

0.1 Introduction

L'IN2P3 du CNRS et l'Irfu du CEA ont organisé conjointement des journées de prospective en 2012, aboutissement d'une année de travail préparatoire, au sein de groupes thématiques. L'objectif étant de construire une feuille de route pour la physique subatomique dans les 10 ans à venir, le présent rapport est une mise à jour des travaux qui ont mobilisé l'ensemble de la communauté et qui tient compte des résultats importants obtenus depuis, comme la découverte du boson de Higgs ou la mesure du fond diffus cosmologique par le satellite Planck, pour ne donner que 2 exemples parmi les plus spectaculaires.

Le rapport égrenne les différentes thématiques dans lesquelles l'IN2P3 joue un rôle actif et pour lesquelles un état des lieux est dessiné puis un futur possible est esquissé. Nous avons essayé de donner une certaine cohérence à l'ensemble, mais l'hétérogénéité de son élaboration est encore perceptible.

0.2 Modèle Standard et au delà

La découverte en 2012 du boson de Higgs par les expériences ATLAS et CMS, auprès du LHC du Cern, marque une étape essentielle pour la discipline. Tout d'abord sur le plan intellectuel, puisque la théorie de Brout-Englert et Higgs est confirmée presque 50 ans après son énoncé. Selon cette théorie, les masses (inertielles) de toutes les particules sont vues dans le cadre de la brisure de la symétrie électrofaible, et proviennent de leur interaction avec le vide quantique, vide pourvu d'une structure tout à fait singulière, grâce au célèbre potentiel en "sombbrero mexicain". Ce mécanisme prédisait l'existence d'une particule tout aussi singulière: un boson dénommé par la suite "de Higgs". Les données accumulées précédemment au LEP et au Tevatron avaient permis, dans le cadre du Modèle Standard (MS), une détermination d'un intervalle possible pour la masse du boson de Higgs, de 114 GeV (limite stricte) à 160 GeV (à 95% de confiance). La découverte du boson de Higgs à une masse de 125,5 GeV est la confirmation de cette théorie et de la cohérence du MS. Bien que visée et très annoncée par avance, il ne faut pas en minimiser la portée. Le mécanisme de BEH est d'une portée essentielle pour notre compréhension du monde et sa signification recèle encore beaucoup de mystères; d'ailleurs d'autres mécanismes "sans Higgs" avaient encore été évoqués récemment. Sur le plan expérimental, la découverte marque à nouveau le succès d'une entreprise collaborative internationale (mondiale), de longue haleine, et d'un niveau technologique inégalé.

La découverte du boson de Higgs à elle seule ne résout pas tous les problèmes du MS (abondance des paramètres libres, 3 familles, masses des fermions et angles de mélange, hiérarchie, etc.) mais elle redéfinit les réflexions prospectives tant sur le plan théorique qu'expérimental. Cette valeur a deux impacts importants sur le plan théorique. Pour des raisons bien connues (hiérarchie, particule de matière noire), les théories supersymétriques sont parmi les meilleures candidates pour une extension au-delà du MS. Dans sa réalisation la plus simple (MSSM), la supersymétrie contient un boson de Higgs scalaire neutre d'une masse inférieure à 120-135 GeV. La valeur de 125,5 est donc juste à la limite: elle n'invalide pas le MSSM, mais elle en contraint fortement les paramètres. L'analyse est encore en cours, mais elle tend à favoriser des valeurs généralement élevées pour les masses des particules supersymétriques (squarks légers, gluinos), L'autre conséquence importante de cette valeur de 125,5 GeV concerne le calcul de la stabilité du vide du MS. Selon les calculs les plus récents, le MS se situe très précisément sur la frontière entre un vide (état fondamental) instable et un vide stable. Cette propriété peut aussi être reliée au fait que l'extrapolation des couplages à très haute énergie montre un potentiel du vide plat à l'échelle de Planck, reliant ainsi étrangement l'échelle électrofaible et la constante de gravitation. On peut y voir une coïncidence numérique, ou une relation fondamentale, mais cela renforce le statut de l'échelle électrofaible comme échelle fondamentale, voire centrale, de l'univers. A ce titre, l'exploration exhaustive des paramètres électrofaibles avec la meilleure précision possible (en particulier pour les couplages du Higgs et la masse du top) est une priorité.

Sur le plan expérimental, le futur immédiat est l'exploitation du LHC à son énergie nominale (13-14 TeV) de 2015 à 2017, avec une luminosité intégrée prévue de 75-100 fb^{-1} . Les résultats en

sont très attendus, puisqu'ils joueront un rôle déterminant pour les décisions sur de possibles futures machines. La période suivante (2019-2021) met en oeuvre des améliorations significatives du LHC et des expériences, pour permettre d'atteindre une luminosité intégrée de 300 fb^{-1} . Ce programme, dit "Phase I", est approuvé par le Cern et la communauté internationale et les groupes français y sont largement engagés. Il est essentiel que les financements et les recrutements soient suffisants pour la construction et l'exploitation futures des expériences.

La phase suivante, à partir de 2022, prévoit des améliorations très importantes du LHC pour atteindre la luminosité ultime, et donc des changements majeurs dans les expériences. Cette phase, "HL-LHC", qui doit durer environ jusqu'en 2030, constituera l'aboutissement de l'exploitation du LHC. Les performances attendues sont encore en cours d'étude, mais les principaux traits en sont connus. Pour les recherches de nouvelles particules, une amélioration de 20 à 30% de la gamme de masse accessible sera possible. Surtout, la luminosité intégrée très élevée (3000 fb^{-1}) permettra l'observation de modes rares de désintégration du Higgs ($\mu\mu, Z\gamma, \dots$) et la détermination de nombreux de ses couplages, certains avec une très bonne précision (γ, W, Z à quelques %), d'autres une bonne précision (τ, b, t, μ de 5 à 10%), d'autres enfin justes visibles ($H \rightarrow HH$). La participation des équipes du CEA et du CNRS à la conception et la construction des détecteurs pour cette phase est en cours de définition, et doit être soutenue. Malgré l'attrait évident que représente l'analyse des données actuelles et la préparation de la prochaine période, une contribution française à la définition plus précise du programme de HL-LHC est vivement souhaitée.

La masse du boson de Higgs standard étant maintenant connue, la période actuelle est le moment d'une intense réflexion sur le futur de la discipline, et en particulier sur le ou les futurs collisionneurs de haute énergie. Les études de précision privilégient les collisionneurs e^+e^- , alors que l'exploration exhaustive du MS privilégie des collisionneurs pp à très haute énergie. Les possibilités étudiées dans le monde sont (sans ordre de priorité ni de combinaison):

- Un collisionneur linéaire électrons-positrons, d'énergie nominale dans le centre de masse de 500 GeV (projet "ILC"). Dans un premier temps 250 GeV permettant la production du Higgs MS et la détermination de ses couplages avec une très bonne précision (ordre du %), puis 350 GeV qui permet la production de paires top-antitop ($t\bar{t}$) et la mesure de la masse du top avec une précision de ~ 100 MeV. Enfin une énergie plus élevée comme 500 GeV permet de tester la sensibilité à une nouvelle physique dans un domaine plus étendu. Les technologies nécessaires, très étudiées dans les dernières années, sont bien développées sinon totalement finalisées. Les physiciens japonais ont manifesté la volonté d'accueillir cette machine sur leur sol.
- Un collisionneur linéaire e^+e^- de haute énergie ("CLIC", 3 à 5 TeV). Cette machine aurait les possibilités d'un ILC, et une capacité d'exploration directe dans un domaine multi-TeV. Les technologies nécessaires ne sont pas encore à maturité.
- Un collisionneur circulaire e^+e^- de taille juste suffisante pour 250 GeV d'énergie (40 à 50 km). Une telle "Higgs factory" permettrait la production abondante du Higgs et une excellente précision sur les couplages (ordre de 0,1 à 1 %, dominée par l'erreur sur la prédiction théorique). La Chine a manifesté son intérêt sur ce type de machine.
- Un collisionneur circulaire e^+e^- de taille suffisante pour 350 GeV d'énergie (50 à 80 km) permettant la production du Higgs SM et de $t\bar{t}$ (précision de 0,1 à 1 % sur les couplages du Higgs et masse du top à ~ 100 MeV). Cette machine est étudiée sous l'appellation "TLEP". Elle aurait aussi la possibilité de fonctionner à 91 GeV (masse du Z), en particulier avec faisceaux polarisés. Des physiciens européens soutiennent cette option, et souhaitent l'intégrer dans le programme du Cern.
- Un collisionneur circulaire proton-proton de 80 à 100 km, d'énergie 40 à 100 TeV suivant la technologie utilisée pour les aimants. La physique visée en est l'exploration exhaustive du MS à l'échelle électrofaible (en particulier la diffusion WW) et la recherche de physique nouvelle au-delà du MS, avec une gamme en énergie accessible 3 à 8 fois plus étendue qu'à LHC. Le Cern a déclaré cette machine comme priorité pour son futur sous le sigle VHE-LHC.

Le coût de ces instruments étant élevé, il n'y aura qu'une ou au plus deux machines mondiales. Comme on le voit, différentes stratégies sont possibles à partir de ces options. Par exemple ILC + CLIC sur le même site, ou TLEP + VHE-LHC (au Cern ou ailleurs), ou ILC au Japon et VHE-LHC ailleurs, etc.

