de se révéler autrement que regroupés par deux ou trois. Dans le domaine de l'élémentaire, cette fin de siècle pourrait donc marquer comme la précédente une rupture épistémologique de portée historique. L'IN2P3 travaille à y tenir toute sa place.

**P**ar ces orientations, l'IN2P3 participe au décloisonnement des disciplines qui marque l'évolution des sciences aujourd'hui. Elucider les structures les plus élémentaires de la nature, les propriétés des interactions fondamentales, ne procède pas, comme on le croit trop souvent, de l'ambition illusoire et solitaire d'expliquer toute la matière et sa complexité à

*partir de quelques briques de base. Nos sciences, au contraire, développent des interactions de plus en plus profondes avec d'autres domaines (cosmologie, sciences de l'Univers, théorie des champs, technologies avancées, production d'énergie). La participation renforcée à l'effort de recherche national sur l'aval du cycle électronucléaire, en collaboration avec le CEA, EDF et d'autres départements du CNRS, témoigne en particulier de la richesse croissante des relations partenariales de l'Institut.*

**L'***Institut souhaite qu'un soutien plus fort soit donné par la communauté de physique théorique française aux activités de phénoménologie sur les thèmes où l'effort expérimental de l'IN2P3 est important. En effet, la tentation pourrait se faire jour de développer la phénoménologie de façon indépendante. Or, tout autant qu'à l'intensité de l'activité de recherche dans ce dernier domaine, l'Institut est attaché à son haut niveau de qualité. La mise en place d'une structure permettant des liens forts avec cette communauté, qui assurerait notamment une double évaluation dans le domaine de la phénoménologie nucléaire et des particules, nous semble hautement désirable.*

**C***e plan d'action décrit les choix que nous avons faits. Ils résultent d'un débat continu, exigeant, intense où s'impliquent les chercheurs, les laboratoires et l'organisme. Ils débouchent souvent sur des programmes collectifs à long terme. Le rôle de l'Institut est de fédérer cette ambition, d'organiser les débats, de se porter garant de la rigueur avec laquelle sont conduites les recherches, de l'efficacité de leur gestion sur les plans des personnels et des budgets. Il est enfin de garder la flexibilité nécessaire pour infléchir ce qui aurait à l'être, de préserver des possibilités à l'initiative individuelle (ce qui nous a amené à consacrer à une "ATP blanche" des ressources non initialement affectées), d'insérer ce grand dessein scientifique dans la vie universitaire et de le rapprocher des attentes de la société.*

## Quarks et leptons

### Panorama

Les programmes de recherche en physique des particules et des interactions fondamentales ont apporté de façon régulière, ces dernières années, un grand nombre de mesures de plus en plus précises auxquelles les prédictions du modèle standard sont en permanence confrontées. Ce modèle, construit dans le cadre des théories de jauge, vise à décrire les interactions faibles, électromagnétiques et fortes. Toutefois ses limitations intrinsèques exigent qu'il soit étendu afin d'englober des réponses aux questions fondamentales telles que celles liées aux mécanismes de brisure de symétrie et de génération des masses des particules, à la violation de la symétrie CP ou encore à la nature et la masse des neutrinos.

A ce jour, toutes les données analysées s'accordent avec le modèle standard actuel et ne permettent pas encore de privilégier un type d'extension même si certains résultats fournissent déjà des indications qui demandent toutefois à être confirmées. Ainsi, aucune expérience n'a encore apporté la preuve ni de l'existence du boson de Higgs qui pourrait être à l'origine de la génération des masses, ni de celle de particules supersymétriques.

L'action de l'Institut pour les années à venir sera principalement organisée autour de programmes susceptibles de mettre en évidence ces phénomènes nouveaux. Certains de ces programmes sont en situation de produire des résultats ou en produiront sous peu lorsque la phase actuelle de construction sera achevée. D'autres, qui requièrent une plus longue préparation, mobiliseront les ressources techniques de l'Institut tout au long de la période de ce plan d'action et demanderont un suivi régulier. Certaines des expériences en émergence produiront des volumes de données tels que leur analyse demandera une évolution profonde des moyens informatiques en particulier dans le domaine des logiciels et du stockage. Le Centre de calcul de Lyon reste donc un outil essentiel de cette recherche.

L'ensemble de ces domaines de recherche rassemble environ 280 chercheurs, enseignants-chercheurs et visiteurs et conduit chaque année à une trentaine de thèses de doctorat.

Tous ces programmes sont menés au sein de collaborations internationales. C'est bien évidemment le cas

pour ceux qui se déroulent au Cern, à Hambourg ou à Stanford. Mais c'est aussi vrai pour les autres programmes, implantés auprès de réacteurs ou en site souterrain. Beaucoup de programmes, parce qu'ils impliquent simultanément l'IN2P3 et le Dapnia/CEA, sont menés en concertation étroite entre les deux organismes.

### Les annihilations $e^+e^-$ au LEP

Le LEP, collisionneur  $e^+e^-$  du Cern qui étudie la création de constituants et l'étude de leurs interactions lors des annihilations  $e^+e^-$ , a fonctionné jusqu'en 1995 à une énergie de 91 GeV centrée sur la masse du  $Z^0$  et a fourni un riche éventail de résultats.

Parmi ceux-ci on peut rappeler les tests de l'interaction électrofaible avec la mesure du nombre de neutrinos ou la prédiction de la masse du top, l'étude des propriétés du lepton tau, la physique des quarks lourds (charme et beauté), enfin les recherches de nouvelles particules. Certaines analyses portant sur ces sujets seront encore affinées pendant l'année 1998.

Depuis, l'énergie du LEP est régulièrement augmentée. Le seuil de 161 GeV, requis pour la production de paires  $W^+W^-$  a été franchi en 1996. Ainsi la masse du W, un paramètre essentiel du modèle standard, sera mesurée de manière directe avec une précision meilleure que 50 MeV. Cette détermination, associée à une mesure précise à quelques GeV près, de la masse du quark top au Tevatron, donnera des contraintes significatives sur la masse du boson de Higgs ou sur les hypothèses d'extension du modèle standard.

L'énergie du LEP atteindra sa valeur maximum de 200 GeV en 1999. Ce doublement d'énergie accroît de façon substantielle les fenêtres ouvertes sur la recherche de particules nouvelles, déjà engagée à l'énergie de 91 GeV. En particulier, il recouvre le domaine de masse favorisé par le modèle supersymétrique minimal pour le Higgs le plus léger. L'exploitation du LEP devrait se poursuivre jusqu'en l'an 2000, soit une année supplémentaire par rapport au plan initial, dans la mesure où le coût de son fonctionnement pourra être assuré.

L'effort prioritaire de l'Institut engagé sur le programme LEP depuis son lancement sera maintenu jusqu'à la fin de l'exploitation de cet accélérateur. La

richesse et l'importance de ce programme explique qu'il rassemble près d'une centaine de physiciens de l'Institut. Dix laboratoires de l'IN2P3 sont présents, chacun dans une ou deux des expériences Aleph, Delphi et L3. Les groupes sont impliqués dans les sujets essentiels que sont la mesure précise de la masse du W, la recherche du boson de Higgs et des particules supersymétriques.

La maintenance des détecteurs dont les laboratoires ont eu la responsabilité de construction devra être assurée. Toutes les améliorations des détecteurs nécessitées par le fonctionnement à haute énergie sont maintenant achevées, en particulier celles qui concernent l'herméticité des détecteurs et la réalisation des événements de vertex indispensables à l'observation des événements attendus, par exemple dans certains modes de désintégration du boson de Higgs.

### **Sonder le proton avec une finesse extrême**

Le collisionneur électron-proton Hera est entré en fonctionnement en 1992 à l'énergie nominale de 27 GeV d'électrons contre 820 GeV de protons.

L'une des deux zones de croisement des faisceaux est occupée par l'expérience H1 sur laquelle l'Institut a concentré ses efforts. Les performances en luminosité de Hera se sont progressivement accrues, permettant ainsi à l'expérience H1 d'explorer son programme de recherche initial.

Les interactions électron-proton offrent un domaine d'étude privilégié de QCD, la chromodynamique quantique. L'énergie disponible permet de sonder le proton avec une finesse qui se situe dans la gamme des  $10^{-17}$  m, et de donner accès à la distribution des gluons et quarks qui le constituent ainsi qu'aux fluctuations en hadrons du photon.

Une trentaine de physiciens répartis dans quatre laboratoires sont actuellement impliqués dans la collecte et l'analyse des données. Ce programme se prolongera jusqu'en 2000, en portant une attention accrue à l'étude des événements qui résultent d'interactions de courants neutres et chargés à grand moment de transfert entre constituants et dont un petit nombre a déjà été observé en excès des prédictions. Hera est en effet un collisionneur privilégié pour mettre éventuellement en évidence des états exotiques de la matière constitués de l'association d'un quark et d'un lepton.

Il est prévu, qu'à partir de l'an 2000, l'énergie et la luminosité de Hera soient accrues et que la polarisation longitudinale des électrons et positons puisse être exploitée. L'IN2P3 devra déterminer comment il entend poursuivre sa participation à l'expérience H1.

### **Le programme neutrino**

A ce jour, les neutrinos restent des particules dont on n'a pas encore révélé toutes les propriétés. Ainsi, leur nature exacte reste ambiguë et seules des limites supérieures de leur masse ont pu être établies, ce qui n'interdit pas qu'elles puissent être strictement nulles. Quelques expériences présentent des résultats surprenants qui pourraient s'interpréter par un phénomène d'oscillation entre neutrinos de natures différentes. Une conséquence remarquable qui en découlerait serait une masse non nulle pour le neutrino. L'Institut a progressivement accru son engagement dans ce domaine de physique. Une cinquantaine de ses physiciens sont aujourd'hui engagés dans quatre expériences visant à clarifier ces questions.

Deux de ces expériences tentent de mettre en évidence des oscillations. L'expérience Nomad cherche à observer l'apparition de neutrinos tau dans le faisceau de neutrinos mu du Cern. Cette expérience devrait prendre des données jusqu'en 1998 pour atteindre ainsi la sensibilité visée initialement. L'autre expérience tente d'observer la disparition éventuelle des neutrinos de type électron produits par les réacteurs de la centrale nucléaire de Chooz.

Cette expérience, qui vient de publier ses premiers résultats se prolongera pendant une partie de 1998. Pour l'instant, aucun prolongement de ces expériences n'est encore programmé même si des réflexions sur ce point sont en cours parmi les groupes concernés.

Une autre approche destinée à mettre en évidence une masse non nulle du neutrino consiste à rechercher l'existence de désintégrations nucléaires double-bêta sans émission de neutrino. C'est le but de l'expérience Nemo, en cours de construction, qui s'installera dans le laboratoire souterrain de Modane à partir de 1998. Il est prévu que l'expérience, qui pourra mesurer des durées de vie nucléaire jusqu'à  $10^{25}$  années, prendra des données pour un ensemble de noyaux sur une période de cinq ans et approchera ainsi une sensibilité de 0,1 eV pour la masse du neutrino.

Enfin, une expérience (Munu) testera la présence éventuelle d'un moment magnétique anormal du neutrino auprès d'un réacteur de la centrale du Bugey. Cette expérience en cours d'installation vise à atteindre en deux ans une sensibilité au niveau de  $10^{-11}$  magnéton de Bohr.

Pour l'instant, aucun prolongement de ces expériences n'est encore programmé même si des réflexions sur ce point sont en cours. Les résultats expérimentaux attendus dans les deux années à venir devraient aider à mieux positionner les pièces du puzzle des neutrinos et guider le choix des expériences à entreprendre. L'Institut souhaite rester engagé dans ce domaine de recherche.

### **L'étude de la violation de CP**

L'origine de la violation de la symétrie CP, produit de P (opération miroir) et de C (opération d'échange particule-antiparticule), observée dans les interactions faibles est encore aujourd'hui mal établie. Son importance cosmologique est essentielle dans la mesure où elle a une influence déterminante sur le destin de l'antimatière dans l'univers primordial.

LIN2P3 est déjà présent sur deux lignes d'étude de cette question.

La première concerne la mise en évidence au Cern (expérience NA 48) de violation directe dans la désintégration des kaons neutres. Les prises de données de cette expérience se poursuivront au moins jusqu'en 1999. Son analyse complète continuera encore plusieurs années pour atteindre la précision requise.

La seconde s'appuie sur une participation importante à l'expérience Babar dont l'appareillage sera installé en 1998 auprès du collisionneur  $e^+e^-$  à Slac (Stanford, Californie). Des groupes appartenant à quatre laboratoires et comptant environ trente-cinq physiciens ont pris une forte responsabilité dans la construction des détecteurs d'identification des particules.

Le but de cet engagement est l'étude de la physique des mésons B avec en particulier l'espoir d'observer pour la première fois la violation de CP dans ce système. Ce programme devrait se prolonger jusqu'en 2005.