Tous s'accordent sur le fait que les résultats de LHC 13-14 TeV seront un ingrédient indispensable à la prise de décisions vers 2018. Il est donc essentiel que les équipes de l'IRFU et de l'IN2P3 soient soutenues vigoureusement pour conserver leur rôle de premier plan dans l'analyse de données à LHC, et la préparation des améliorations des expériences. La participation active aux analyses prospectives, pour les collisionneurs e^+e^- comme pour le HL-LHC, doit être encouragée et favorisée. La communauté française doit s'organiser pour être à même, vers 2018, de définir sa position et de tenir une place attendue dans les prises de décisions internationales.

0.3 Violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes

Au cours de la décennie passée, les expériences BABAR et Belle, installées auprès des usines à mésons B, ont fourni une quantité impressionnante d'informations sur la physique des saveurs dans le domaine des quarks. Dans la limite des incertitudes théoriques et expérimentales, cet ensemble de mesures dessine une image remarquablement cohérente de la violation de la symétrie CP, en accord avec les mesures effectuées dans les secteurs des quarks légers, notamment le quark étrange. Le mécanisme de Kobayashi-Maskawa incorporé dans le Modèle Standard a ainsi été validé avec une grande précision. La physique des saveurs connaît actuellement un changement de paradigme. Si elle a longtemps été perçue comme un outil de précision pour valider le Modèle Standard, elle est de plus en plus comprise comme un ensemble de contraintes extrêmement fortes sur ses extensions potentielles. En effet, les processus qui changent la saveur sont sensibles à des contributions de haute énergie par l'intermédiaire de diagrammes mettant en jeu des particules virtuelles. Leurs mesures permettent d'accéder à l'échelle de masse des nouvelles particules et à leurs couplages. Dans le passé, les mesures de précision, en particulier dans le domaine des saveurs, ont permis d'estimer les masses des quarks charmé, beauté et top avant leur découverte directe. Aujourd'hui, les contraintes émanant des transitions $K^0 - \bar{K}^0$ ou des transitions radiatives $b \rightarrow s\gamma$ sont si fortes qu'elles impliquent que les nouvelles particules sont soit très massives (deux à trois ordres de grandeur au dessus du TeV), soit qu'elles se couplent très faiblement aux particules du Modèle Standard. Les études de la violation de la symétrie CP et des désintégrations rares dans le secteur de la beauté et du charme sont des outils privilégiés pour mettre en évidence des phénomènes au-delà du Modèle Standard et du principe de violation minimale de la saveur.

La recherche indirecte de la nouvelle physique en utilisant des transitions entre saveurs est organisée autour de quelques projets au niveau mondial. On citera notamment KOTO et NA62 pour la mesure du rapport de branchement $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ et $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, le projet Belle2 et LHCb pour l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans le système des mésons beaux. Par ailleurs des expériences dédiées sont en préparation pour mesurer plus précisément le moment dipolaire électrique du neutron, étudier l'atome d'antihydrogène, pour déterminer la constante de gravitation des antiparticules ou bien encore pour étudier la violation de la saveur dans les transitions leptoniques comme l'expérience MEG le fait actuellement, ou comme la prochaine génération d'expériences (Mu2E) le fera.

Sur le plan expérimental, le panorama des expériences a évolué ces dernières années, ce qui a entraîné des modifications dans la répartition de la communauté française. L'expérience NA48 s'est achevée, et avec elle une étude expérimentale approfondie de la violation de CP et de certaines désintégrations très rares dans le secteur des kaons. La fin de la prise des données auprès de BABAR a aussi occasionné des changements dans les thématiques de recherche. Une partie des physiciens de BABAR poursuit les mêmes thématiques scientifiques via l'expérience LHCb, une autre partie s'est tournée vers d'autres expériences auprès du LHC, des expériences de physique du neutrino ou de cosmologie. En France, l'avenir de la thématique violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes s'organise autour de quatre projets : l'upgrade de LHCb, nEDM, GBAR et AEGIS. LHCb est un

projet de grande taille qui couvre un large domaine scientifique allant de la violation de CP dans les mésons beaux et charmés à la recherche de particules exotiques et de violation du nombre leptonique. Ce projet présente un potentiel unique notamment à travers la très grande statistique de mésons Bs et l'accès à des désintégrations exclusives extrêmement rares, il est de plus bien enraciné dans la communauté et les équipes françaises y sont très visibles. L'upgrade de LHCb prend encore plus d'importance pour notre communauté, depuis la décision du gouvernement italien de ne pas financer le projet d'usine à B, SuperB, qui avait mobilisé plusieurs équipes françaises. Les trois autres projets (nEDM, GBAR et AEGIS) sont des expériences dédiées, de petite tailles, très complémentaires dans cette recherche de physique au delà du Modèle Standard, et dont le caractère pluridisciplinaire soit être souligné.

0.4 Neutrinos

La physique des neutrinos a connu deux décennies riches en découvertes majeures. Un ensemble cohérent de résultats expérimentaux a permis, à travers les oscillations des neutrinos, de résoudre l'énigme des neutrinos solaires, de comprendre le déficit des neutrinos atmosphériques, et plus récemment de mesurer le troisième angle de mélange θ_{13} . Cette preuve que les neutrinos oscillent et qu'ils ont donc une masse est un premier élément très important qui montre que le Modèle Standard minimal est incomplet. Néanmoins, des questions fondamentales restent ouvertes dans ce domaine: la nature même du neutrino – Dirac ou Majorana –, le type de hiérarchie des masses, la possibilité d'une violation de la symétrie CP dans le secteur leptonique.

Quatre axes prioritaires d'investigation se dégagent pour la prochaine décennie, axes dans lesquels la communauté française de physique des neutrinos devrait s'investir et ainsi poursuivre son implication majeure dans cette thématique:

L'exploration de la matrice de mélange PMNS

Au delà de la découverte d'un angle θ_{13} non nul, à laquelle ont participé les expériences T2K et Double Chooz, des mesures de précision combinant les approches complémentaires des neutrinos solaires, atmosphériques, de réacteurs nucléaires et d'accélérateurs vont permettre d'obtenir une image globale et cohérente des oscillations de neutrinos. L'augmentation de la luminosité à JPARC pour T2K et la mise en route du deuxième détecteur pour Double Chooz en seront des étapes importantes pour les 3 ans à venir.

L'étude des anomalies

Une série d'anomalies a été mise en évidence dans les études expérimentales des neutrinos. Les plus connues sont liées à l'expérience LSND, aux mesures de calibration de GALLEX et SAGE avec une source intense de neutrinos, et plus récemment à l'anomalie des mesures de flux de neutrinos avec des réacteurs. L'ensemble de ces anomalies ne se prête pas facilement à une interprétation globale. Néanmoins, certaines d'entre elles pourraient indiquer l'existence de neutrinos stériles avec une masse de l'ordre de l'eV. Plusieurs projets s'élaborent à court terme (2-3 ans) pour explorer cette possibilité qui se manifesterait par des oscillations à très courte distance: soit auprès d'un réacteur nucléaire (STEREO à l'ILL ou SOLiD au SCK-CEN de Mol) soit à l'aide de sources radioactives très intenses déployées dans des détecteurs existants (comme Borexino ou KamLAND).

Les expériences à longue ligne de base

La détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos et l'étude de la phase de violation de CP passe par l'observation comparée de l'apparition de ν_e dans un faisceau de ν_μ et de l'apparition de $\bar{\nu}_e$ dans un faisceau de $\bar{\nu}_\mu$. Il faudra alors disposer d'un super-faisceau avec une puissance du MW et d'un détecteur lointain d'une masse de l'ordre de la Mégatonne. Des projets s'élaborent en ce sens aux USA (LBNE), au Japon (Hyper-Kamiokande) et en Europe (LBNO) pour la prochaine décennie, mais tous nécessitent d'intenses R&D, en particulier sur des technologies jamais expérimentées à ces échelles (Argon Liquide). Une stratégie européenne et française privilégie une approche par étapes qui, après une étude approfondie de prototypes (~ 3 ans), verrait la construction du détecteur lointain augmenter de masse par paliers successifs, avec à chaque étape des objectifs de physique très clairs. Deux projets à plus courte échéance se focalisent sur la hiérarchie de masse, en utilisant les neutrinos

de réacteurs (JUNO en Chine) ou les neutrinos atmosphériques (ORCA en Méditerranée).

La recherche de désintégrations double beta sans neutrino

La recherche de désintégrations double beta sans neutrino est la seule à pouvoir nous renseigner sur la nature du neutrino : Dirac ou Majorana. Deux approches de détection ont été retenues par les laboratoires français. D'une part l'approche de tracement et calorimétrie, dans la continuité de l'expérience NEMO-III. Cette technologie est la seule qui permet d'accéder à tous les paramètres de l'état final à deux électrons. Le projet SuperNEMO se propose d'atteindre une sensibilité sur le neutrino de Majorana de l'ordre de 0,05 eV en 2016-2018. D'autre part, un développement extrêmement prometteur, basé sur la technique des bolomètres scintillants. utilisant des cristaux de ZnMoO4 pour des recherches avec l'isotope prometteur ^{100}Mo . Comme pour la technique à tracement et calorimétrie, plusieurs isotopes pourraient en principe être investigués, en donnant une redondance indispensable pour la découverte de la décroissance double beta.

0.5 Univers à haute énergie, ondes gravitationnelles, multi-messagers

Il y a cinquante ans la naissance de l'astronomie X puis de l'astronomie gamma a permis de révéler tout une catégorie d'astres animés de phénomènes extrêmement violents. Ces observations ont conduit à s'interroger sur leur dynamique, les mécanismes d'accélération des électrons et des noyaux, leur efficacité relative, et la propagation de ces particules dans la Galaxie et l'Univers en général.

La science des phénomènes à haute énergie se nourrit d'observations à différentes longueurs d'onde ou à l'aide de différents messagers et elle se construit au travers d'une liste de projets complémentaires.

L'astronomie gamma dans laquelle la France a joué et joue un rôle majeur, produit avec Fermi et HESS une remarquable moisson de résultats scientifiques. L'exploitation de ces observatoires va se poursuivre dans les années qui viennent, en parallèle avec la construction du projet mondial CTA qui pourrait obtenir un catalogue d'un millier de sources avant la fin de la décennie: ses données aux énergies les plus basses recouvriront celles de Fermi, et pourraient contribuer à différencier scénarios hadroniques et électromagnétiques en particulier dans les restes de supernovae. La mise en place d'une organisation cohérente du projet et d'un fonctionnement en mode observatoire restent des défis majeurs à relever dans les quelques années qui viennent.

Ni Fermi, ni CTA ne peuvent remplacer un télescope grand champ dédié à la détection des sursauts gamma. Prenant la suite de Swift, le satellite SVOM devait être lancé en 2017 pour observer des sursauts gamma à grand décalage spectral, avec un taux comparable à Swift. Ce projet franco-chinois a connu des aléas de programmation et sa poursuite n'est pas totalement assurée. Il est donc crucial que la communauté étudie une solution alternative afin de s'assurer qu'un télescope GRB soit en prise de données à la fin de cette décennie.

Dans le domaine des rayons cosmiques, la référence reste l'Observatoire Pierre Auger. La corrélation d'événements de plus de $5 \cdot 10^{19}$ eV avec la distribution de matière à 100 Mpc devra être confirmée par l'accumulation de données. Mais pour aller plus loin il sera nécessaire de gagner un ordre de grandeur sur le taux d'événement. La communauté explore la possibilité d'inclure la détection radio des gerbes. En parallèle, des efforts sont consentis pour augmenter les capacités d'Auger à plus basse énergie, dans la zone de la cheville. Ces programmes de R&D permettront de proposer dans les 5 ans une nouvelle génération de détecteur pour la décennie suivante. Alternativement des participations sont engagées dans les projets complémentaires LHAASO, à plus basse énergie, et JEM-EUSO, qui sera installé sur la station spatiale internationale.

En astronomie neutrino ANTARES ayant atteint une phase de production scientifique, la communauté européenne s'est rassemblée dans le consortium KM3NeT, afin de déployer un télescope à neutrinos de plusieurs km^3 . L'observation par IceCube des premiers neutrinos de très haute énergie stimule le projet. Une phase d'ingénierie a démarré qui sera évaluée en 2015. Le télescope KM3NeT est optimisé pour détecter les neutrinos cosmiques des sources galactiques observées par HESS et

plus tard par CTA, et a une couverture complémentaire à IceCube, en prise de donnée depuis 2008. À plus court terme un projet de réseau plus dense (ORCA) pourrait se focaliser sur les neutrinos atmosphériques pour déterminer la hiérarchie de masse des neutrinos.

Enfin avant d'être de nouveaux messagers pour l'astronomie, les ondes gravitationnelles doivent encore être observées directement. Les détecteurs Virgo et Ligo ont tracé la route pour Advanced Virgo et Advanced Ligo qui devraient fonctionner à partir de 2015 avec une sensibilité accrue d'un facteur 10, et obtenir les premières données exploitables à partir de 2016. La détection ne serait-ce que d'un seul signal serait un événement scientifique majeur qui ouvrirait la voie vers la génération suivante, l'interféromètre souterrain Einstein Telescope. En parallèle, l'interférométrie spatiale permettrait d'augmenter le champ des sources accessibles: elle sera mise à l'épreuve en 2016 lors de la mission LISA PathFinder, avant le lancement d'eLISA comme possible mission L3 de l'ESA (vers 2035!).

0.6 Matière noire, énergie noire, cosmologie

La cosmologie est l'étude des propriétés globales de l'Univers. Elle inclut essentiellement les champs de recherche suivants:

- La mesure des propriétés moyennées de l'Univers observable: taux d'expansion (H_0) et densités moyennes de ses principaux composants (matière noire, énergie noire, baryons, photons et neutrinos).
- L'étude des inhomogénéités à grande échelle et des objets gravitationnellement liés (galaxies et amas de galaxies).
- La détection de la matière noire.
- L'étude des modèles théoriques d'Univers primordial qui peuvent expliquer la composition et la structure de l'Univers observable.
- L'étude de la formation et des caractéristiques des tout premiers objets compacts (étoiles et quasars).

Les résultats de la cosmologie observationnelle sont en général bien décrits par le modèle Λ CDM, maintenant standard, dans lequel la densité moyenne correspond à 1% près à la densité critique, $3H_0^2/8\pi G$, et où les paramètres standards valent : $\Omega_\Lambda = 0.692 \pm 0.010$, $\sigma_8 = 0.826 \pm 0.012$, $\Omega_m = 0.308 \pm 0.010$, $h = 0.678 \pm 0.008$ (Planck + WMAP Polarisation + ACT/SPT + BAO). L'énergie noire est compatible avec une énergie du vide indépendante du temps, ou de manière équivalente avec une constante cosmologique, et est responsable de l'accélération actuelle de l'expansion de l'Univers. La matière noire froide domine les objets gravitationnellement liés que sont les galaxies et amas de galaxies. Ces conclusions sont basées sur l'interprétation de données provenant:

- des anisotropies du fond diffus micro-onde cosmique (CMB)
- des distances de luminosité des supernovae de type Ia (SNIa)
- du spectre de puissance des inhomogénéités de densité (grandes structures - LSS) et en particulier de l'empreinte sur celui-ci des oscillations acoustiques baryoniques (BAO)
- des déformations des images de galaxies lointaines par effet de lentille gravitationnelle
- du nombre et de la composition des amas de galaxies

Les chercheurs français sont impliqués dans tous les domaines de la cosmologie qui ont mené à la construction de Λ CDM. En cosmologie observationnelle, l'IN2P3 et l'IRFU sont en particulier impliqués dans Planck (anisotropies du CMB), SNLS (SuperNova Legacy Survey) et BOSS (Baryon acoustic Oscillation Spectroscopic Survey). Pour la recherche de matière noire froide non baryonique, les groupes français jouent un rôle majeur dans l'expérience de recherche de WIMPs par détection directe EDELWEISS et un rôle plus modeste dans XENON. La recherche indirecte de matière noire se fait par la recherche de photons et neutrinos provenant de l'annihilation de WIMPs: les collaborations HESS (astronomie gamma) et ANTARES (astronomie neutrino) sont très active sur ce sujet et leur successeurs (CTA et KM3Net) poursuivront cette quête.

Les dix dernières années ont vu l'émergence du modèle Λ CDM et la mesure de ses paramètres avec une précision meilleure que 10%. Le but des dix prochaines années sera d'améliorer la précision sur ces paramètres et, plus important, de rechercher des désaccords avec Λ CDM indiquant une nouvelle physique. Un but important dans ce contexte est d'améliorer les limites sur la variation temporelle de

la densité d'énergie noire (paramètres cosmologiques w et w_a). Il est aussi fondamental de placer des contraintes sur des déviations de la théorie gravitationnelle standard (la relativité générale) à grande échelle en mesurant précisément l'histoire de l'expansion de l'Univers et la formation simultanée des grandes structures. Ce sont les objectifs principaux du Large Synoptic Survey Telescope (LSST) et de la mission spatiale EUCLID, deux grands projets avec une forte composante française, qui devraient commencer à produire des données au début de la prochaine décennie. Cette double présence devrait donner aux groupes français un avantage certain pour une exploitation combinée de leurs résultats. D'ici là, une participation à des expériences intermédiaires comme eBOSS, DESI, DES ou Subaru, est en projet pour leur potentialités scientifiques et comme entraînement pour LSST et EUCLID.

Avec la mesure finale des anisotropies de température du CMB par Planck, les études sont maintenant centrées sur sa polarisation. La recherche des "modes B" est particulièrement importante car elle fournirait une indication directe en faveur de l'inflation. Les premières indications de BICEP2 demandent d'autres mesures: elles viendront de Planck, ACTpol, PolarBear et Keck Array. QUBIC, un observatoire interférométrique du CMB qui doit être construit en Antarctique, arrivera sans doute trop tard.