Il faut enfin noter que le LHC constituera une source environ cent fois plus intense encore de quarks b. Cette propriété sera mise à profit dans un détecteur dédié à ce type de physique et spécialement conçu pour reconnaître la nature des particules. Cette capacité rendra ainsi possible l'identification de plusieurs types de désintégrations des quarks b qui donnent accès aux angles et aux côtés du triangle d'unitarité. La vérification de cette propriété d'unitarité sera réalisée avec un éventail de mesures et une précision inaccessible aux expériences qui se feront d'ici là. Des groupes appartenant à trois laboratoires s'engagent dans ce programme. Cet engagement sera finalisé en 1998 pour permettre à l'Institut de jouer un rôle significatif dans cette future expérience auprès du LHC.

### **La préparation des expériences engagées au LHC**

L'étude des interactions à la plus haute énergie disponible au LHC sera conduite dans deux grands détecteurs à vocation universelle, Atlas et CMS. LIN2P3 a choisi de participer à ces deux expériences. Contribuer à la construction de ces deux détecteurs constitue

ra la priorité des années à venir. Au conseil du Cern de décembre 1996, la décision a été prise de construire le LHC en une seule étape avec un début d'exploitation programmé en 2005. Il en résulte que l'installation des détecteurs devra débuter en 2003 et que, pendant la période de 1997 à 2000, les laboratoires concernés seront engagés de façon intensive dans les activités de construction.

Six laboratoires sont engagés dans Atlas et quatre dans CMS. Pour Atlas, les responsabilités de l'Institut concernent : la calorimétrie électromagnétique (80%), la calorimétrie hadronique (10%) et le détecteur de traces à pixels (10%). Pour CMS, elles concernent la calorimétrie électromagnétique (50 %) et les détecteurs de traces (50 %). Une implication portera en outre sur les systèmes de déclenchement et d'acquisition. Ces domaines de responsabilités découlent naturellement du rôle qu'ont eu ces laboratoires dans la R&D pour les détecteurs et dans les choix d'appareillage qui en ont résulté. En particulier, la calorimétrie est l'élément essentiel de ces détecteurs puisqu'elle permettra d'identifier les électrons et les photons et de révéler l'émission de neutrinos, toutes particules qui sont les signatures les plus convaincantes des processus à découvrir.

Ces engagements mobilisent depuis plusieurs années environ 80 physiciens et 140 ingénieurs et techniciens directement impliqués. La durée de ces engagements a une influence sur la carrière scientifique des chercheurs. L'Institut devra donc veiller à assurer une diversité suffisante de ses programmes scientifiques et à favoriser les mobilités des chercheurs entre ceux-ci.

### **Une étape à l'énergie du Tevatron**

Le Tevatron, collisionneur proton/antiproton du laboratoire Fermi à Chicago, entamera en 1999 une nouvelle phase de fonctionnement (le run 2) avec une énergie de 2 TeV et une luminosité multipliée par 20. Ces performances accrues rendent le potentiel de physique des deux expériences CDF et D0 très attrayant, d'autant plus qu'un important travail d'amélioration des appareillages en cours en augmentera significativement les performances et que ces expériences constituent une utile préparation à celles qui prendront place au LHC à plus haute énergie.

Une trentaine de physiciens ont soumis à LIN2P3 en 1997 des propositions pour rejoindre ces expériences, afin de participer à l'analyse des nouvelles données qui seront accumulées au cours du run 2 prévu entre fin 1999 et fin 2001. Les sujets de recherche privilégiés sont des mesures plus précises des masses du boson W et du quark top et surtout la mise en évidence de certaines des particules supersymétriques, si elles existent dans la gamme d'énergie accessible au Tevatron.

L'IN2P3 soutiendra la participation à l'expérience D0 pour la durée de la phase "run 2". La taille des groupes sera limitée et leur implication concentrée sur la prise des données et leur analyse. Ces limitations respectent la priorité que l'Institut a depuis longtemps donnée au programme LHC. Ce programme doit permettre aux groupes concernés de se préparer à la physique du LHC. De plus, il maintiendra à haut niveau la capacité d'attraction de la discipline en offrant à des doctorants des sujets de recherche à la pointe de cette physique.

### Les accélérateurs du futur

L'utilisation d'accélérateurs ou de collisionneurs reste encore pour la physique des particules le seul moyen d'atteindre les énergies et les taux d'interactions requis par sa problématique scientifique. Ainsi, la construction du LHC et de ses détecteurs ouvrira un nouvel espace de recherches et de découvertes. La nature composite des projectiles que sont les protons rendent cette recherche difficile comme en témoigne la complexité des détecteurs. Du fait que les électrons sont des constituants fondamentaux de la matière, les collisionneurs  $e^+e^-$  ont l'avantage de conduire à des interactions plus lisibles et mieux contraintes.

Toutefois le LEP, dont l'énergie totale plafonnera à 200 GeV, représente l'aboutissement des collisionneurs circulaires, ne serait-ce que par sa taille.

Cette limite pourrait être contournée par le concept de collisionneur linéaire à électrons. L'Institut encourage cette nouvelle approche :

- par la participation de physiciens aux groupes de travail centrés sur l'expérimentation auprès de telles machines. Des ateliers ont lieu régulièrement au niveau de l'ECFA ou au niveau mondial.
- par son engagement sur la R&D en accélérateurs notamment dans l'option basée sur un accélérateur à cavités supraconductrices, dans le cadre de la collaboration internationale Tesla, engagée en 1993 à Desy (Hambourg) et qui se poursuivra.

Une idée séduisante pour garder l'avantage d'une interaction mettant directement en jeu des constituants, tout en échappant à l'allongement des collisionneurs linéaires à électrons, est de remplacer les électrons par des muons et de construire un collisionneur à muons. En effet ceux-ci, ayant une masse deux cent fois plus élevée, rayonnent  $10^9$  fois moins dans un champ magnétique et il devient concevable d'utiliser des collisionneurs circulaires comme pour les protons. D'autres problèmes surgissent néanmoins et les surmonter demandera un long effort de R&D. Par exemple la R&D sur les accélérateurs à protons de haute intensité, dans laquelle l'Institut s'est engagé, répondrait à l'un des défis de ces collisionneurs à muons. L'IN2P3 souhaite que des actions coordonnées au niveau européen puissent se développer dans le domaine de la R&D des accélérateurs, actions dans lesquelles il s'impliquerait.



## Matière nucléaire

Dans ce domaine, les activités des chercheurs peuvent être réparties selon quatre thèmes. Ce choix a semblé approprié pour un document destiné à mettre en évidence les lignes majeures qui, dans le futur à court et moyen terme, vont structurer les actions de l'IN2P3. Corollairement, il a l'inconvénient de ne pas bien rendre compte de l'importance des recouvrements d'intérêt scientifique entre les divers thèmes. Ces recouvrements manifestent la profonde unité intellectuelle d'une discipline attachée à comprendre le comportement collectif d'assemblées de particules (nucléons ou quarks) dont la dynamique est régie par l'interaction forte.

Par ailleurs, comme cette section la met peu en valeur, on se doit aussi de rappeler l'absence de solution de continuité entre les recherches en physique nucléaire et celles menées dans les champs voisins de la physique des particules et de la physique hadronique ainsi que, à l'autre extrémité du spectre énergétique, celles de la physique émergente des systèmes mésoscopiques.

Pour chaque thème, après une brève description des lignes de physique qui seront explorées pendant la période du plan d'action, on présente les outils que l'Institut mettra en oeuvre (exploitation et construction) pour les soutenir. Ces outils ressortissent pour l'essentiel de deux catégories : les accélérateurs et les détecteurs collectifs (le Centre de calcul de l'IN2P3 et les réseaux techniques de l'Institut, qui sont largement utilisés par la communauté, sont évoqués ailleurs dans ce document). En effet, la fraction du travail des physiciens et des ingénieurs conduite avec des ensembles expérimentaux construits et exploités par une seule équipe au sein d'un seul laboratoire va continuer à décroître et, de plus en plus, n'être consacrée qu'aux seules études préparatoires ou de faisabilité.

On doit toutefois remarquer que cette coopération dans la phase de construction n'implique pas nécessairement que les équipes des divers laboratoires regroupent leurs thèmes de recherches. Les équipements lourds de la physique nucléaire de basse énergie fonctionnant souvent comme des fournisseurs de services à la communauté<sup>(1)</sup> autorisent tout à fait des expériences courtes et légères ainsi que la mobilité thématique des équipes.

*(1) Cependant, à la différence de certaines disciplines, ces équipements de services sont définis, dessinés et souvent construits par la communauté même qui les utilise.*

Les activités des trois premiers thèmes s'effectueront surtout auprès des accélérateurs nationaux Ganil (Groupement d'intérêt économique avec le CEA) et Vivitron que l'institut exploitera et, simultanément, développera. D'autres sites européens seront aussi utilisés en cohérence : KVI (Pays-Bas), GSI (Allemagne), Legnaro (Italie), Jyvaskyla (Finlande), Louvain (Belgique), Isolde (Cern). Dans le même temps, l'IN2P3 s'attachera à améliorer la coordination déjà engagée des efforts nationaux en physique nucléaire en accroissant encore l'accès des équipes européennes auprès du Ganil et du Vivitron ainsi que leur contribution à l'équipement expérimental de ces sites. Les activités du thème « plasma quark-gluon » s'organiseront pour l'essentiel dans le cadre intégré de la politique du Cern.

### La structure quantique du fluide nucléaire

Les noyaux sont assimilables à des gouttes d'un liquide quantique de nucléons (neutrons et protons reliés par la symétrie d'isospin). Ils possèdent la caractéristique originale parmi les systèmes à N-corps du monde physique de présenter trois types de dynamiques (collective, statistique et individuelle) simultanément dans le même domaine d'énergie d'excitation (quelques MeV).

La difficulté d'exploration de chacune de ces dynamiques nucléaires qui résulte de cette superposition a été récemment surmontée par la mise au point de techniques performantes de détection. Celles-ci ont créé des capacités d'exploration de phénomènes nouveaux que l'on peut tenter de répertorier ainsi :

#### DYNAMIQUE COLLECTIVE

- Brisures de symétrie : superdéformation, hyperdéformation, déformations octupolaires.
- Appariement : grands moments angulaires et effets de la brisure de la symétrie du renversement du temps.
- Résonances géantes multiphonons, résonances spin-isospin.

#### DYNAMIQUE STATISTIQUE

- Spectroscopie complète à grande énergie d'excitation.

- Transitions discrètes et statistiques dans les changements superdéformation vers déformation normale.

#### DYNAMIQUE INDIVIDUELLE

- Organisation quantique des puits superdéformés.
- Structure, excitation des états isomériques.

L'outil majeur dont dispose l'Institut pour couvrir cette physique est le Vivitron. Depuis la fin de la campagne du détecteur franco-britannique Eurogam (fin 1996), celui-ci poursuit un programme en physique des collisions (voir p.12, dynamique des réactions nucléaires).

Simultanément, le Vivitron va être préparé pour l'accueil du détecteur européen Euroball (dernier trimestre 1998) qui deviendra l'élément essentiel de son programme de recherche. En parallèle aux préparations du site, une version améliorée de Euroball (boule interne, en collaboration avec le CEA et la Grande-Bretagne) sera construite ainsi qu'une détection simultanée gamma-électron (Garel+). En attendant, des équipes françaises continueront à exploiter le détecteur Euroball sur son site actuel de Legnaro. Certaines d'entre elles développent des lignes de recherche spécifiques autour des détecteurs de particules chargées ancillaires d'Euroball qu'elles ont construits (Diamant et Saphir, en collaboration avec le CEA et la Hongrie).

Pour un objectif à plus long terme, l'IN2P3 s'engagera dans un programme R&D visant à définir la prochaine génération de détecteurs germanium dits fragmentés (programme européen en collaboration avec la société Eurysis).

L'étude de la dynamique collective dans le domaine des résonances géantes et des résonances spin-isospin, qui sera poursuivie au Ganil, sera conduite en priorité auprès du cyclotron franco-néerlandais Agor où des chercheurs de l'Institut viennent de terminer la réalisation de la détection du spectromètre BBS.

### Loin de la ligne de stabilité

Les noyaux intrinsèquement stables ne représentent qu'une petite fraction de ceux qui sont stables vis à vis de la seule interaction forte. Dans le plan N-Z (nombre de neutrons et de protons), ces derniers occupent une zone dont les frontières latérales (drip lines) sont mal connues, sauf pour les noyaux légers. Par des mesures de masses, de durées de vie, de spectroscopie et par l'étude de l'ensemble des processus de réaction que permet la disponibilité de faisceaux radioactifs, la communauté se propose d'explorer les thèmes suivants :

#### PROPRIÉTÉS D'ISOSPIN DE LA FORCE NUCLÉON-NUCLÉON EFFECTIVE

■ La forte intensité de l'interaction spin-orbite nucléaire suggère qu'on doit lui chercher une origine dynamique (plutôt que simplement cinématique comme dans les atomes). L'étude des densités de niveaux individuelles permettra de tester si l'évolution de l'interaction spin-orbite pour les noyaux très riches en neutrons est conforme aux prédictions des modèles théoriques et d'ouvrir peut-être ainsi des voies reliant la spectroscopie des noyaux dans le domaine du MeV à la chromodynamique quantique.

■ Dans un autre canal de l'interaction effective, l'exploration complète de la ligne  $N = Z$  et de son voisinage, où l'effet Wigner reste encore inexplicé, doit permettre de déterminer les caractéristiques de l'interaction d'appariement entre neutrons et protons en regard de celle, bien mieux connue, qui favorise la formation de paires de nucléons de même espèce.

#### POSITION DES DRIP-LINES

Les enjeux de cette recherche concernent à la fois notre discipline et l'astrophysique.

■ En physique nucléaire, il s'agit de conforter notre connaissance des propriétés globales d'asymétrie d'isospin nucléaire telles qu'elles se transcrivent dans les formules de masses et les interactions microscopiques par exemple.

■ En astrophysique, l'apport majeur concerne les questions liées à la nucléosynthèse primordiale et explosive (supernovae II). En particulier, les études entreprises avec des faisceaux exotiques permettent de déterminer les chemins du plan N-Z parcourus lors de la nucléosynthèse et ainsi de mieux comprendre les abondances d'éléments lourds dans l'univers.

#### STRUCTURE NUCLÉAIRE AUX LISIÈRES DE LA STABILITÉ

■ Les noyaux avec halos, équivalents pour la physique nucléaire des atomes de Rydberg, vont accroître notre connaissance de l'interaction des neutrons dans la matière nucléaire de faible densité.

■ Il s'agit de tester la validité du modèle en couche au voisinage des drip lines.

■ Les émetteurs protons ouvriront le champ d'étude de l'effet tunnel pour les nucléons isolés, permettant aussi d'accéder à une compréhension microscopique de l'émission alpha, des radioactivités exotiques (C, O, S) et de la fission.

■ Des zones nouvelles de brisure de symétrie de rotation qui sont attendues, seront recherchées.

- On explorera les marges de la zone de stabilité associée aux éléments superlourds et l'approche de celle-ci.

Pour la communauté française, l'outil principal de cette recherche sera l'ensemble Ganil-Spiral qui structure déjà l'essentiel des activités des physiciens. Le démarrage de Spiral aura lieu en 1999. Dans le cadre d'accords impliquant plusieurs pays européens, et sous l'égide du comité international de Spiral, l'Institut participera à la construction de détecteurs dédiés au site Ganil (multidétecteur gamma Exogam et spectromètre à grande acceptation Vamos). Un programme sur les pièges à ions sera mis en place ; il coordonnera les efforts de nos physiciens travaillant auprès de Spiral et d'Isolde (Cern). L'expérience acquise auprès du spectromètre Mistral sera en particulier utilisée pour amorcer l'activité de cette communauté.

Par ailleurs l'étude des propriétés neutroniques sera poursuivie avec le détecteur Démon (construit en collaboration avec la Belgique) et complétée par la mise en route du détecteur de neutrons retardés Tonnerre (en collaboration avec la Roumanie). Pour les particules chargées, un outil essentiel sera le détecteur silicium à micropistes Must (en collaboration avec le CEA).

Jusqu'au démarrage de Spiral (et même au-delà lorsque la physique le demandera), la communauté exploitera les faisceaux de fragmentation du Ganil au moyen des équipements actuels (Sissi, Speg, Lise).

Afin de préparer les évolutions de Spiral, le programme actuel de R&D dans le domaine des sources d'ions sera renforcé. En même temps, la R&D sur de nouvelles techniques de production de noyaux exotiques sera poursuivie (Parrne).

Ce travail, qui relève de l'effort de prospective «Spiral-Phase II», bénéficie d'un soutien européen par un programme RTD coordonnant les activités de R&D d'un réseau de laboratoires (Louvain, IPN Orsay, KVI Groningen, Ganil, Jyväskylä). Il représente une des deux composantes de l'effort français de préparation pour une future machine européenne à faisceaux secondaires, de seconde génération. En effet, il s'ajoute à la proposition Piafe auprès de l'ILL. Celle-ci constitue un projet dont toutes les composantes scientifique, technique et de sûreté ont déjà fait l'objet d'une analyse approfondie.

Ces travaux et projets se placent dans la perspective recommandée par le comité européen NuPECC dans son rapport de prospective pour la période au-delà de l'an 2000.

### **Dynamique des réactions nucléaires**

La compréhension des mécanismes mis en jeu dans les réactions nucléaires est intéressante à au moins

deux titres. Tout d'abord les réactions constituent le seul moyen accessible pour l'étude de la dynamique des forces nucléaires. Par ailleurs, elles permettent de fabriquer des états nucléaires dans des conditions d'excitation, d'isospin et de moment angulaire spécifiques. C'est ainsi par exemple, qu'une maîtrise de la formation du noyau composé est cruciale pour la préparation d'états superdéformés (voir page 10). Parmi les recherches qui vont être initiées ou poursuivies, on citera :

#### **LES PHÉNOMÈNES QUANTIQUES À LA BARRIÈRE DE COULOMB**

- Influence de la déformation des puits de potentiel sur la transmission collective vers la fusion.
- Etude des transferts multiples : paires et amas alpha.
- Résonances pseudomoléculaires.

#### **LES PROPRIÉTÉS MICROCANONIQUES DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE**

- Répartition statistique ou collective de l'énergie de collision; implication pour la notion d'équation d'état.
- Propriétés et importances relatives des modes de fission à haute énergie, d'évaporation et de multifragmentation.

Pour l'essentiel, dans le cadre du présent plan d'action, les recherches s'appuieront sur l'exploitation des outils que la communauté française s'est forgés et a placés auprès des grands instruments Ganil et Vivitron : détecteurs Icare (basse énergie), et plus particulièrement le multidétecteur de particules chargées Indra (moyenne énergie).

Les collaborations internationales se feront, soit au moyen d'appareillages étrangers placés auprès de nos accélérateurs (Charissa et filtre de vitesse au Vivitron fournis par la Grande-Bretagne), soit auprès d'accélérateurs étrangers (Groningen, Darmstadt, Catania) qui complètent la panoplie des moyens utilisés par nos programmes de recherche.

### **La recherche du plasma quark-gluon**

Une des implications fortes du caractère non commutatif de la théorie de jauge qui sous-tend la chromodynamique quantique (QCD) est l'existence d'une transition de déconfinement des quarks. L'ensemble remarquable d'indicateurs probants de la validité de la QCD fournit une incitation forte à rechercher cette transition, tout comme, en un autre domaine, les preuves de l'existence de particules satisfaisant la statistique de Bose-Einstein ont motivé la longue recherche

d'une de ses implications majeures : le condensat de Bose. De plus, la découverte du plasma quark-gluon et surtout la connaissance de ses propriétés auront nécessairement des implications sur nos concepts dans le domaine de la cosmologie.

On pense généralement que la difficulté essentielle d'une mise en évidence du plasma quark-gluon tient bien moins à la capacité à former ce plasma (les énergies et les densités de matière requises semblent tout à fait accessibles aux accélérateurs de particules et d'ions lourds, existants ou en construction) qu'à l'identification de signatures incontestables de son existence. Pour la période du plan d'action, les activités des chercheurs de l'institut dans ce domaine seront centrées sur les thèmes suivants :

#### LA MESURE DES PAIRES DE MUONS

Elles permettent de remonter aux propriétés d'écrantage du quark charmé. Cette ligne de recherche conduite par l'expérience NA50 (en collaboration avec l'Italie) a fourni les résultats les plus prometteurs de ceux des diverses expériences actuelles du Cern.

#### PHOTONS PRIMORDIAUX DE LA COLLISION

- La recherche et l'étude des photons émis au tout début de la collision entre les ions afin de déterminer la température de plasma (analyse des résultats de l'expérience WA98).
- L'exploration par simulation numérique des potentialités associées à la mesure des corréla-

tions de particules et de la production de particules ou de gouttelettes de matière étrange.

L'outil expérimental de recherche de nos physiciens pour la physique du plasma quark-gluon pendant la période 1997-2000 restera l'expérience NA50 au Cern, dans laquelle cinq de nos laboratoires sont impliqués.

En parallèle, le programme destiné à préparer de façon coordonnée une participation plus diversifiée à l'expérience Alice auprès du futur LHC va monter en régime. Dans Alice, l'Institut s'attachera à prendre des responsabilités sur deux axes essentiels : la détection des paires de muons (chambre de traces et déclencheurs) et la détection de traces de particules chargées près du point d'interaction (détecteurs silicium à micropistes).

Enfin, pour tenir compte du relatif éloignement temporel de la mise en route d'Alice (2005), l'Institut soutiendra un programme de recherches destiné à former les équipes pendant la période du plan d'action suivant, afin d'être en situation d'exploiter les données d'Alice de façon optimale dès le démarrage du LHC. Ceci impliquera une recherche déterminée des opportunités d'activités auprès de l'accélérateur américain RHIC dont la mise en route est prévue pour la fin du siècle.



## Physique hadronique

### Un domaine scientifique en mutation

Ce domaine concerne l'étude de la construction de particules composites, les hadrons, à partir des constituants fondamentaux, les quarks et les gluons. Il s'agit de comprendre les mécanismes de cette construction, la dynamique des hadrons et des constituants, et les propriétés de confinement de ces objets élémentaires. La force active dans ces phénomènes est celle de l'interaction forte dont la théorie est la chromodynamique quantique (QCD). Celle-ci possède une propriété dite de liberté asymptotique qui affaiblit les forces à courte distance et facilite les calculs dans ces conditions, par l'utilisation de méthodes perturbatives. Les activités de ce domaine perturbatif sont souvent intégrées aux programmes d'étude des quarks et des leptons, et sont traitées dans le chapitre correspondant. Par ailleurs, l'étude du déconfinement (transition de la matière nucléaire vers un plasma de quarks-gluons) est décrite dans le chapitre sur la matière nucléaire. Seul est traité ici le comportement de QCD à grande distance où les forces deviennent grandes, et les calculs bien plus difficiles car il n'est plus possible d'utiliser les méthodes perturbatives. Les progrès réalisés sur le plan théorique dans ce domaine non perturbatif et dans la transition entre le régime perturbatif et le non-perturbatif justifient un effort expérimental soutenu pour disposer de données à confronter avec les prédictions.

Ce plan d'action prolonge l'importante mutation déjà amorcée au cours du plan précédent. En 1993, il avait été décidé d'effectuer un transfert de l'effort de recherche en physique hadronique en passant de l'utilisation de faisceaux de hadrons (et donc de collisions entre deux objets complexes) à l'utilisation de la sonde électromagnétique, avec laquelle il est possible d'exciter avec précision un système hadronique tout en observant à une échelle définie. Dès cette date, l'arrêt de l'accélérateur de hadrons Saturne avait été programmé pour la fin de 1997, et des expériences avaient été lancées sur des accélérateurs d'électrons disponibles en attendant la mise en route d'Elfe, un projet d'accélérateur européen d'électrons de 15-30 GeV. La taille de la communauté française d'expérimentateurs actifs dans ce domaine est d'environ 37 physiciens permanents à l'IN2P3, auxquels il faut ajouter environ 25 chercheurs du CEA avec lesquels ils travaillent en étroite collaboration.

### Saturne

Comme cela avait été programmé, les activités auprès de l'accélérateur Saturne ont été concentrées sur un petit nombre d'expériences prioritaires qui auront atteint leurs objectifs avant l'arrêt de l'accélérateur et la fermeture du laboratoire national associé, le 31 décembre 1997. Ces expériences sont les suivantes :

- Expérience Disto pour l'étude de la production du nombre quantique d'étrangeté, et de l'influence des variables de polarisation.
- Expérience SPES4  $\pi$ , étudiant la résonance de Roper et la propagation du baryon  $\Delta$  dans la matière nucléaire mettant en évidence un effet de milieu sur les propriétés de la résonance.
- La mesure des neutrons de spallation pour l'étude de la transmutation des déchets radioactifs (hors du domaine scientifique discuté dans cette section).

Les personnels du LNS doivent être redéployés au 1er janvier 1998 et les physiciens s'engageront dans de nouveaux programmes tout en achevant l'analyse des données de ces dernières expériences. Un colloque tirera en 1998 le bilan de l'ensemble des années d'exploitation de ce grand équipement scientifique.

### Elfe

L'étude du projet scientifique a été approfondie au cours de 1996 dans le cadre du comité européen NuPECC, et une alternative au schéma technique initialement proposé a été étudiée.

Il s'agit de la possibilité de réaliser Elfe en association avec un autre grand équipement (projet de collisionneur à haute énergie Tesla ou laser à électrons libres de type Sase), ce qui permettrait de desservir une communauté élargie, et donc d'en abaisser le coût. Il a en particulier été montré fin 1996 qu'il serait possible d'utiliser les premiers étages de Tesla pour alimenter un anneau de lissage déjà existant (Hera) et obtenir ainsi un faisceau continu et intense d'électrons de 15 à 25 GeV (projet Elfe@Desy).