La détection directe ou indirecte de matière noire sous forme de WIMPs est une piste expérimentale cruciale pour tenter de comprendre la physique qui se cache derrière la paramétrisation Λ CDM. Des expériences de détection directe à l'échelle de la tonne deviennent réalisables, comme EURECA, la suite prévue d'EDLWEISS, et les suites de XENON. Pour la détection indirecte via l'observation de produits d'annihilation des WIMPs, CTA devrait améliorer les résultats déjà obtenus par HESS.

0.7 Plasma de Quarks et de Gluons

Selon la théorie de l'interaction forte, la Chromodynamique Quantique (QCD), du Modèle Standard de la physique des particules, la matière nucléaire subit à très haute température ou densité d'énergie une transition de phase de la matière ordinaire vers un nouvel état de la matière appelé le plasma de quarks et de gluons. Parallèlement, il est déduit du modèle cosmologique standard que les conditions de température requises pour cette transition de phase sont satisfaites pendant les premières dizaines de microsecondes du Big Bang. Recréer de la matière primordiale et étudier les propriétés fondamentales du plasma de quarks et de gluons ou, autrement dit, étudier comment l'interaction forte organise les particules élémentaires de matière, ont motivé un programme de recherche exploitant les collisions entre ions-lourds accélérés à des énergies ultra-relativistes. Depuis le démarrage en 2010 du LHC, qui permet de créer de la matière à des températures les plus élevées jamais atteintes en laboratoire, le centre d'intérêt de ce programme s'est porté sur les résultats des expériences ALICE, ATLAS et CMS et pour une partie limitée de ce programme de l'expérience LHCb. Les laboratoires français contribuent principalement au programme ions-lourds de ALICE et plus modestement au programme ions-lourds de CMS après avoir été très fortement impliqués dans les programmes ions-lourds du SPS au CERN et du RHIC à Brookhaven. Les premiers résultats obtenus au LHC s'appuient sur les données enregistrées pour les collisions Pb-Pb (pour ALICE avec une luminosité intégrée de $0,1 \text{ nb}^{-1}$), les collisions p-Pb (avec pour ALICE 30 nb^{-1}), et les collisions pp à des énergies inférieures à l'énergie nominale du LHC. Ces résultats confirment les conclusions établies par le programme, toujours en cours, du RHIC et surtout les enrichissent avec de nouvelles observables qui sont grandement favorisées au LHC.

Ainsi, entre autres, après avoir établi que la température et la densité d'énergie atteintes dans les collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ sont bien supérieures aux valeurs critiques prédites par la théorie QCD, il a été démontré que de la matière est effectivement créée et que sa dynamique s'apparente à celle d'un liquide quasi parfait. Les premières mesures des propriétés de transport indiquent que la matière formée est transparente aux sondes électromagnétiques et faibles mais opaque aux sondes hadroniques les plus dures, traduisant une densité de charges de couleur élevée, et que les quarks lourds, charmés et beaux, sont thermalisés dans le milieu. Des indices d'un nouveau mode d'hadronisation des quarks charmés, par recombinaison des quarks présents dans le QGP, ont été observés et la dynamique de la phase hadronique de la collision est assez bien comprise. La surprise majeure est venue des résultats des

mesures pour les collisions p-Pb. En effet, pour les événements de multiplicité de hadrons dans l'état final élevée, un certain nombre d'observables présentent un comportement inattendu et étrangement similaire à celui observé pour les collisions Pb-Pb où un tel comportement est interprété comme étant dû à la formation du QGP.

Pour affiner les résultats décrits sommairement précédemment, améliorer l'ensemble statistique des observables et étendre les mesures à des observables plus différentielles, une nouvelle période de prise de données en ions-lourds a été programmée de 2015 à 2018 à quasi l'énergie nominale du LHC et avec des luminosités instantanées doublées. ALICE aura d'ici là complété la couverture de ses calorimètres électromagnétiques et du détecteur à rayonnement de transition (TRD) et aura adapté l'électronique de lecture des détecteurs centraux aux luminosités attendues. Ces améliorations permettront de multiplier par 10 la luminosité intégrée espérée. CMS de son côté aura équipé le calorimètre électromagnétique d'un nouveau déclenchement pour enrichir de façon conséquente l'échantillon de jets enregistré.

Actuellement en phase de R&D, un important programme d'amélioration de l'expérience ALICE a été approuvé en vue de multiplier par un facteur supplémentaire de 10 ou 100 la luminosité intégrée selon que l'observable est déclenchable ou non. Les laboratoires français sont impliqués dans plusieurs projets dont la réalisation d'un nouveau trajectographe interne à pixels monolithiques en technologie CMOS et l'amélioration du spectromètre à muons par l'adjonction d'un trajectographe à pixels CMOS et la refonte de l'électronique de lecture. L'ensemble des améliorations, associé à une luminosité de collisions Pb-Pb quadruplée, ouvrira la voie à une nouvelle phase, les mesures de précisions des propriétés fondamentales du QGP.

0.8 Physique Diffractive

La physique diffractive connaît un renouveau d'intérêt dans le domaine des hautes énergies au LHC. Elle permet de préciser les descriptions de la QCD perturbative et sa transition vers le régime non-perturbatif, avec par exemple l'étude de phénomènes de saturation des distributions de gluons à très haute énergie. À des énergies plus basses comme à JLab et à FAIR-PANDA, la connaissance de la structure en quarks et gluons du nucléon passe par la sonde électromagnétique, avec la détermination des facteurs de forme et des fonctions de structure en diffusion profondément inélastique.

L'introduction du concept de distributions de partons généralisées (GPD) a remis en perspective les analyses classiques. Cet élan va perdurer dans les prochaines années. Ces GPDs permettent d'associer à chaque parton portant une fraction de l'impulsion longitudinale du nucléon, une position dans le plan transverse à l'axe de la collision, ce qui conduit à une tomographie (ou femto-photographie) du nucléon. Les GPDs sont accessibles par l'étude des réactions exclusives dures, comme la leptoproduction exclusive de photons (DVCS) ou de mésons (DVMP), dans une cinématique vers l'avant. L'autre variable essentielle des GPDs est la skewness qui mesure la non-diagonalité des éléments de matrice hadroniques et qui est l'équivalent de la variable de Bjorken dans la diffusion inélastique inclusive. Les GPDs permettent en outre d'avoir accès au moment angulaire orbital des quarks et gluons. Les amplitudes de distribution de transition (TDAs) complètent l'arsenal des fonctions hadroniques définies dans le cadre de la factorisation colinéaire de la QCD. Elles sont accessibles d'une part en leptoproduction, mais dans une cinématique vers l'arrière, comme les GPDs mais aussi dans les réactions d'annihilation d'un antiproton sur un nucléon (à FAIR-PANDA) avec une sonde électromagnétique du genre temps. La communauté hadronique française, bien que de taille réduite par rapport aux autres pays d'Europe comme l'Allemagne ou l'Italie, a été et reste au premier plan parmi les acteurs de cette nouvelle physique hadronique. En ce qui concerne l'IN2P3, son engagement et ses succès à JLab dans les dix dernières années sont internationalement reconnus. Le potentiel des équipes françaises engagées dans JLab 12 GeV, dont l'exploitation commence en 2014 et durera environ 10 ans, a déjà été renforcé par le soutien à la construction du CND (Central Neutron Detector) pour le spectromètre CLAS12.

À l'horizon 2018, le projet PANDA, installé à FAIR, devrait focaliser une partie importante de la communauté européenne de physique hadronique. Les physiciens de l'IN2P3 impliqués sur ce projet, ont pris le leadership dans l'étude de la structure électromagnétique du proton et celle des

processus exclusifs durs. Les études de faisabilité montrent qu'on pourra accéder avec une grande précision à des domaines cinématiques peu ou totalement inexplorés. L'extraction des facteurs de forme électromagnétique et des TDAs dans la région temps est exemplaire de la complémentarité avec les programmes de JLab et COMPASS. Le programme expérimental autour du projet PANDA mobilise environ un quart de la communauté française.

Mentionnons qu'un nouveau domaine cinématique de la QCD est accessible au LHC : la physique diffractive en p-p ou A-A où les hadrons restent intacts après une interaction dure. La construction de détecteurs pour mesurer les protons très peu déviés par rapport à l'axe des faisceaux est indispensable pour cette physique.

Depuis 2007, la communauté de physique hadronique française à la fois théorique et expérimentale s'est regroupée dans le Groupement de Recherche Nucléon élargi aujourd'hui au PH-QCD. Ce GDR a permis de consolider les collaborations déjà en place et est devenu le cadre naturel pour l'organisation des workshops et des écoles dans ces disciplines. La prospective à long terme (EIC, AFTER) y est également discutée. Pour assurer la présence et le rôle moteur des groupes français dans ce domaine de physique en pleine expansion, une politique d'embauche énergique doit être menée en France. Malgré leur dynamisme et leur visibilité, les groupes français sont fragiles, parfois à la limite de la sous-criticité, et doivent se surpasser pour assurer leurs responsabilités et engagements présents et futurs. A l'IN2P3, la priorité devra porter sur les activités expérimentales auprès du JLab et de PANDA. Enfin, le soutien des théoriciens est primordial pour le développement de ces programmes de physique.