Le conseil scientifique de Desy, en accord avec la direction de ce centre, a pris note en novembre 1997 de cette possibilité de réalisation dans le respect du ca-

hier des charges initial. Il a conclu que le programme de physique peut faire partie intégrante des programmes retenus par le laboratoire et qu'une décision sera prise en 2001-2002. D'ici là, le projet Elfe@Desy doit soumettre une proposition détaillée de réalisation incluant les collaborations qui veulent conduire le programme de physique, les coûts de l'accélérateur, des halls d'expériences et des détecteurs, le tout établi en collaboration avec Desy. La date choisie pour la décision est reliée au projet Tesla, mais aussi aux propositions qui seront discutées aux États-Unis à cette date sur le futur de Cebaf au delà de 8 GeV.

### **Les expériences avec des électrons en Europe**

**E**n attendant la réalisation future d'un accélérateur spécialement conçu pour les objectifs de cette physique, il convient de tirer le meilleur parti des accélérateurs d'électrons existants aujourd'hui.

A la suite de plusieurs expériences déjà effectuées sur les accélérateurs européens à des énergies de l'ordre du GeV (Amsterdam, Bonn, et Mayence), l'IN2P3 a approuvé, fin 1996, un nouveau programme à Mami pour mesurer la contribution des quarks étranges au facteur de forme du nucléon. Cette expérience, basée sur les asymétries induites par la violation de la parité, demandera une grande statistique et un bon contrôle des erreurs systématiques, et utilisera la source d'électrons polarisée Selpo développée à l'IPN d'Orsay. Elle est complémentaire de mesures prévues à TJNAF à des énergies plus élevées.

Un faisceau de photons gamma de 1,5 GeV, (Gaal) obtenu par rétrodiffusion d'un faisceau laser sur les électrons de 6 GeV de l'anneau de l'ESRF, a été construit par une collaboration INFN-IN2P3. Il est en cours d'exploitation pour étudier la photoproduction de mésons pseudo-scalaires, et mesurer les amplitudes de transition dépendant du spin dans la photoproduction d'étrangeté. Le statut d'utilisateur "parasite" accordé par l'ESRF à ce programme réduit malheureusement d'année en année l'intensité disponible et allonge ainsi considérablement la durée des expériences, ce qui met en danger l'utilisation future d'une cible polarisée actuellement en préparation. Ce problème devra être résolu, ou il faudra revoir la programmation de cette activité.

### **Les expériences avec des électrons aux USA**

**U**ne série de mesures sur les fonctions de structures polarisées du nucléon, conduite auprès de l'accélérateur d'électrons de Stanford à 30 et 50 GeV, s'est

achevée à la fin de 1996. L'effort, d'ici à l'an 2000, sera concentré sur l'utilisation de l'accélérateur de Cebaf/TJNAF qui est entré en service à 4 GeV et dont l'énergie sera portée à 6 GeV en 1999.

Dans le cadre d'un accord avec la DSM du CEA, et d'un accord global entre les instituts français et Cebaf, un ensemble d'équipements de faisceau a été ou est en cours de réalisation au LPC de Clermont (mesure de l'énergie à  $10^{-4}$  près, cartographie magnétique des quadrupôles des spectromètres à haute résolution, et polarimètre Compton). Ces réalisations ouvrent à nos équipes un large accès à l'utilisation de cet accélérateur, et deux expériences assez lourdes sont déjà engagées. La première est l'expérience T20 de mesure exclusive du facteur de forme tensoriel du deuton au moyen du polarimètre Polder construit à l'ISN et calibré à Saturne. La prise de données a eu lieu en 1997 et l'analyse se poursuivra tout au long de 1998.

La seconde est une expérience de diffusion Compton virtuelle, prenant le relais, à énergie plus élevée, des mesures faites à Mayence. Elle est programmée pour prendre ses données en 1998, et devrait logiquement se poursuivre par une expérience de diffusion Compton virtuelle profondément inélastique si la R&D correspondante en démontre la faisabilité.

Au delà de ces expériences, il faudra dès le début de 1998 définir la suite du programme à Cebaf/TJNAF qui est appelé à passer du statut de programme relais à celui de programme plus pérenne. Cette prolongation se fera en maintenant et en renforçant le partenariat avec la DSM, en prévoyant un engagement de l'IPN d'Orsay dans les programmes à Cebaf, et en basant la suite de ce programme sur l'expérience acquise précédemment, par exemple dans le domaine de la photoproduction de mésons, des cibles polarisées et/ou des expériences de précision utilisant la violation de la parité.

### **Les autres expériences en physique hadronique**

**L**es réflexions engagées pour définir la poursuite du programme à Cebaf seront également l'occasion d'un examen attentif de l'ensemble des activités en cours en physique hadronique, et ouvertes vers d'autres facilités existantes, en préparation, ou en projet. Par ailleurs une participation à l'expérience Hadès à GSI, qui étudie les modifications des propriétés des mésons vecteurs dans la matière nucléaire en mesurant leur désintégration en paire d'électrons est en cours d'évaluation. Une décision, basée sur les conditions techniques de participation, sera prise au début de 1998.



## Particules et noyaux dans l'univers

### Un domaine scientifique en développement

Depuis plusieurs années, une thématique scientifique nouvelle a émergé à la frontière de la physique des particules et des noyaux avec l'astrophysique et la cosmologie. Ce développement est porté par trois moteurs principaux : l'utilisation de l'Univers contemporain comme un vaste laboratoire pour bénéficier d'une échelle de distance et de conditions énergétiques et de densité bien au delà de ce qui est réalisable sur Terre ; la cosmologie théorique et observationnelle, qui s'appuie notamment sur les théories des particules et les phénomènes de haute énergie, est maintenant à même d'apporter en retour des contraintes et des observations à la physique subatomique ; les développements instrumentaux, dont beaucoup sont issus des dispositifs utilisés auprès des accélérateurs, permettent de disposer de détecteurs de particules d'origine cosmique de plus en plus sensibles, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles astronomies (gamma, neutrino, chargés de très haute énergie, et gravitationnelle).

Cette thématique est portée à l'IN2P3 par un ensemble d'une centaine de physiciens permanents et une quarantaine de thésards ou de visiteurs scientifiques. Elle représente désormais une fraction appréciable du potentiel de recherche de l'Institut, et démontre la capacité de l'IN2P3 à faire évoluer son domaine scientifique. Un mouvement similaire est observé au niveau international dans la plupart des pays avancés.

Au niveau français, ce développement associe des équipes de l'IN2P3, de la DSM du CEA, de l'INSU, et des départements SPM et SPI. Un effort sera fait au cours de ce plan pour renforcer et formaliser cette concertation.

### Phénomènes violents de l'Univers contemporain

Le premier axe de ce domaine se concentre principalement sur les objets denses et compacts, dans lesquels la matière est soumise à des conditions extrêmes. Il s'agit des étoiles à neutrons et des trous noirs ou d'ensembles plus massifs tels que les noyaux actifs de galaxie. La détermination précise des mécanismes de

production des particules de haute énergie qu'ils émettent est l'une des grandes questions qui restent ouvertes actuellement dans le domaine.

Pour étudier les rayons gamma cosmiques, messagers efficaces et fidèles de ces phénomènes, un effort a été entrepris afin d'abaisser le seuil des détecteurs au sol qui sont incontournables à très haute énergie. Deux instruments innovants ont ainsi été développés, avec le support de EDF et de la Région, sur le site de la centrale électro-solaire Thémis dans les Pyrénées.

Le premier dispositif nommé Cat, mis en service à la fin de 1996, a déjà observé à 200 GeV plusieurs sources galactiques et extragalactiques, et a mis en évidence des variations fortes et rapides de l'émission de la galaxie active Markarian 501. L'exploitation de ce détecteur, actuellement au meilleur niveau mondial de performances, doit permettre aux équipes de l'IN2P3 de conduire, sur l'ensemble des années de ce plan d'action, un programme d'observations de qualité, au premier rang de la compétition internationale.

Le second dispositif nommé Céleste, et dont la première phase a été approuvée en 1996, utilise les grands miroirs de la centrale solaire pour concentrer la lumière Tcherenkov sur un détecteur situé en haut d'une tour préexistante de 100 m de hauteur. Les premiers essais seront effectués au début 98 et l'ensemble de la phase 1 devrait être opérationnelle en fin d'année. L'objectif est de valider cette nouvelle méthode de détection et d'ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation au voisinage de 50 GeV. Une seconde phase, utilisant l'ensemble des miroirs du site, pourra éventuellement être envisagée.

Les détecteurs de gamma cosmiques installés à Thémis couvriront ainsi, au cours de ce plan d'action, une gamme d'énergie d'environ 50 GeV à plusieurs dizaines de TeV, et seront complétés par des observations multi-longueur d'onde effectuées en collaboration. Le site de Thémis constitue un atout logistique important et devrait nous rester accessible jusqu'en 2004, ce qui nécessitera probablement un engagement temporaire de l'IN2P3 au niveau de son statut.

En fonction des résultats scientifiques obtenus, il faudra choisir une voie d'évolution de l'étude du rayonnement gamma cosmique de haute énergie, entre la participation à un grand projet international au sol, ou la participation au projet spatial Glast en cours d'études préparatoires pour détecter les gamma de 30 MeV à

300 GeV avec un lancement envisagé vers 2005.

Un second messager des phénomènes d'accélération de haute énergie est le neutrino dont la faiblesse des interactions lui permet de traverser des distances cosmologiques, mais rend sa détection très difficile. Il faut donc disposer d'un volume sensible très étendu. Un vigoureux programme de R&D nommé Antares a été lancé en 1996, pour démontrer la faisabilité d'un grand détecteur sous-marin utilisant l'eau de mer comme radiateur Tcherenkov, avec des techniques permettant l'immersion d'un détecteur optique à plusieurs milliers de mètres de profondeur, l'interconnexion des divers éléments in-situ, ainsi que le maintien de l'ensemble du dispositif en bon état de marche pendant plusieurs années. Cette R&D associe l'IN2P3 et le Dapnia du CEA, avec l'appui d'équipes d'océanologues de l'Insu et de l'Ifremer. Un bilan des résultats obtenus sera effectué en 1999, après la mise en place d'un démonstrateur comportant plusieurs lignes de détecteurs reliées à la côte par un câble électro-optique. Les perspectives de cette technique seront comparées à celle utilisant la glace des pôles, et cet effort pourra éventuellement déboucher sur une vaste collaboration internationale indispensable à la mise en place du grand détecteur nécessaire aux objectifs scientifiques.

La collaboration internationale Auger s'est donnée comme objectif d'élucider le mystère de l'origine de rayons cosmiques observés aux énergies ultimes ( $10^{20}$  eV) que les mécanismes conventionnels d'accélération ne peuvent expliquer. Dans ce but, deux détecteurs (un dans chaque hémisphère) couvriraient chacun une surface sensible de 3000 km<sup>2</sup> (valeur imposée par la faiblesse des flux de particules). Un programme de R&D lancé en 1995 a permis de développer les techniques de télécommunications et de mesure précise du temps adaptées à la taille de ces détecteurs. Cette R&D se terminera en 1998, et la décision sur le passage à la construction, qui ne pourrait être réalisée que dans le cadre d'un Grand équipement scientifique au CNRS, devra faire l'objet d'une concertation internationale, en particulier avec les Etats-Unis qui sont à l'origine du projet.

Enfin, en astrophysique nucléaire, l'IN2P3 est engagé dans la mesure de la production du <sup>8</sup>B en milieu stellaire, mesure importante pour bien évaluer l'ampleur du déficit des neutrinos solaires. Cette mesure sera menée à son terme, puis les recherches se concentreront sur les gamma d'origine nucléaire qui constituent un traceur des processus fondamentaux de nucléosynthèse et de la dynamique des processus explosifs dans l'Univers. Cette problématique bénéficiera des mesures de sections efficaces effectuées à Spiral avec des noyaux radioactifs, et du programme spatial Intégral apportant des données de spectroscopie et d'imagerie gamma avec un lancement prévu pour 2001. L'activité des groupes de l'IN2P3 devra trouver sa place dans le cadre du consortium de cette mission spatiale.

## Cosmologie et Matière Noire

La masse cachée de l'Univers constitue la matière noire dont la nature constitue l'une des grandes questions de l'astrophysique et fait l'objet de l'essentiel de l'effort de l'IN2P3 sur ce deuxième axe.

Une première possibilité consiste à identifier cette matière noire à des particules massives interagissant faiblement (les WIMPS) qui trouvent naturellement leur place dans les théories de supersymétrie et qui seraient piégées dans les halos des galaxies. Une telle recherche expérimentale a été entreprise par la collaboration Edelweiss qui utilise le laboratoire souterrain de Modane avec des détecteurs bolométriques de basse radioactivité. Ce programme maîtrise maintenant une technique de double détection qui permet un rejet du bruit de fond résiduel avec une efficacité de 98%, et le place au tout premier rang mondial. Au cours de ce plan d'action, une série de mesures avec des bolomètres de plus en plus massifs devrait apporter des résultats scientifiques significatifs. La poursuite de cette recherche, avec un cryostat de plus grande taille et des bolomètres totalisant une masse de 10 kg, devra être évaluée en vue de préparer une décision à prendre en 1998.

Une autre approche consiste à rechercher la matière noire sous la forme de naines brunes, étoiles de trop faible masse pour être le lieu de réactions thermonucléaires. La méthode de détection utilisée est basée sur le phénomène de microlentille gravitationnelle et nécessite la surveillance systématique de millions d'étoiles. Le programme Eros 2 est en phase d'exploitation sur le site de l'ESO à La Silla au Chili, et l'effort essentiel portera sur l'analyse des données et sur la mise en place d'un système de déclenchement en temps réel facilitant le suivi des candidats et les mesures complémentaires. Cette recherche pourra éventuellement être complétée par l'étude du halo de la galaxie d'Andromède en utilisant une méthode de traitement des pixels, mise au point par le programme Agape au Pic du Midi. Ce complément nécessiterait l'accès à un télescope à grand champ, et ne pourrait se faire que dans le cadre d'une collaboration élargie.

Les équipements et logiciels développés pour la recherche des naines brunes sont également bien adaptés pour la recherche de Supernovae (SN) de type Ia, et l'utilisation de celles-ci pour mesurer les paramètres fondamentaux de la cosmologie. Une telle étude doit porter à la fois sur des SN lointaines pour avoir une sensibilité suffisante à la décélération de l'Univers, mais aussi sur des SN proches pour améliorer la connaissance de ces objets, et déterminer les corrections nécessaires. Elle nécessite également du temps de télescope pour effectuer la caractérisation et le suivi des SN détectées. Il

reste à bâtir un projet globalement cohérent dans ce domaine, qui prenne en compte tant les équipements utilisables que les forces humaines et leur disponibilité.

A terme, les activités des groupes de l'IN2P3 en cosmologie observationnelle se concentreront sur le programme spatial Planck-Surveyor de mesure des fluctuations du rayonnement micro-onde cosmique primordial à 3K, et dont le lancement est prévu pour 2004 ou 2005. La grande qualité attendue de ces données donnera accès à une mesure précise de l'ensemble des paramètres de l'Univers primordial. Les responsabilités de l'IN2P3 devront être définies au sein du consortium français avant la clôture de l'appel d'offres de l'ESA au début de 1998. Comme pour tous les programmes spatiaux français, cette opération ne pourra être entreprise qu'avec un fort soutien financier du CNES.

L'ensemble des activités de cosmologie observationnelle hors Edelweiss est conduit à l'IN2P3 par les mêmes chercheurs. Leur activité actuelle, et leur objectif final sont bien définis, mais la compatibilité de ce dernier avec l'activité Supernovae reste à préciser.

L'absence apparente d'antimatière primordiale dans l'Univers pose la question du rôle de la violation de la symétrie CP aux premiers instants de la baryogénèse. Au delà du programme en cours Artémis, la recherche de cette antimatière, avec une sensibilité améliorée d'un facteur  $10^4$  par rapport aux mesures précédentes, est l'objectif majeur et ambitieux de la collaboration internationale AMS qui prépare la première mise en orbite d'un spectromètre magnétique. L'IN2P3 a soutenu la phase 1 de ce projet en contribuant à l'identification des particules par un compteur Tcherenkov aérogel qui volera sur la navette spatiale au printemps 1998. Cependant, en l'absence d'un soutien du CNES à ce programme, la participation proposée à la phase 2 (station spatiale), n'est pas compatible avec les moyens financiers de l'Institut. Elle pourrait être reformulée avec un volume fortement réduit et réévaluée dans ce contexte.

L'émission intense de neutrinos par le Soleil offre une possibilité unique de tester les propriétés fondamentales des neutrinos, et leur contribution éventuelle à la masse de l'Univers. Cependant l'interprétation du déficit observé par l'ensemble des expériences, est rendue difficile par un seuil trop élevé et par l'absence d'une mesure de l'énergie. Le projet Hellaz s'est donné comme objectif de développer un détecteur capable de mesurer à terme et en temps réel le spectre des neutrinos solaires à basse énergie avec une résolution telle que l'on puisse distinguer les structures caractéristiques des oscillations. Un programme de R&D en plusieurs phases a donc été engagé pour développer la technologie nécessaire en instrumentation et en basse radioactivité, mais les phases ultérieures de ce projet nécessitent un rassemblement de moyens plus importants et donc

une ouverture sur le plan national et international car il ne peut déboucher in fine que dans le cadre d'une vaste collaboration.

### Ondes gravitationnelles

L'observation directe des ondes gravitationnelles, attendue depuis les prédictions d'Einstein, est le premier objectif du programme Virgo qui a le statut de Grand équipement scientifique, et implique à des degrés divers quatre départements scientifiques du CNRS (SPM, SPI, l'INSU et l'IN2P3 qui y joue un rôle important). Ce programme a choisi la méthode interférométrique pour détecter des variations relatives de la métrique de l'espace-temps de l'ordre de  $10^{-22}$ . Cette sensibilité doit lui permettre de détecter les ondes gravitationnelles émises par des explosions de supernovae ou la coalescence de systèmes binaires compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) jusqu'à une distance typique de 100 Méga parsec.

La mesure d'un déplacement aussi ténu pose de nombreux défis technologiques qui sont presque tous résolus aujourd'hui grâce à l'effort de R&D effectué par la collaboration qui associe quatre laboratoires du CNRS (dont trois de l'IN2P3) à des laboratoires de l'INFN.

Depuis 1996, le projet est entré dans une phase de construction et les premiers bâtiments à Cascina près de Pise sont déjà sortis de terre. Ils abriteront la partie centrale de l'interféromètre, laquelle sera entièrement installée et testée, en parallèle avec la longue construction des deux bras de 3 km de l'interféromètre complet. Cette approche permettra de mettre en service dès 1999 la presque totalité des composants définitifs, de les tester en vraie grandeur, et de mettre au point les méthodes de réglage de l'interféromètre. L'achèvement des deux bras est programmé pour la fin 2001.

Les salles blanches de l'IPN de Lyon, qui doivent être mises en service au début de 1998, recevront les équipements permettant la réalisation des miroirs définitifs de grand diamètre de Virgo, avec la qualité exceptionnelle des petits miroirs préparés actuellement.

Pendant cette période, il faudra également finaliser la simulation du détecteur et préparer l'analyse des données de façon à être, dès le début, capable d'interpréter les signaux complexes fournis par l'interféromètre. La détection d'une onde, puis son utilisation pour un objectif d'astrophysique nécessitant plusieurs antennes, une collaboration avec les projets de même nature à l'étranger, et avec la communauté théoricienne, s'avère donc indispensable, et devra être conduite dans un cadre bien défini.

## Les demandes de la société

Le caractère fondamental, ou "très en amont", de nos sciences rend ses points de contact avec la demande économique et sociale moins nombreux que pour celles qui côtoient naturellement le monde industriel. Il ne nous exonère pas de rechercher et développer, partout où c'est possible, les interactions avec les activités socio-économiques. D'autant que notre expertise dans la compréhension des processus nucléaires est naturellement sollicitée dans le cadre du réexamen du cycle électronucléaire.

### L'aval du cycle électronucléaire

Depuis que le vote de la loi du 30 décembre 1991 a explicitement ouvert une période de recherche de quinze ans sur la gestion des déchets de l'industrie électronucléaire, l'IN2P3 a mobilisé des compétences dans un domaine dont la responsabilité avait été confiée au CEA depuis près d'un demi-siècle. Au cours des dernières années, la participation de l'IN2P3, et plus généralement du CNRS, aux recherches menées dans le cadre de cette loi s'est affirmée ; elle est désormais reconnue par toutes les instances. En 1997, elle s'est concrétisée par la mise en oeuvre du programme pluridisciplinaire Pace. Il conviendra de poursuivre le redéploiement des équipes et des moyens déjà entrepris autour des activités suivantes : mesures et analyses des paramètres physiques nécessaires à la réalisation de la transmutation des noyaux radioactifs à vie longue produits dans les réacteurs ; études de neutronique avec le générateur de neutrons pulsés acquis dans le cadre du programme interdisciplinaire Pace ; pour aboutir à des études de système, participation à la conception d'un démonstrateur combinant accélérateur et réacteur sous-critique, et à sa réalisation dans nos domaines de compétence, en particulier pour l'accélérateur. Simultanément, dans le domaine de la radiochimie, l'Institut va continuer à soutenir des études visant d'une part à mesurer les paramètres physico-chimiques qui jouent un rôle dans la migration des actinides et produits de fission dans la géosphère et d'autre part à concevoir des matrices de stockage performantes pour le confinement des déchets du cycle. La coopération avec le CEA et EDF, déjà très avancée, notamment dans le cadre des Groupements de recherche Gédéon et Practis, devra être développée. Elle s'inscrit dans la stratégie mise en

oeuvre par le ministère de l'Education nationale, de la Recherche et de la Technologie dans le domaine des déchets nucléaires, et répond aux recommandations de la Commission nationale d'évaluation (CNE) instituée par la loi du 30 décembre 1991 et de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques (OPECST).

### L'organisation du potentiel technologique

L'irradiation par protons ou ions lourds a déjà établi sa validité comme thérapie anticancéreuse pour certaines tumeurs. L'IN2P3 s'est engagé dans cette voie depuis le début des années 90 par une réaffectation du synchroclotron d'Orsay. Il poursuivra sa coopération avec le Centre de protonthérapie d'Orsay (CPO) auquel cette machine est dévolue. Dans ce cadre, il participera au développement d'une station d'irradiation par protons de 200 MeV. Parallèlement, il poursuivra sa coopération avec des sociétés industrielles pour examiner les possibilités ouvertes par la construction d'un cyclotron supraconducteur compact qui a été conçu dans ce but.

De façon générale, l'Institut veillera à conduire ses actions de R&D technologiques, chaque fois que cela s'avérera possible, en liaison avec la ou les entreprises qui partagent des savoirs et affichent des objectifs compatibles dans le domaine concerné, dans le cadre de "Contrats de recherche à objectifs partagés". En particulier sous l'impulsion et le contrôle du directeur adjoint technique, cette démarche fera l'objet d'une évaluation systématique. Elle a pour but la diffusion des technologies développées dans nos laboratoires et l'enrichissement en retour résultant d'un meilleur échange de connaissances avec les entreprises qui sont amenées à construire en série les équipements développés. Dans des cas plus restreints, la valorisation industrielle de nos équipements peut s'avérer possible. Elle sera systématiquement recherchée, suivant les modalités qui ont par exemple fait leurs preuves pour les sources d'ions dans le cadre de nos relations avec la société Pantechnik.

L'amélioration de la qualité des mesures de radioactivité dans l'environnement qui est souvent l'objet de débats publics, constitue une demande forte de la société. L'Institut considère de son devoir de rendre dis-

ponibles (faire connaître ou expliciter) les compétences qu'il possède dans ce domaine au sein de plusieurs de ses laboratoires. Il examinera les modalités de création d'un réseau national d'équipements de mesures radioactives, capable de répondre aux sollicitations des organismes ou collectivités. Dans ce but, il veillera à ce que les équipements nécessaires reçoivent les agréments de qualité requis, et procédera aux éventuelles opérations de jouvence nécessaires.

### ***L'ouverture vers la formation des jeunes***

La demande sociale qui est adressée à un organisme de recherche fondamentale comme l'IN2P3 concerne évidemment au premier chef la diffusion des connaissances acquises dans nos laboratoires. L'Institut accentuera donc très sensiblement sa contribution à la formation.

Vis à vis de l'enseignement supérieur, l'établissement de liens plus étroits avec les universités constitue à cet égard la première priorité, d'autant qu'ils constituent une des raisons d'être et la justification d'un institut national. Plusieurs modalités nouvelles d'intervention ont été élaborées et devront être définitivement mises en place d'ici l'an 2000. Elles concernent la parti-

cipation à l'enseignement dans les universités où nos laboratoires ne sont pas représentés, la mise sur pied d'un programme spécifique d'accueil d'enseignants-chercheurs de ces universités, la création d'antennes dans certaines d'entre elles, un fort accroissement de la mobilité des chercheurs vers l'enseignement supérieur, une attention systématique portée à la présence de nos sciences dans les cursus du deuxième cycle et les DEA. D'ores et déjà, à titre expérimental, trois universités accueillent des chercheurs qui viennent donner des conférences sur des thèmes d'actualité, une expérience qui a vocation à s'étendre à d'autres établissements.

Vis à vis de l'enseignement secondaire, un programme massif de conférences dans les grandes classes des lycées (programme Nepal) se met actuellement en place. A cette fin, un groupe de chercheurs a préparé le support écrit et visuel de conférences-type portant sur des projets expérimentaux actuels de l'Institut. Au nombre de cinq aujourd'hui, ces conférences ont vocation à se diversifier.