0.9 Structure et dynamique nucléaire

Au cours des dernières années, de considérables progrès ont été réalisés dans la compréhension des lois fondamentales qui régissent la nature par l'étude du noyau atomique placé dans des conditions extrêmes. En physique nucléaire, ce principe heuristique est appliqué en créant, dans le laboratoire et sous conditions contrôlées, des noyaux atomiques qui n'existent à l'état naturel qu'à l'échelle de l'infiniment grand (10^{25} m) comme les étoiles et les galaxies, établissant par là même leur connexion avec la réalité sous-jacente de l'infiniment petit (10^{-15} m). Le noyau atomique constitue un micro-laboratoire unique pour sonder les limitations du Modèle Standard, et l'existence des éléments dans l'univers. Les études fondamentales sur l'origine, l'évolution et la structure de l'interaction forte sont un moteur indéniable des avancées en physique nucléaire. Le défi de cette mission relève d'une stratégie équilibrée, nécessitant trois niveaux d'approche, intimement liés: la recherche des limites d'existence des noyaux aux confins de leur composition en masse, en charge et en isospin, afin de comprendre l'interaction qui lie les noyaux stables présents sur terre et les noyaux rares présents dans le cosmos.

L'investissement de la communauté française, avec ses installations hautement compétitives de faisceaux stables et faisceaux radioactifs de première génération, et avec son potentiel théorique a permis de formidables découvertes, allant des nouvelles formes de radioactivité aux propriétés et comportements exotiques de la matière à l'échelle du femtomètre. Ces progrès n'ont pu se faire sans la mise à disposition des développements les plus poussés aussi bien au niveau des accélérateurs d'ions que des systèmes de détection. L'avenir de cette thématique gravite autour de l'exploitation de SPIRAL2 avec des faisceaux radioactifs (principalement de fragments de fission) d'intensité jusqu'ici inégalée, et avec des faisceaux stables extrêmement intenses. L'impact de SPIRAL2 sera considérable, faisant émerger de nouveaux domaines en sciences de la matière, sans compter les retombées en termes d'applications et qui bénéficieront à la société: en particulier ce projet fournira des données nucléaires d'importance cruciale pour les centrales nucléaires de nouvelle génération et pour la médecine nucléaire. En parallèle, un arsenal de détecteurs basés sur les technologies les plus pointues est en train d'être construit, adapté aux spécificités des nouveaux faisceaux et capable de sonder des événements de plus en plus rares. Une retombée naturelle du dynamisme suscité par SPIRAL2 sera l'arrivée de nombreux étudiants, éléments nécessaires pour le développement de la recherche et ses applications. Ceci suppose par contre un soutien constant en terme des ressources humaines dans la discipline.

La situation actuelle comporte le risque potentiel de ne pas disposer des moyens suffisants pour, d'une part achever la construction de SPIRAL2 et de ses équipements associés, et d'autre part exploiter l'installation existante et maintenir la R&D nécessaire pour GANIL et ALTO. Ceci pourrait considérablement nuire à la discipline et à la compétitivité de la communauté dans ses domaines d'excellence. Il est donc prioritaire de soutenir la dynamique mise en place et l'achèvement complet du projet SPIRAL2 dans les meilleurs délais tout en maintenant la capacité d'exploitation du GANIL existant (avec SPIRAL1) ainsi que de ALTO à Orsay. Cette recommandation est d'ailleurs en accord avec le plan à long terme pour l'Europe de NUPECC, plaçant en première priorité la construction de SPIRAL2, de son infrastructure et instrumentation associées.

Pour atteindre les régions les plus éloignées de la stabilité, les faisceaux radioactifs de SPIRAL2 pourront être post-accélérés afin de subir une seconde fragmentation. Ceci représente pour la communauté française l'opportunité d'apporter son expertise en vue de la première et nécessaire étape pour le projet d'installation européenne de nouvelle génération EURISOL (recommandé pour la liste ESFRI par NUPECC).

0.10 Astrophysique nucléaire

A la frontière entre différentes disciplines, les travaux d'astrophysique nucléaire étudient les synthèses des éléments dans l'Univers, les profils des courbes de lumière des sursauts X, les explosions de supernovae, la formation et la structure interne des étoiles à neutrons, la production des rayons cosmiques dans la Voie lactée et leur rôle dans l'écosystème galactique, la variation des constantes de couplage des interactions fondamentales depuis le Big-Bang, le contexte de formation du système solaire... Ils demandent une bonne synergie entre les équipes nucléaires et astrophysiques et en particulier la possibilité de bourses de thèses transverses. Ils s'appuient sur des modélisations numériques très sophistiquées et sur nombre d'appareillages, spécifiques ou non à ces thématiques, essentiels à la visibilité de la communauté française.

Les mesures des abondances primordiales des éléments légers sont comparées à celles de la nucléosynthèse primordiale: leur très bon accord actuel – hormis pour le ${}^7\text{Li}$ où un facteur 3 de désaccord subsiste – permet de contraindre certaines extensions de la relativité générale ou de nouvelles théories incluant une variation des constantes fondamentales,

Parmi les taux de réactions nucléaires à mesurer dans l'avenir, il y a ceux qui concernent la combustion de l'hélium et les phases ultérieures d'évolution stellaire, en particulier les réactions ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$, ${}^{22}\text{Ne}(\alpha, n){}^{25}\text{Mg}$ et ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$. Des accélérateurs de faisceaux stables notamment de grande intensité (existants ou en construction : Tandem/Alto, Andromède, Luna-MV) devront être associés à une détection performante et à la fabrication de cibles très pures produites à partir de séparateur isotopique. Il y a également, pour interpréter les données d'astronomie γ , les réactions permettant de former/détruire des noyaux instables de durée de vie longue (${}^{26}\text{Al}$, ${}^{60}\text{Fe}$...). Il y a enfin les réactions les plus importantes pour la synthèse des noyaux les plus lourds, qui vont requerrir des faisceaux de neutrons et la production de cibles radioactives par l'installation CACAO.

Pour modéliser les scénarios astrophysiques (processus s, r, p...) et les sites du processus r, responsables de la synthèse des éléments au-delà du fer, l'étude de nouvelles réactions et de propriétés nucléaires de noyaux radioactifs (période, masse...) deviendra possible grâce aux nouveaux faisceaux de SPIRAL11, puis à l'arrivée de SPIRAL2 et de ses faisceaux radioactifs intenses (dans sa phase2) et d'ALTO. A plus long terme, la production de tels faisceaux ultra intenses (10^{10} pps) par EURISOL rendra accessible la région du pic de Gamow. Des études nucléaires sur l'appariement et l'équation d'état, permettront alors de contraindre le processus d'effondrement des étoiles massives, la formation des étoiles à neutrons et de mieux comprendre la structure interne et les processus de refroidissement de ces étoiles.

L'observation de raies γ nucléaires produites par collision des ions du rayonnement cosmique avec le gaz ambiant permettrait de préciser le flux et la composition des rayons cosmiques de basse énergie

(< 1 GeV par nucléon), vraisemblablement responsables d'une ionisation et d'un chauffage importants des nuages moléculaires. Des projets de R&D s'intéressent donc aux nouveaux détecteurs γ , susceptibles d'être embarqués dans un futur télescope pour succéder au satellite INTEGRAL. L'expérience AMS-02 ($E > 100 \text{ MeV}/n$), sur la station spatiale, collecte des données à très grande précision. Leur interprétation nécessite une description plus fine de réactions de spallation (e.g. LiBeB), et donc des expériences dédiées. Des études en astronomie X pourront aussi améliorer notre compréhension de l'accélération des rayons cosmiques, ainsi que des stades précoces (étoiles T Tauri) et ultimes (supernovae, naines blanches, étoiles à neutrons...) de l'évolution stellaire.

L'analyse isotopique de matériaux extraterrestres (météorites et micrométéorites) apporte des informations capitales sur la nucléosynthèse stellaire (grains présolaires) et précise le contexte astrophysique de naissance du Soleil. La collecte et les analyses de micrométéorites donnent à l'IN2P3 la collection CONCORDIA, unique au monde, comprenant des échantillons cométaires dans un état de conservation inégalé. Elle devra s'enrichir pour demeurer au tout premier rang international.

Enfin il faut rappeler l'apport essentiel de la physique nucléaire théorique qui peut guider les études de physique expérimentale, en déterminant les meilleures conditions de mesure. Nombre de données pour les codes astrophysiques impossibles à mesurer sont fournies par les modèles nucléaires : prédictions de masses ou de sections efficaces pour les milieux dilués ; états de la matière non reproductibles en laboratoire dans les milieux denses (naines blanches, étoiles à neutrons ou supernovae). La description de la matière dans les conditions extrêmes de densité, de température et d'asymétrie d'isospin nécessite le développement de modèles sophistiqués, liens entre les expériences en laboratoire et les systèmes astrophysiques liés à des observations. La réduction de l'incertitude sur l'extrapolation des modèles nucléaires pour l'astrophysique est cruciale.

0.11 Physique et chimie pour l'énergie nucléaire

Les recherches en physique et chimie pour l'énergie nucléaire, menées ces dernières années par l'IN2P3 et l'Irfu, se sont déroulées en collaboration étroite avec les autres acteurs du domaine au niveau français (CEA/DEN, EDF, Areva), européen (projets PCRD) et mondial (Forum Génération IV). Ces développements concernent trois aspects : les études de systèmes et de scénarios, les données nucléaires et la physico-chimie.