Dans le même esprit, l'Institut continuera à contribuer à la diffusion de l'information scientifique concernant son domaine vis à vis des divers publics par des moyens appropriés : publications, information des médias, expositions, conférences, produits audiovisuels.



## La technologie à l'IN2P3

**A** l'IN2P3, la technologie peut se décliner suivant quatre axes : l'informatique, l'électronique, la mécanique et toutes les disciplines nécessaires à la recherche et développement sur les accélérateurs de particules. Les deux caractéristiques communes à ces quatre domaines sont leur rapidité d'évolution bien que ce soit des technologies déjà bien établies, et la nécessité d'être au meilleur niveau pour satisfaire les besoins en instrumentation des physiciens de l'IN2P3.

Nous décrivons donc ici les actions qui seront conduites selon ces quatre axes, non pas l'un après l'autre, mais transversalement en les projetant dans un espace dont les quatre dimensions sont : la structure de travail, les outils mis à disposition des ingénieurs et techniciens, la compétence de ces acteurs, les axes de développement envisagés.

### La structure de travail

**L'**IN2P3 est l'exemple typique d'une ingénierie distribuée ; chaque laboratoire possède ses propres ressources en personnel et en équipement, ce qui lui permet d'être autonome dans la conception et la réalisation des éléments de détecteur dont il s'est porté responsable. Le principe de base de ces activités technologiques est de les intégrer aux activités scientifiques de telle façon que la plus grande créativité sorte de cette symbiose. Dans le passé, l'IN2P3 s'est refusé à créer des pôles de compétences qui auraient appauvri adiabatiquement les équipements et les compétences des autres laboratoires. Ce principe d'ingénierie distribuée restera celui en vigueur dans les années à venir. Mais l'expérience montre que cela nécessite à l'évidence une structure de coordination qui continuera à exister sous le contrôle de l'échelon central de l'IN2P3. Il importe en effet que l'autonomie des laboratoires ne devienne pas telle qu'elle soit préjudiciable à une bonne collaboration d'ensemble. L'informatique mérite cependant une mention particulière à cause de l'existence du Centre de calcul de Lyon exerçant un rôle fédérateur qui n'existe pas dans les autres disciplines.

Cette ingénierie distribuée présente cependant quelques inconvénients, en particulier de ne pas permettre la mise en place volontariste d'experts nécessaires dans quelques domaines (par exemple celui des matériaux). Pour des raisons tout à fait compréhensibles,

les laboratoires privilégient les tâches qui les concernent directement, plus que les tâches d'intérêt général pour l'Institut, et cela explique ce manque d'experts.

Il existe cependant quelques spécialistes de valeur internationale dans plusieurs domaines à l'IN2P3, par exemple l'électronique analogique, les détecteurs à pixels, la compatibilité électromagnétique, l'ultravide, la physique des accélérateurs... Mais cette expertise a été générée beaucoup plus par l'histoire de chaque laboratoire que par une volonté structurante de l'IN2P3. Deux actions sont prévues dans les années à venir : l'une, déjà engagée, consiste à ce que ces expertises soient le plus possible partagées dans l'Institut, l'autre est d'entreprendre des collaborations avec des organismes extérieurs dans des domaines ciblés, par exemple les matériaux et le collage avec le Cetim.

### Les outils de la technologie

**C**es outils sont les équipements en matériel, les logiciels d'assistance par ordinateur et les méthodes de travail. Dans le champ des équipements en matériel, la politique d'allocation d'un budget spécifique à ce domaine continuera. Il s'agit là d'une action nationale du type de celle dont il est question ci-dessus. Cela permet d'avoir une cohérence dans l'équipement et plus spécialement de conduire des opérations groupées d'achat de matériel, en particulier informatique. Pour ce qui est de l'IAO-CAO, l'IN2P3 a eu une action volontariste dès 1987, au niveau national. Tous les laboratoires, qu'il soient petits ou grands, ont bénéficié de cette action, grâce à la mise en place de bases de données distribuées, de bibliothèques communes et la création de véritables communautés de métiers. Cet effort est et sera poursuivi et approfondi car il est essentiel à l'efficacité de l'Institut. Il faut noter cependant les difficultés inhérentes à cet effort en IAO/CAO qui tiennent à la sophistication de plus en plus importante des produits réalisés. En effet, ceux-ci peuvent demander des équipements trop onéreux pour l'Institut et/ou des spécialistes dont nous n'aurions pas, dans chaque laboratoire, une utilisation à temps complet. C'est le cas par exemple du test de circuits intégrés. Cette situation devra être traitée au cas par cas en prenant en compte l'intérêt général de l'IN2P3 dans les années à venir. La position pragmatique

tique sur ce problème est de développer dans les laboratoires qui en ont besoin pour une expérience de physique, les équipements sophistiqués nécessaires et assurer par la suite une coordination pour leur utilisation dans l'Institut.

Enfin, le problème des méthodes se posera de façon accrue dans les années à venir, particulièrement en ce qui concerne "l'assurance qualité".

Les procédures du type qualité dont les points principaux sont la maîtrise de la conception et sa justification, les revues de projet, le traitement des évolutions, l'écriture de spécifications précises et l'attribution précise de lots de travaux avec le traitement des interfaces entre ces lots, et qui sont déjà employées ailleurs, doivent devenir courantes dans l'IN2P3, compte tenu de la complexité croissante de l'instrumentation que nous réalisons.

D'ailleurs, la mise en place de telles procédures commence à nous être imposée sur la machine LHC, les détecteurs Babar et Virgo. Le Cern agit pour les mettre en œuvre sur Atlas et CMS. La mise en place d'instructions de management précises et leur utilisation par les projets est un axe de développement pour qu'en 2000, ces pratiques soient bien intégrées dans les projets.

### La compétence des acteurs

Ce sujet, traité au chapitre «Ressources humaines», mérite cependant une mention spéciale dans ce texte car on ne peut pas décrire un plan d'action technologique sans référence à cette dimension. Nous avons déjà dit que la technologie évoluait très vite ; les métiers qui y sont liés évoluent donc aussi vers beaucoup plus de précision dans la maîtrise des phénomènes et dans leur simulation. Les ingénieurs et techniciens doivent savoir simuler, par exemple le bruit dans un système électronique, ou les déformations élasto-thermiques dans un système mécanique complexe. Il faut donc assurer aux acteurs de cette technologie une formation adéquate dont le contenu doit évoluer au fil des ans en fonction des besoins qui se font jour. Cette action de formation est une constante dans la politique technologique de l'Institut.

Il faut aussi dans le même temps, préserver le savoir-faire accumulé dans nos laboratoires, au moins quand cela s'avère nécessaire, et le communiquer dans tous les laboratoires. Cela nécessite la mise en place d'une base de données utilisable. Ce dernier qualificatif signifie que les savoir-faire intégrés dans la base auront dû être qualifiés et devront avoir une espérance de vie suffisante. La mise en place d'une telle base de données devrait être réalisée pour 2000.

### Les axes de développement

En mécanique et en électronique, nous allons continuer l'action IAO/CAO dans les termes rappelés ci-dessus. Cela demande, lors de l'achat d'un module logiciel non encore implanté dans l'Institut, de prendre en compte non seulement les fonctionnalités proposées par rapport aux besoins exprimés, mais aussi les problèmes d'interfaçage, de base de données, de bibliothèques en fonction des logiciels que nous possédons déjà, ainsi que la pérennité des fournisseurs lors d'une acquisition qui nécessite toujours de gros efforts de mise en place, de formation et de maintenance.

Dans le domaine des méthodes, il a déjà été dit ci-dessus qu'il était nécessaire de mettre en place des procédures qualité que l'on regroupera dans un "référentiel de management de projet". Celui-ci contiendra des principes simples et leurs applications opérationnelles, telles que les pratiques de sous-traitance. Les procédures seront écrites, discutées, intégrées dans ce même document.

L'objectif d'un tel référentiel est d'augmenter fortement la probabilité de réaliser des projets ayant les performances requises dans les coûts et délais prévus. Cela permet aussi aux responsables de l'IN2P3 d'avoir un meilleur suivi des programmes.

Dans cette optique, l'IN2P3 manque d'ingénieurs pouvant conduire des projets dans leur ensemble de façon professionnelle (il faut remarquer que l'impact des laboratoires de l'IN2P3 dans les collaborations internationales dépend, pour une grande part, de leur capacité à être responsable de la conception et de la réalisation de matériels technologiquement complexes). L'effort pour mettre en place de telles compétences devra donc être poursuivi, par la détection des compétences adéquates dans les laboratoires et une action volontaire pour associer ces personnes aux chefs de projets en activité.

En ce qui concerne la R&D accélérateur, l'IN2P3 s'est orienté sur trois axes qui alimenteront cette activité jusqu'en 2000.

Il s'agit de la recherche sur les sources d'ions lourds, du développement de structures accélératrices supraconductrices en vue des futurs collisionneurs linéaires ou des machines à fort courant d'hadrons, enfin de la conception et réalisation d'accélérateurs à fort courant de protons. Ces trois axes sont ceux qui nous paraissent les plus adaptés aux développements futurs attendus dans ce domaine. En effet, d'une part pour nos accélérateurs à ions lourds, les performances des machines sont directement liées à celles des sources, d'autre part l'accélération par cavités supraconductrices est la meilleure alternative possible pour accélérer soit des forts courants de protons, soit des électrons à très haute énergie (collisionneurs linéaires) car les performances demandées aux structures dites chaudes, en par-

ticulier au point de vue des champs d'accélération, posent des problèmes importants. Enfin, les accélérateurs à fort courant de hadrons sont un passage obligé pour les réacteurs hybrides quelle que soit leur destination. Dans le cas particulier des accélérateurs, la R&D est concentrée sur quatre laboratoires qui sont l'ISN à Grenoble, l'IPN et le LAL à Orsay et le Ganil à Caen. Il sera recherché une meilleure intégration des efforts de ces laboratoires en créant, si nécessaire, une structure spécifique.

Ces axes technologiques des accélérateurs demandent des expertises très particulières dans l'IN2P3 : spécialistes de la dynamique des faisceaux, de la haute fréquence de puissance, du vide, de la cryogénie, des alimentations continues, du magnétisme, etc... Il faudra préserver ces métiers dans l'avenir en sachant bien que ceux dans lesquels nous n'aurons plus assez de spécialistes disparaîtront. Un des objectifs de ce plan d'action est donc de renforcer la synergie entre les laboratoires cités ci-dessus pour entretenir une dynamique nécessaire.

Cependant, le point le plus important sur ce sujet concerne la disparition, due au vieillissement du cadre, d'une catégorie de personnes que l'on pourrait appeler "les concepteurs de machines", c'est-à-dire des personnes capables de maîtriser l'ensemble des techniques propres aux accélérateurs et d'être des chefs de projet de systèmes complets. Ces personnes sont presque toutes proches de la retraite et il est important de dégager et de former quelques candidats potentiels d'ici à l'an 2000 sur les programmes de R&D ou de réalisation que nous avons dégagés.

En matière d'informatique, il convient de distinguer la collecte des données d'un détecteur (informatique « en ligne ») de l'analyse de ces données. Il s'agit, dans le second cas, de concevoir et de mettre des outils à disposition des physiciens, pour leur usage quotidien.

Les données expérimentales étant de plus en plus volumineuses, il est plus que jamais utile de disposer d'importants moyens centralisés en informatique d'analyse, complétés par les ressources des laboratoires. Un axe important de développement technologique concerne l'optimisation de l'accès aux données : une mémoire de masse hiérarchique gère les transferts de fichiers entre cassettes et disques magnétiques, tandis qu'un système de bases de données fournit au physicien exactement les données dont il a besoin, déchargeant

son application des tâches de décodage et de tri. Dans ces deux domaines, les performances demandées sont largement supérieures à l'offre du marché, ce qui nécessite une collaboration avec les fournisseurs industriels concernés.

Qui plus est, le passage systématique à des applications distribuées faisant un usage optimal des ressources, centralisées au Centre de Calcul de Lyon ou non, permet d'espérer une efficacité accrue. Beaucoup dépend cependant d'une évolution positive du réseau informatique national, tant en bande passante qu'en qualité de service.

L'utilisation d'ordinateurs individuels (PC) regroupés en "fermes", interconnectés par un réseau local performant, représente un autre développement important, car cela permet une augmentation massive de la puissance de traitement à coût constant. En particulier, on commence à étudier l'utilisation de fermes de PC en ligne.

Par ailleurs, la taille et la durée des projets imposent l'usage généralisé des méthodes d'ingénierie logicielle. La formation des ingénieurs est en cours, mais il faudra un effort soutenu pour modifier la pratique des physiciens, pour la plupart en contact quotidien avec les logiciels d'analyse des données.