Les études de systèmes et de scénarios, développées au CNRS et au CEA, sont basées sur la maîtrise de la physique des réacteurs. Elles permettent d'optimiser des cycles voire des filières, et de tester les sensibilités et les corrélations entre les différentes grandeurs physiques. Ces travaux trouvent leur prolongement dans des analyses multidisciplinaires sur les impacts économiques ou sociétaux des grands choix qui seront faits dans les années à venir.

La fiabilité des outils de simulation, et donc la pertinence des études réalisées, nécessite une maîtrise accrue de la neutronique et des données nucléaires. C'est un enjeu majeur de ces perspectives que de réduire les incertitudes associées à certaines données. Si pour le cycle et la filière actuels les données accumulées sur les actinides majeurs sont relativement bien maîtrisées, il n'en est pas de même pour le cycle alternatif Th-U, les combustibles enrichis en actinides mineurs et la filière rapide.

Un effort important doit aussi être poursuivi autour de la physico-chimie pour le nucléaire. Cette thématique commence à la mine, se poursuit au sein du réacteur avant une fin de cycle avec la séparation et le stockage des différents matériaux du cycle électronucléaire. A chacune de ces étapes, il faut suivre et contrôler les transferts à la géosphère et la biosphère afin de maîtriser les impacts environnementaux.

Pour le futur, plusieurs recommandations peuvent être dégagées:

- Il est essentiel de préserver l'expertise indépendante, scientifique et technologique, du CNRS et du CEA, afin de pérenniser sur le long terme les savoirs acquis et de pouvoir contribuer objectivement aux débats politiques.

- Compte tenu du caractère pluridisciplinaire des travaux sur les données nucléaires, les collaborations devraient s'étendre à d'autres thématiques, en particulier pour l'étude de la physique des réacteurs (thermo-hydraulique). Un rapprochement des groupes de recherche de radiochimie avec les partenaires du réseau Becquerel pourrait avoir un effet synergique concernant l'étude du transfert des isotopes radioactifs dans l'environnement. Il semble aussi nécessaire pour analyser ces données nucléaires, de disposer d'un fort soutien théorique en modélisation et en évaluation). De plus, pour augmenter la reconnaissance des travaux expérimentaux, le contrôle d'une chaîne complète d'évaluation serait un atout majeur pour l'inclusion des résultats de nos travaux dans les bibliothèques de référence (ENDF, Jeff).
- Lors des expériences, les cibles utilisées sont généralement radioactives. D'une part, il est impératif de disposer du savoir-faire et d'installations nécessaires à la fabrication de cibles spécifiques et à leur caractérisation. Le laboratoire Cacao (Chimie des actinides et cibles radioactives à Orsay), le laboratoire Pierre Süe de Saclay, la ligne Aramis du CSNSM et, à plus long terme, la construction d'un séparateur magnétique doivent être soutenus afin de répondre à cette demande. D'autre part, compte tenu de la réglementation actuelle pour la détention, la manipulation et l'évacuation des radio-isotopes, il est important de maintenir des infrastructures et des compétences nécessaires pour assurer la radioprotection, la gestion des radio-isotopes et la sûreté des expériences.
- L'accès aux sources de neutrons est critique pour un grand nombre des études de cette thématique, qui doit donc pouvoir compter sur les installations existantes en Europe (Gelina à Geel, n-tof au Cern, ILL) et futures (NFS à SPIRAL2, HIE à Isolde et FAIR à GSI).

0.12 Interface avec les sciences du vivant

L'IN2P3 a les capacités pour jouer un rôle majeur à l'interface entre la Physique, la Biologie et la Médecine. Ses atouts résident avant tout dans les compétences des laboratoires dans les domaines des accélérateurs, les interactions rayonnement-matière, l'instrumentation et l'électronique, et la force de leurs services techniques, qui sont autant d'éléments favorables au développement d'outils originaux et innovants pour les Sciences de la Vie. Les équipes de l'IN2P3 se sont structurées au niveau national afin d'améliorer la visibilité et la coordination de leurs activités, au sein du Groupement de Recherche "Modélisation et Instrumentation pour l'Imagerie Biomédicale" (GDR MI2B), qui regroupe une cinquantaine de physiciens répartis dans onze laboratoires. Ce GDR a été renouvelé fin 2011: il est dédié aux Instruments et Méthodes Nucléaires pour la lutte contre le Cancer, tout en étant ouvert à d'autres domaines des Sciences de la Vie et de la Santé. Il s'est également élargi à d'autres partenaires hors IN2P3. Les trois grands pôles principaux d'activités sont actuellement :

- **les outils et méthodes nucléaires pour la radiobiologie** : ces études permettent d'estimer le risque des rayonnements ionisants pour la santé, mais aussi d'améliorer les radiothérapies du cancer. L'IN2P3 y contribue en mettant au point des plateformes d'irradiation et en contribuant à l'élaboration de modèles multi-échelles de réponse cellulaire aux rayonnements ionisants.
- **les méthodes et instruments en imagerie biomédicale** : il s'agit d'élaborer des systèmes d'imagerie originaux, et de nouvelles méthodes pour le diagnostic et le suivi thérapeutique. L'activité s'étend du développement de détecteurs innovants pour l'imagerie préclinique ou clinique à l'élaboration de méthodes de reconstruction d'images ou d'exploitation des données.
- **les thérapies innovantes et imagerie associée** : les physiciens contribuent au développement de l'hadronthérapie et de la radiothérapie X, en développant des outils pour la planification des traitements (mesures et simulations), pour le contrôle faisceau et le contrôle qualité du traitement. Ils explorent aussi de nouvelles voies de production de radioéléments pour l'imagerie et la thérapie.

Les outils performants, tels que les plateformes de simulation comme GEANT4/GATE permettent le calcul de doses physiques et biologiques induites par les rayonnements ionisants ainsi que la modélisation des systèmes d'imagerie. L'utilisation des grilles de calcul est un atout dans ce domaine. Les expérimentations peuvent être réalisées auprès des plateformes d'irradiations actuelles ou en cours de développement (GANIL, AIFIRA, ARRONAX, Radiograaff, Pavirma, CYRCE) ainsi que des centres d'hadronthérapie (Orsay, Nice, et les futurs centres carbone ETOILE et ARCHADE).

En plus de la structuration des équipes par le GDR MI2B élargi, l'activité a été structurée par les projets Investissements d'Avenir : Infrastructures France Life Imaging et France Hadron, LabEx P2IO, PRIMES, IRON, Equipex RecHadron, ThomX, ArronaxPlus. Il est néanmoins important que les laboratoires disposent de moyens propres suffisants, seuls à même de permettre des recherches amont dans les laboratoires. Les entreprises hésitent en effet souvent à se lancer dans des développements très amont et/ou risqués, impliquant des ruptures technologiques. Il faut cependant veiller (i) à répondre à un réel besoin de la communauté médicale, (ii) à rechercher des ruptures technologiques à fort potentiel, spécifiques de nos compétences.

L'activité du GDR montre que les projets à l'interface avec les Sciences de la Vie prennent de plus en plus d'ampleur et nécessitent des moyens humains et financiers de plus en plus importants. Il est nécessaire de privilégier les activités pour lesquelles les compétences spécifiques des équipes de l'IN2P3 sont un atout indiscutable. Par ailleurs, au vu du foisonnement actuel des projets, une évaluation interne permettrait d'identifier les axes les plus prometteurs. Concernant les moyens, il paraît nécessaire de maintenir (i) le taux actuel de recrutement de personnes supplémentaires travaillant dans cette thématique, (ii) un flux d'une dizaine de doctorants par an pour l'ensemble des laboratoires, (iii) un effort continu au niveau de l'affectation des ingénieurs techniciens, et (iv) la part IN2P3 du budget du GDR, même si une grande partie des financements provient d'origines complémentaires diverses (appels à projets régionaux, nationaux et européens).

0.13 Accélérateurs

La Physique et la Technologie des accélérateurs forment une discipline scientifique au service d'applications très diverses, au delà de la physique subatomique, dans les domaines des sciences de la matière, des sciences et technologies de l'énergie, des sciences du vivant, et d'applications spécifiques dans les domaines de la santé et de l'industrie.

Dans son volet de Recherche et Développement, la discipline procède aussi bien par une démarche de recherche scientifique fondamentale visant à produire des percées de caractère révolutionnaire (RFQ, stockage d'antiparticules, laser à électrons libres, interactions laser-faisceau, accélération laser et plasma), que par une démarche technologique évolutive visant à pousser les limites des performances des systèmes accélérateurs dans un cadre économique réaliste (aimants et cavités supraconductrices, onduleurs de courte longueur d'onde, photo-injecteurs RF, schémas de collision en crabe ...).

La communauté des laboratoires français d'accélérateurs est au meilleur niveau mondial dans la démarche de R&D technologique et de façon plus restreinte dans la R&D scientifique.

Dans son volet de construction et d'opération d'accélérateurs, cette discipline fait appel à des démarches de conduite de projet et mène à la réalisation de systèmes accélérateurs en laboratoires mais aussi pour l'industrie. Elle y assure également le pilotage d'accélérateurs. Ces aspects sont maîtrisés à un excellent niveau par les laboratoires français.

En termes de projets d'accélérateurs impliquant les laboratoires français, la décennie 1999-2008 a été dominée par la fin de la construction du LHC, la construction de SOLEIL et maintenant le début de la construction de SPIRAL2. En contrepartie, elle a été très riche en projets et programmes de R&D : les programmes cadres européens FP5 (Eurisol, PDS-XADS) et FP6 (CARE, Eurisol, EUROTeV, EUROFEL et EUROTRANS), dotant les laboratoires français de l'ordre de 13 M€ de subvention de la Commission Européenne et renforçant la culture de collaboration multi-laboratoires, le projet CLIC-CTF3 piloté par le CERN, la R&D pilotée par le GDE-ILC sur les accélérateurs

FLASH et ATF2, et la construction de plates-formes de R&D de laboratoire et autres infrastructures (SupraTech, IPHI, GUINEVERE). Ces programmes furent en grande partie définis par la préparation des projets accélérateurs inclus dans la liste ESFRI tels que FAIR, XFEL, ESS, MYRRHA, HL-LHC et ILC-CLIC.

La décennie 2009-2018 est au contraire très riche en construction de projets accélérateurs tels que SPIRAL2, LINAC4, XFEL, FAIR, IFMIF-EVEDA, ThomX et plus tard HL-LHC, ESS et MYRRHA. La concrétisation de la construction de ces nombreux accélérateurs est une véritable consécration du travail de recherches et développements effectué dans la période précédente. Elle s'appuie très largement sur des contributions en nature ciblant les compétences de notre communauté dans les domaines d'excellence que constituent la supraconductivité appliquée aux accélérateurs et aux aimants, les structures radiofréquences, les sources et injecteurs de faisceau d'ions de haute intensité, les canons à électrons et des sources de positrons innovantes. Actuellement, ces projets mobilisent la plus grande partie des personnels scientifiques et techniques des laboratoires accélérateurs français.

Le financement des activités de R&D est complexe. Il passe naturellement via le CNRS mais également par la réponse à des appels d'offres de plus en plus nombreux (FP7, ERC, Grand Emprunt, ANR, Département, Région, etc).

Il est par contre souhaitable de trouver un équilibre entre les activités de construction et de R&D afin que les laboratoires du CNRS puissent continuer à développer leurs compétences et leurs moyens dans des domaines de R&D majoritairement orientés vers, ou inspirés par les besoins de la communauté de la recherche scientifique, tout en restant ouverts à d'autres applications par des développements connexes et de pointe. Et ceci doit continuer à se faire en accord avec les partenaires naturels français (le CEA) et les autres centres de recherche mondiaux, en particulier le CERN.

La communauté des accélérateurs au CNRS est structurée sur le plan institutionnel par le Pôle Accélérateur CNRS-CEA et par la commission AccelTech du Labex P2IO, rassemblant environ 75% de l'activité. Les autres laboratoires comme LPSC Grenoble, GANIL à Caen, IPHC Strasbourg ou encore le CEN Bordeaux-Gradignan complètent ce panorama à forte visibilité. Elle est également animée par l'Interdivision Physique des Accélérateurs et Technologies Associées de la SFP qui favorise efficacement les réseaux nationaux de collaborations.

0.14 Instrumentation

La recherche en physique subatomique et des astroparticules est intimement liée au développement des instruments d'observation et aux avancées des technologies pour la détection et le traitement des signaux. Les compétences et l'expertise acquises au sein de l'IN2P3 sont le fruit d'investissement à long terme, tant humain que financier. Bien que les instruments développés soient en premier lieu destinés à la recherche dans ces disciplines, ils peuvent aussi trouver une utilisation dans des recherches interdisciplinaires, sociétales et même faire l'objet d'un transfert de technologie vers des industriels, voire donner lieu à la création de start-ups.

L'évolution des détecteurs va vers une complexité de plus en plus grande, requise par la nécessité de mettre en évidence des phénomènes de plus en plus fins. Les cahiers des charges demandent des sensibilités accrues, une gamme dynamique plus importante, des résolutions plus fines et des vitesses de détection et de traitement plus rapides. En même temps les environnements expérimentaux exigent une plus grande tolérance aux radiations, des supports transparents au passage des particules et une intégration permettant si possible une maintenance facile.

Ceci se traduit pour différents types de détecteurs par:

- des calorimètres avec une granularité importante, en particulier lorsque des techniques de particle flow sont utilisées pour la reconstruction de l'énergie des particules.
- des détecteurs à micropistes gazeux, micromégas, GEM ou RPC, qui ont maintenant très largement remplacé les chambres à fils. La tenue aux radiations de ces détecteurs a fait des grands

progrès et un important travail est mené pour simplifier les procédés de fabrication.

- l'essor de l'utilisation des détecteurs semi-conducteurs avec l'utilisation de nouveaux matériaux (diamant, CdTe) et l'amincissement des senseurs et dont l'utilisation proche des faisceaux exige une très bonne tenue aux radiations.

Dans le domaine de l'électronique de lecture frontale l'utilisation des ASIC se généralise, avec des ASIC qui abritent de plus en plus de fonctions complexes et spécialisées. L'informatique en temps réelle se base quant à elle sur des FPGA, dont les fonctionnalités deviennent de plus en plus complexes et requièrent une spécialisation accrue pour le développement des logiciels embarqués. Dans tous ces domaines, la simulation continue à gagner de l'importance et l'utilisation de logiciels collaboratifs est indispensable.

En mécanique la complexification des objets et les exigences des spécifications, est maîtrisable uniquement en utilisant des plateformes d'outils de calcul et de CAO. Ainsi la compréhension des aspects thermomécaniques n'est possible qu'avec des simulations et des calculs complexes.

Le futur de l'instrumentation suscite bon nombre d'inquiétudes, dont la principale est comment préserver et développer l'attractivité de ces métiers au sein de l'IN2P3. L'enseignement de l'instrumentation est rare à haut niveau, la reconnaissance, en terme de recrutement et de carrière, est mitigée dans le corps des chercheurs et des différences de salaire importantes avec l'industrie peuvent être dissuasives. Afin de préserver un savoir faire à la pointe des technologies, il est important de reconnaître une place adéquate à la R&D, en amont de projets, comme espace de liberté et de créativité. Enfin, pour maintenir l'IN2P3 à une place importante dans le développement des instruments pour nos domaines de recherche, il faut renforcer la collaboration entre laboratoires, voire mutualiser les efforts sur les axes forts de l'Institut.

0.15 Relations Recherche-Enseignement

Bilan des enseignements: les laboratoires de l'IN2P3 ont un engagement dans l'enseignement très significatif dans les universités partenaires des UMR dans lesquelles l'IN2P3 est impliqué. La gamme des enseignements prodigués par les membres des laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu est extrêmement vaste, touchant à la physique fondamentale, à la physique appliquée et aux thématiques environnement et énergie. Les filières industrielles liées à l'industrie nucléaire et à la médecine (imageries et thérapies) reçoivent une contribution significative par nos laboratoires. Par ailleurs, l'expertise des personnels de l'IN2P3 et de l'Irfu en matière de traitement du signal et traitement des données est également reconnue au travers de nombreux enseignements. Néanmoins les thématiques de l'IN2P3 soient quasiment absentes dans toutes les autres universités et écoles d'ingénieurs: le développement d'actions spécifiques en direction des étudiants des autres universités ou écoles d'ingénieurs serait souhaitable, afin notamment de les inciter à continuer leur formation par un Master de notre domaine. Le système de délégation d'enseignement semble fonctionner de façon satisfaisante, bien qu'il ne concerne qu'un petit nombre d'enseignants-chercheurs chaque année. En revanche, de nombreux chercheurs du CNRS et de l'Irfu dispensent des enseignements.

Masters - Internationalisation et flux d'étudiants: le passage à la LRU et la mise en place des IDEX et LABEX s'accompagnent de réformes significatives des fonctionnements des enseignements. Les cours de Master sont de plus en plus dispensés en anglais et les formations multi-sites (avec par exemple un an à l'étranger) commencent à se développer, permettant une diversification importante du recrutement de thésards. En parallèle à cette internationalisation, les formations étiquetées recherche subissent la concurrence de plus en plus marquée des masters professionnels (dont le nombre et la qualité ont fortement progressé) ainsi que celle des écoles d'ingénieurs. Les stratégies collaboratives entre les universités se mettent en place pour maintenir des formations de Master inter-universitaires mais elles se heurtent à la stratégie d'indépendance des établissements.

Financement des doctorats: La multiplication des sources de financement et le faible taux

de succès de chacune des demandes complique fortement la tâche des laboratoires, malgré une augmentation globale du nombre de thèses. Dans ce cadre, le recrutement des étudiants étrangers, ainsi que les thèses en cotutelle avec une université étrangère, s'avèrent particulièrement problématique et chronophage. Les laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu émergent, dans leur grande majorité, à plusieurs écoles doctorales et y jouent un rôle important dans la formation des futurs docteurs à travers les contrats d'enseignement (monitorat), le suivi des doctorants et l'offre de cours doctoraux. La proximité et l'implication du laboratoire dans une école doctorale réputée sont absolument essentielles pour assurer l'alimentation des laboratoires en étudiants de qualité.