Enfin, les outils permettant le travail en commun de personnes distantes géographiquement devient une nécessité du fait que les collaborations sont maintenant mondiales. Il s'agit de développer la vidéoconférence et la constitution de "laboratoires virtuels", qui grâce aux outils de communication basés sur Internet, vont bientôt devenir une réalité.

En conclusion, on voit bien, par ce qui vient d'être décrit, qu'un effort structurant et réfléchi a été entrepris dans les actions technologiques de l'Institut. Cet effort, poursuivi depuis une dizaine d'années, a déjà porté des fruits et la période couverte par ce plan d'action devrait parfaire cette organisation. En l'an 2000, l'IN2P3 sera définitivement passé, au point de vue technologique, d'une structure de laboratoires fermés sur eux-mêmes et travaillant avec leurs moyens propres, à une structure complètement ouverte, identifiée, distribuée, organisée, où chaque laboratoire représente une partie d'un effort vraiment collectif.



## Les ressources humaines

Les orientations en matière d'emplois à l'IN2P3 ont fait l'objet d'un long débat au cours des dernières années notamment dans le cadre du rapport préparé par Hubert Doubre.

Une haute qualification des personnels de l'Institut s'impose afin de maintenir la technicité exigée pour la conservation et le développement du potentiel de recherche de l'IN2P3. Une technicité optimale suppose que des fonctions soient externalisées de façon à concentrer l'activité technique des laboratoires sur la conception, la fabrication de prototypes et l'amélioration des équipements indissociables de l'activité de recherche de l'Institut.

La construction de grands équipements est à l'origine des particularités de l'organisation de l'IN2P3. En effet, l'activité des laboratoires, les décisions scientifiques, administratives et financières sont très interdépendantes, ce qui s'oppose à un morcellement des centres de décisions.

### La gestion prévisionnelle des effectifs

Au cours de la dernière décennie, une gestion purement administrative des emplois budgétaires de l'Institut aurait vraisemblablement conduit à des incohérences fortement nuisibles à la recherche. En effet, dans nos disciplines, les évolutions et redéploiements d'emplois doivent être prévus très en amont car ils sont souvent liés à des opérations lourdes, soit en période de démarrage, soit en période d'arrêt.

C'est dans ce cadre que le développement de l'activité des laboratoires mais aussi sa réorientation, y compris la fermeture d'équipements, ont été menés à bien de manière concertée sans que la science n'en subisse de conséquence dommageable. Ceci a été réalisé malgré la réduction des effectifs subie dans la dernière période. Cette politique a pu être conduite grâce à la gestion globale des emplois dont disposait l'IN2P3 jusqu'en 1996.

Pendant les cinq prochaines années, environ 20% des ingénieurs, techniciens et administratifs (ITA), dont un quart des ingénieurs, quitteront l'Institut pour cause de retraite. A l'horizon 2007, 40% des effectifs d'ITA auront pris leur retraite dont la moitié des ingénieurs en

fonction à ce jour. Ces prévisions ne tiennent pas compte des mesures spécifiques arrêtées pour 1997 (congé de fin d'activité et mesures propres au CNRS).

Si ces mesures sont reconduites pour les prochaines années, les départs risquent même d'être nettement supérieurs à ces prévisions (pour 1997 les départs à la retraite progressent de 20% par rapport aux prévisions en raison des dispositifs particuliers).

La politique scientifique de l'Institut s'établit au minimum sur une dizaine d'années. Il serait incohérent de chercher à définir une politique scientifique sans en faire autant pour son corollaire en matière d'emplois.

Dans ces conditions, les orientations pour les prochaines années s'articulent autour de deux axes :

- l'accroissement de la qualification des personnels par le biais de recrutements externes et du développement des actions de formation permanente.
- la décroissance de recrutement dans certains corps compte tenu de l'évolution des techniques et du développement de la sous-traitance.

Enfin, l'Institut est engagé dans de nombreux programmes internationaux au sein desquels l'activité des ITA s'avère indispensable. Sous l'effet des départs prévisionnels, la participation de l'IN2P3 à ces programmes pourrait être fortement remise en cause. Une vision à moyen terme des effectifs à la disposition de l'Institut et la maîtrise de ces emplois par lui-même s'avèrent donc indispensables pour conduire avec succès les collaborations internationales auxquelles il participe.

### La formation permanente

Elle constitue l'un des éléments de la performance et une priorité pour l'Institut parce qu'elle permet de maintenir un potentiel technique de très haut niveau et conduit à un enrichissement personnel des agents.

Il serait totalement illusoire de limiter la formation au maintien des connaissances initiales sans tenir compte de la constante évolution technologique à laquelle doivent faire face les personnels de l'IN2P3.

Chaque laboratoire dispose d'un plan de formation répondant d'une part aux besoins individuels des agents et d'autre part aux programmes scientifiques de l'Institut.

L'IN2P3 a pour objectif au travers de sa formation permanente de permettre :

- Une adaptation aux évolutions de la recherche.
- La prise en compte de l'évolution des métiers.
- La formation à l'encadrement.
- La prise en compte des besoins individuels de formation.

Dans ce contexte, la formation permanente de l'Institut s'articulera autour de trois axes :

- Les écoles thématiques destinées à renforcer les connaissances en fonction de l'évolution technologique. Le rythme d'une ou deux écoles par branche d'activité professionnelle et par an devra être maintenu.
- Les stages constructeurs organisés auprès des entreprises pour répondre à des besoins spéci-

ifiques en matière de calcul des structures ou de conception de circuits intégrés par exemple.

- Les séminaires pour une actualisation des connaissances.

Ces axes seront maintenus et adaptés aux besoins au cours des prochaines années, en fonction des résultats des évaluations qui clôturent chaque session.

L'IN2P3 va connaître au cours des prochaines années des départs importants de personnels. Il serait illusoire et contre-productif de préconiser un remplacement poste par poste, facteur d'un immobilisme et contraire aux intérêts de la science. En revanche l'absence de gestion prévisionnelle de ces départs par l'Institut entraînerait des conséquences fortement préjudiciables. Par ailleurs, le renouvellement des effectifs se traduira par des besoins de formation accrus pour permettre aux agents nouvellement recrutés de connaître leur environnement et de s'adapter aux missions de l'Institut.



## Perspectives d'évolution des moyens budgétaires

Ce plan d'action n'a pas la possibilité d'arrêter une programmation budgétaire puisque les moyens mis annuellement à la disposition de l'Institut dépendent du budget de l'Etat et des arbitrages internes au CNRS. L'esquisse ci-dessous n'a donc de valeur qu'indicative et ne pourra servir que de référence.

Les moyens des laboratoires recouvrent trois types de dotation :

- Le soutien de base (fonctionnement général qui est essentiellement récurrent, les opérations scientifiques non ventilées qui, vouées à n'évoluer que lentement, permettent les activités scientifiques propres du laboratoire : missions, petit équipement ...).
- L'équipement planifié au niveau de l'Institut pour les moyens techniques majeurs comme le décrit le chapitre Technologie.
- Les dotations effectuées dans le cadre des programmes scientifiques coordonnés par les Directeurs adjoints scientifiques présentés dans les chapitres correspondants. Les moyens ont connu une décroissance continue sur une longue période : par exemple - 11,4 % en volume (francs courants) de 1983 à 1993, sans d'ailleurs que l'évolution des grands équipements scientifiques (- 6 %) en soit la cause. Enrayer ce déclin et rétablir les moyens des laboratoires constituera la priorité budgétaire de l'Institut.

Aussi bien les grands équipements scientifiques (construction et fonctionnement) que les programmes scientifiques directement liés à des expériences exigent dans nos disciplines une maîtrise, et donc une esquisse de programmation à long terme. Aussi nécessaire soit-elle, cette programmation doit en effet rester une esquisse, susceptible donc de révisions continues et même majeures, pour deux raisons :

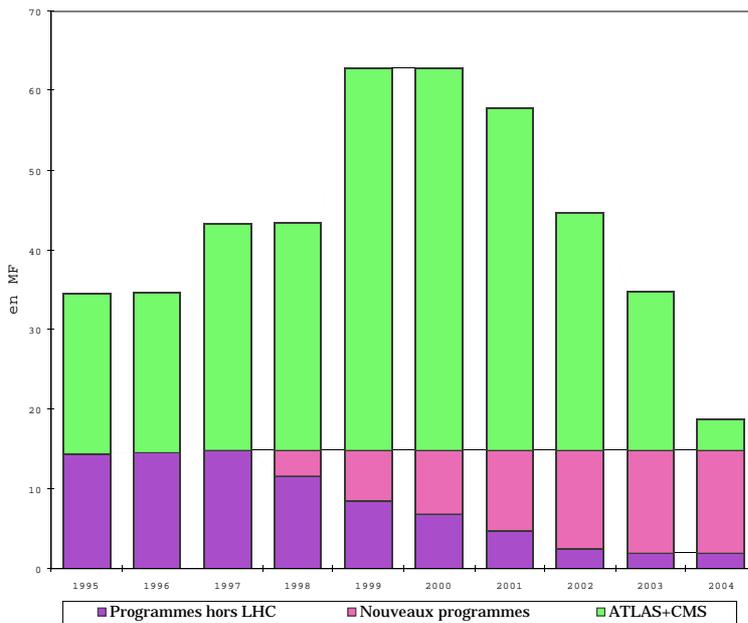
- D'abord parce que les résultats scientifiques, par principe heureusement imprévisibles, doivent amener à réviser ces prévisions.
- Ensuite parce que l'évaluation par le Conseil scientifique – organe essentiel et indépendant de la direction de l'Institut –, régulièrement sollicitée, peut conduire à infléchir les objectifs et la distribution des moyens.

Les graphiques ci-contre portant sur la distribution des moyens budgétaires (exprimés en millions de francs hors taxes) doivent donc être considérés comme provisoires et continûment amendables. Ils conservent de larges plages ouvertes pour les expériences envisagées ou envisageables au cours de la période considérée mais pour lesquelles toute décision serait prématurée. Ils illustrent les orientations discutées dans les chapitres scientifiques.



# Budget quarks et leptons

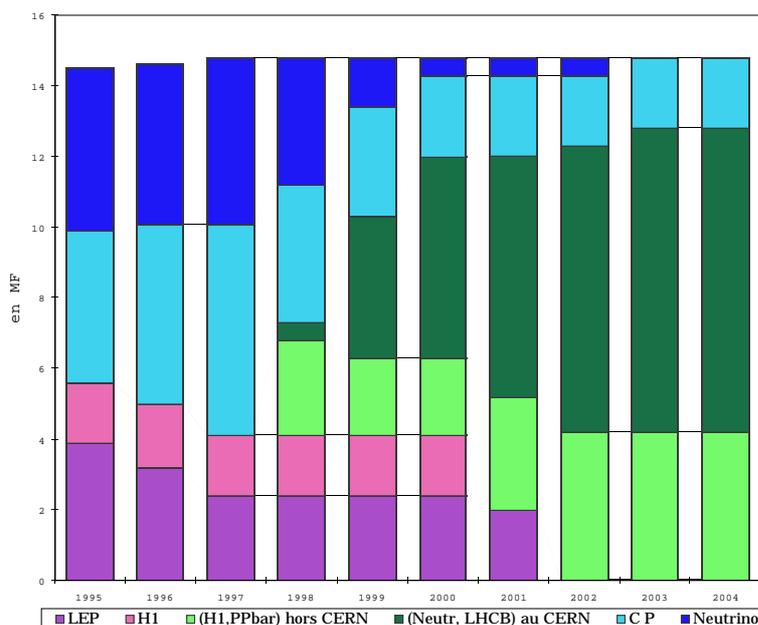
## BUDGET TOTAL



Les programmes hors LHC et nouveaux programmes sont détaillés dans le graphique ci-contre. Les budgets consacrés aux détecteurs ATLAS et CMS comprennent les investissements sur la construction des détecteurs et le coût des mesures d'accompagnement (fin des R&D, équipements spéciaux, tests des prototypes et des éléments définitifs). La décroissance forte des investissements liés à Atlas et CMS pourrait ouvrir la voie, au début des années 2000, à de nouveaux projets.

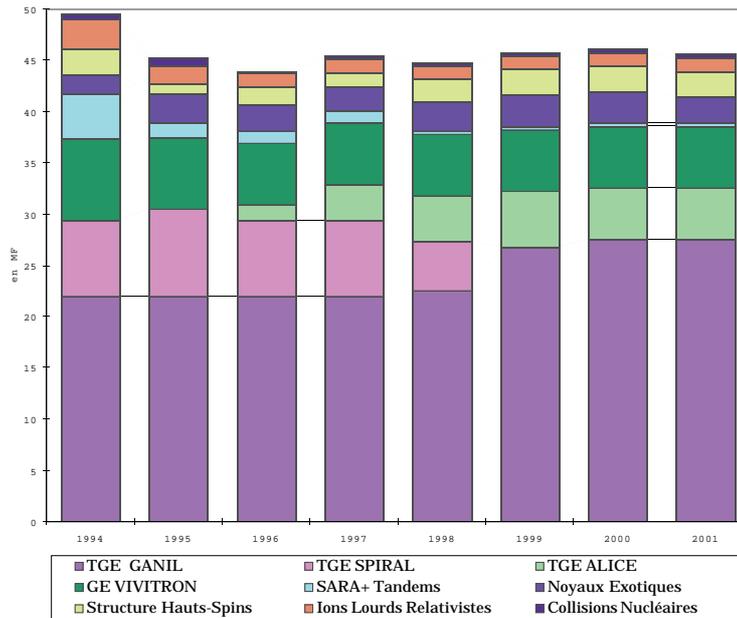
Le budget associé au fonctionnement et la maintenance des expériences LEP restera constant jusqu'en 2000, l'année 2001 étant consacrée à leur démantèlement. Le budget associé à H1 concerne aussi le fonctionnement et la maintenance ; il sera maintenu constant jusqu'en l'an 2000.

## LES PROGRAMMES QUARKS ET LEPTONS HORS ATLAS ET CMS



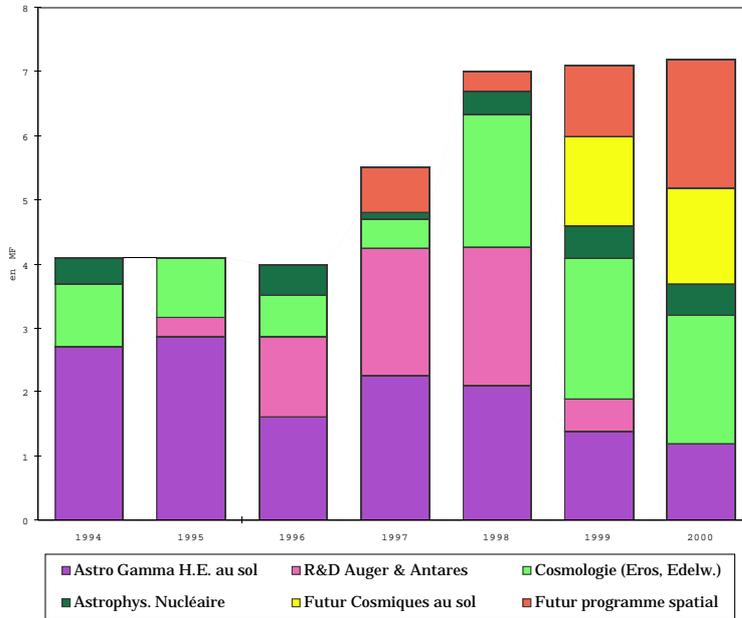
Le budget du domaine CP couvre les deux expériences en cours ; il est en décroissance puis deviendra constant au delà de 1999 lorsque la construction du détecteur Babar sera achevée. Le budget attaché au programme neutrino ne recouvre que les expériences déjà engagées, sa décroissance est due à la fin des investissements sur Nemo. Deux nouveaux budgets apparaissent à partir de 1998 qui doivent permettre de faire face aux projets décrits dans le texte : • au Cern, possibilité de continuer un programme neutrino ; contribution majeure à la construction du détecteur LHCB • hors Cern continuation de H1 au delà de l'an 2000 ; soutien à l'expérience D0 au Tevatron. La somme globale n'est qu'indicative et la répartition ne sera précisée qu'ultérieurement.

## Budget matière nucléaire



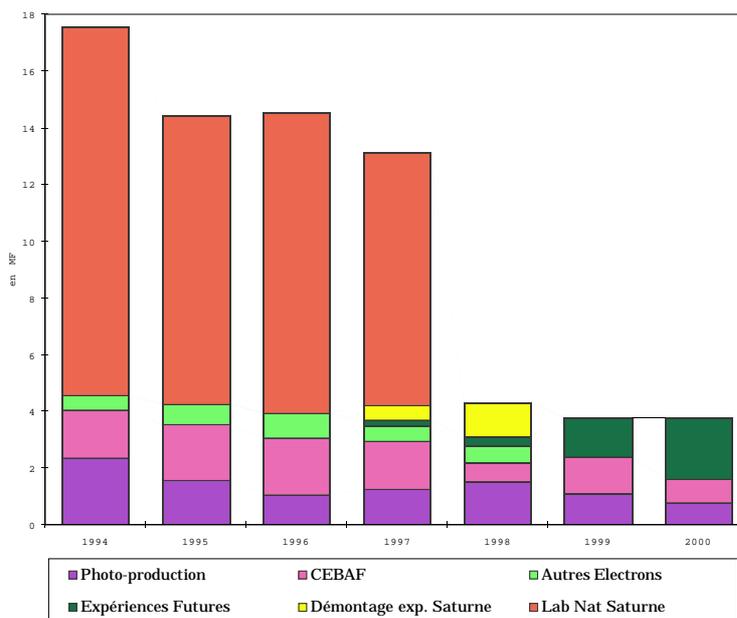
*La figure présente les budgets exécutés jusqu'en 1997, prévisionnels au-delà. La ligne SPIRAL s'arrête en 1999 en fin de construction. A cette date, la ligne Ganil remonte pour intégrer le budget de fonctionnement de l'ensemble. La ligne Alice, qui débute en 1996 et passe par un maximum en 1999, s'étendra jusqu'en 2004 pour une intégrale de 35 MF. Depuis la fin de la construction du Vivitron (1995), sa ligne correspond au budget d'exploitation. A l'intérieur du programme " Matière Nucléaire" les lignes majeures sont celles concernant les noyaux exotiques (construction des équipements Exogam et Vamos pour Spiral), la structure nucléaire (fin de construction d'Euroball et installation au Vivitron) et les ions lourds relativistes.*

## Budget Particules et noyaux dans l'univers



*Autorisations de programme pour l'étude des champs, particules et noyaux dans l'Univers. Ces montants ne comprennent pas les Grands équipements scientifiques (Virgo et le futur GES en projet).*

## Budget Physique hadronique



*Autorisations de programmes en physique hadronique. L'effet de l'arrêt de Saturne est clairement visible à la transition 1997-1998.*

## Résumé des mesures nouvelles

Voici rassemblées ci-dessous, les principales mesures nouvelles envisagées au cours de la période de ce plan d'action, telles qu'elles sont indiquées au fil des chapitres. Ceci permettra de faciliter une analyse de bilan, le moment venu.

### Quarks et leptons

- Implication dans l'expérience D0 au Tevatron pour la période de prise de données de 1999 à 2002 de façon à se préparer à la physique du LHC.
- Engagement dans LHC-B, l'expérience qui sera conçue pour l'étude des quarks b et la violation de CP auprès du LHC.
- Engagements dans de nouveaux programmes dédiés à la physique des neutrinos qui seront définis pendant la durée de ce plan d'action.
- Participation envisagée à la phase de haute luminosité et haute énergie de Hera à Hambourg, cette participation devant être clarifiée.

### Matière nucléaire

- Préparation du site du Vivitron à Strasbourg pour l'accueil du détecteur européen Euroball et mise en place de la structure permettant le fonctionnement optimal de ce détecteur (fin 1998-début 1999).
- Fin de construction de Spiral, tests de l'ensemble de production et d'accélération de faisceaux exotiques Ganil-Spiral, mise à la disposition des physiciens (mi 1998-mi 1999).
- Construction de la première phase des nouveaux détecteurs pour la physique des noyaux exotiques Exogam et Vamos auprès de Spiral (fin 1999-début 2000).
- Fin de rédaction des "Technical Design Reports" concernant les participations de l'Institut au détecteur Alice destiné à l'étude de la physique des collisions

d'ions lourds relativistes auprès du LHC ; sélection des tâches de construction assumées par nos laboratoires et mise en place des structures correspondantes (année 1999).

### Physique hadronique

- Définition des conditions d'une participation à l'expérience Hadès à GSI, et prise de décision sur cet engagement.
- Amélioration des conditions d'utilisation du faisceau Graal à l'ESRF, et révision de la programmation des expériences, en concertation avec l'INFN.
- Définition d'un programme à moyen terme de physique hadronique à TJNAF/Cebaf, en s'appuyant sur les compétences déjà acquises, et en favorisant les collaborations avec le Dapnia.
- En fin de plan, en concertation avec nos partenaires européens, nécessaire prise de décision sur le projet Elfe et définition des contributions de chacun.

### Particules et noyaux dans l'univers

- Mise en place d'au moins un GES (Grand équipement scientifique) pour participer, en collaboration internationale, à la construction d'un grand détecteur au sol tel que Auger, à la suite d'Antarès ou à un réseau prenant la succession de CAT/Céleste.
- Utilisation de moyens spatiaux : il est actuellement prévu de participer à AMS phase 1 en 1998, et de préparer Planck-Surveyor pour 2004-2005. Il faut étudier les conditions de notre participation à Intégral, AMS-2 (~2001?) ou Glast (~2005).
- Poursuite du programme Edelweiss de recherche des WIMPs avec un ensemble de bolomètres à double détection totalisant une masse de l'ordre de 10 kg, dans des conditions et un calendrier qui restent à préciser.

### Les demandes de la société

- Participation à la conception d'un démonstrateur de système hybride (accélérateur + réacteur) pour la transmutation des déchets nucléaires.
- Développement et généralisation de "Contrats de recherche à objectifs partagés" (CROP) avec des partenaires industriels.
- Mise en place d'un réseau de laboratoires pour les mesures de radioactivité dans l'environnement.
- Programme massif de conférences dans les classes de lycées.
- Fort accroissement de la mobilité des chercheurs vers l'Enseignement supérieur.
- Contributions à l'enseignement de nos sciences dans les universités où l'IN2P3 est absent.
- Création d'antennes de laboratoires de l'IN2P3 dans des universités où l'Institut est absent.

### La technologie à l'IN2P3

- Le système d'ingénierie distribuée sera maintenu avec un partage accentué des expertises existantes dans les laboratoires.
- Un référentiel d'instructions de management de projet sera mis en place.
- Des futurs chefs de projet seront identifiés, formés, associés à des projets pour acquérir cette compétence.
- Les efforts des laboratoires en R&D accélérateurs feront l'objet d'une coordination plus importante que par le passé.
- Des «concepteurs d'accélérateurs» seront identifiés et formés pour prendre la relève de ceux qui quittent l'IN2P3.
- L'accès aux données des expériences sera optimisé et amené au niveau de performance nécessaire, en collaboration avec les industriels les plus performants du secteur.
- L'usage de méthodes d'ingénierie logicielle et des procédures qualité qu'elles sous-tendent, sera généralisé.

### Liste des sigles

AGOR :	Accélérateur Groningen-Orsay
CEBAF :	Continuous Electron Beam Accelerator Facility (Etats-Unis)
CERN :	Laboratoire Européen de Physique des Particules (Genève)
CETIM :	Centre Technique des Industries Mécaniques
CNES :	Centre National d'Etudes Spatiales
DAPNIA :	Département d'Astrophysique, de Physique Nucléaire et d'Instrumentation Associée (CEA)
DESY :	Deutsch Elektron Synchrotron (Hambourg, Allemagne)
DSM :	Direction des Sciences de la Matière (CEA)
ECFA :	European Committee for Future Accelerators
ELFE :	European Laboratory for Europe
ESA :	European Space Agency
ESO :	European Southern Observatory
ESRF :	Electron Synchrotron Research Facility (Grenoble)
GANIL :	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (Caen)
GSI :	Gesellschaft für Schwerionenforschung (Darmstadt, Allemagne)
HERA :	Hadron Elektron Ring Accelerator (Hambourg, Allemagne)
ILL :	Institut Laue Langevin (Grenoble)
IFREMER :	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
INFN :	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italie)
INSU :	Institut National des Sciences de l'Univers (CNRS)
KVI :	Kernfysich Versneller Instituut
LEP :	Large Electron-Positron collider (CERN)
LHC :	Large Hadron Collider (CERN)
MAMI :	Mainzer Mikrotron
NUPECC :	Nuclear Physics European Collaboration Committee
PIAFE :	Production et Accélération de Faisceaux Exotiques
RHIC :	Relativistic Heavy Ion Collider
SLAC :	Stanford Linear Accelerator Center (Stanford, Etats-Unis)
SPIRAL :	Système Post-accélérateur d'Ions Radioactifs en Ligne.
TESLA	TeV Energy Superconducting Linear Accelerator
TJNAF	Thomas Jefferson National Accelerator Facility.
Départements du CNRS cités :	
PNC :	Physique Nucléaire et Corpusculaire
SDU :	Sciences de l'Univers
SPI :	Sciences Pour l'Ingénieur
SPM :	Sciences Physiques et Mathématiques



INSTITUT NATIONAL  
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE  
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Directeur de la publication : Claude Détraz  
Rédaction : Geneviève Edelheit  
Mise en page : Catherine Prioul  
Maquette : Page B  
Flashage et impression : Electrogeloz  
3, rue Michel-Ange - 75794 Paris Cedex 16  
Tél. 01 44.96.47.60 Fax. 01 44.96.50.04  
N° ISSN - 1252 - 2015