Devenir des docteurs: Sur le long terme, une fraction de l'ordre de 20% des docteurs vient renforcer les laboratoires et les universités. Malgré des disparités selon les laboratoires, plus de la moitié des étudiants continue par un post-doc, majoritairement à l'étranger, et une fraction de l'ordre de 10% est embauchée en CDI dans l'industrie. Environ un dixième des docteurs semblent rencontrer de réelles difficultés d'insertion professionnelle. L'évolution de l'emploi scientifique en France laisse craindre une situation dramatique pour les années à venir et désespérante pour les thésards.

Vulgarisation et grand public: L'action de vulgarisation des laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu est importante. Ils participent à de nombreuses actions pédagogiques (Passeport pour les 2 infinis, masterclasses, roue cosmique, TPE, TIPE, main à la pâte, conférences à la cité des Sciences et de l'Industrie, stages Janus, ...), mais aussi auprès du grand public (Café/Bar des Science, expositions itinérantes, conférences et festivals, site internet laradioactivite.com, émissions radiophoniques ou télévisées, fête de la science, revue "Élémentaire" ...) qui rencontrent un succès croissant. Il semble nécessaire d'augmenter l'offre de conférences à destination des étudiants de L3 dans les universités scientifiques où l'IN2P3 n'est pas présent.

0.16 Calcul

Depuis de nombreuses années l'IN2P3 et l'Irfu sont à la pointe de la technologie dans le traitement des très gros volumes de données. Poussées par les besoins de la physique des particules, ces deux instituts ont mis en place les outils et acquis des ressources dont bénéficient les autres disciplines scientifiques, notamment les astroparticules, la physique nucléaire et hadronique et les recherches pluridisciplinaires.

Au cours des dix dernières années, la physique des particules a joué un rôle majeur dans le développement de la technologie des grilles informatiques. Le pari pris en 2001 de miser sur la grille pour l'analyse des données du LHC est une réussite de tout premier plan. L'augmentation progressive de la luminosité et l'upgrade des détecteurs va engendrer une croissance continue du besoin en ressources informatiques dans les 10 prochaines années. La fiabilité des réseaux et l'augmentation significative des bandes passantes disponibles a rendu possible une évolution des modèles de calcul, avec un placement plus dynamique des données. Ces changements ont conduit à la mise en place de l'infrastructure réseau mondiale LHCONE qui donne pleine satisfaction.

La France fournit aujourd'hui 10% des ressources de la grille du LHC. Bien que l'objectif soit de maintenir ce niveau de contribution, les quatre dernières années (2010 - 2013) ont été particulièrement décevantes en termes de financement. Si ce niveau de financement devait perdurer, la part de la contribution française devra être revue à la baisse. Pour les futurs collisionneurs, l'ILC en particulier, l'évaluation précise des besoins en calcul reste difficile du fait des inconnues qui subsistent sur le calendrier de ce projet. On ne s'attend toutefois pas à des contraintes très fortes sur les infrastructures de calcul.

La physique des astroparticules est en passe de connaître un changement d'échelle dans le volume des données à traiter pour une nouvelle génération d'instruments. Les équipes et les centres de ressources français sont aujourd'hui des acteurs majeurs du traitement des données de nombreuses expériences de ce domaine (AMS, ANTARES, Auger, Fermi, HESS, VIRGO) et se positionnent sur les instruments de l'avenir les plus ambitieux (LISA, EUCLID, LSST, CTA, ...). Par ailleurs, le Centre François Arago récemment créé à l'APC vise à devenir un "Tier-2" spécifique pour les expériences

d'astroparticules et notamment pour les projets spatiaux.

En ce qui concerne le matériel, la vitesse des processeurs conventionnels ne progresse plus et l'augmentation de la puissance de calcul passe désormais par la multiplication des coeurs. Les besoins des expériences, en continuelle augmentation, doivent ainsi s'adapter aux nouvelles architectures (multi-cores, many-cores, GPU) qui sont justement à l'opposé des profils d'applications habituels de la physique des particules. Ainsi, un gros effort va être nécessaire de la part des développeurs pour tirer le meilleur parti possible du parallélisme désormais inhérent aux architectures de processeurs.

Au niveau de la physique théorique, la QCD sur réseau (LQCD) permet le calcul des phénomènes hadroniques inaccessibles par une approche perturbative. Elle requiert des simulations toujours plus précises qui nécessitent de grands temps de calcul sur des machines massivement parallèles. Une machine pétaflopique dédiée, éventuellement basée sur une architecture spécifique (GPU, network processor,...), intéresserait au plus haut point la communauté.

Le "cloud computing" est actuellement en plein essor, à la fois en tant que technologie et en tant que service proposé par un nombre grandissant de fournisseurs commerciaux. Il devrait conduire à une transformation importante du paysage dans les années qui viennent. Un juste compromis entre une externalisation vers des services vendus par des industriels et le maintien d'une expertise en interne doit être trouvé pour préserver au sein de l'Irfu et des laboratoires de l'IN2P3 un réseau d'experts pour l'administration des systèmes, le développement et le déploiement d'applications scientifiques.

Les grilles ont permis de structurer un réseau humain d'experts de tout premier plan. Dans l'évolution vers les clouds, il importera de maintenir autant que possible ce réseau afin de favoriser une adoption rapide des nouvelles technologies et des nouveaux services qui seront rendus disponibles.

Le défi des prochaines années se situe à plusieurs niveaux, notamment :

- offrir aux utilisateurs des grilles de production, particulièrement ceux n'appartenant pas à des communautés fortes et structurées, un accès simplifié aux services.
- développer une infrastructure de cloud(s) académique(s) adossée aux clouds publics pour répondre aux besoins de stockage et de traitement de très grandes masses de données.

Le CC-IN2P3 a un rôle essentiel à jouer pour relever ce défi. Ses ingénieurs sont parmi les principaux experts techniques de l'infrastructure nationale de traitement massif des données du LHC. En complément de l'expertise technique, les nouveaux locaux inaugurés en 2011 lui permettront au moins jusqu'en 2020 d'héberger l'infrastructure informatique nécessaire pour satisfaire aux besoins croissants de la communauté. Les Tiers-2 français apporteront un complément au rôle du CC-IN2P3 pour répondre aux défis des évolutions mentionnés plus haut.

Au-delà des problématiques liées aux ressources et à leur mise en oeuvre, la tendance générale à l'utilisation de simulations informatiques et d'outils computationnels toujours plus lourds, a incité l'IN2P3 et l'Irfu à créer un lien scientifique entre les domaines de la physique expérimentale et de la recherche en informatique. La consolidation de ces initiatives de recherche dans les prochaines années passe à la fois par une reconnaissance institutionnelle de ces projets par l'IN2P3 et l'Irfu et par la continuation du support permettant l'élargissement des groupes à travers la création de postes de recherche interdisciplinaires.

Enfin, la préservation des données et la problématique de leur accès à moyen et long termes doivent être considérées comme des nouveaux paradigmes à prendre en compte très sérieusement et de manière durable dans les programmes scientifiques.

0.17 Interface avec les sciences de la terre et l'environnement

Les sciences de la Terre et de l'environnement sont par essence confrontées à des défis croissants face aux questions toujours plus exigeantes et quantitatives posées par la communauté scientifique et la

société en général. A titre d'exemple, la compréhension des changements climatiques, l'estimation des effets potentiellement de plus en plus dévastateurs des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques liés au peuplement croissant des régions à risque demandent des études approfondies, interdisciplinaires et sur des périodes de plus en plus longues. La réponse institutionnelle apportée par l'INSU à ces besoins repose sur la structuration de son programme de recherche, ainsi que des moyens disponibles, par le développement des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) pour la surveillance et la prévision, ainsi que des programmes nationaux multi-disciplinaires et multi-organismes pour une approche globale du fonctionnement et de l'évolution du système Terre dans son environnement. Parallèlement du côté IN2P3/IRFU, la maturation des techniques expérimentales et méthodologiques mises à l'épreuve avec succès pendant des longues années sur des expériences accélérateurs et hors-accélérateurs, permet d'envisager un rapprochement de nos disciplines de recherche avec les sciences de l'environnement. Un tel rapprochement, hautement souhaitable de point de vue de la valorisation sociétale de nos disciplines, semble à notre portée à une échéance proche autant de point de vue institutionnel grâce aux évolutions INSU, que par l'existence des collaborations actuelles viables, même si insuffisamment structurées pour l'instant. Ces collaborations actuelles IN2P3/IRFU-INSU s'inscrivent sur deux axes principaux mettant en avant les spécificités et les savoir-faire de nos disciplines: - Des transferts de technologie et de savoir-faire (instrumentation, analyse, simulation), à l'oeuvre notamment avec la planétologie, la tomographie par muons, les mesures de faible radioactivité, les projets ICOS, FORFIRE etc. - Une implication pérenne des observatoires astro-particules dans des mesures et des programmes interdisciplinaires avec les exemples de MEUST, Auger, Hess et naturellement des structures plus facilement identifiables comme le Laboratoire Souterrain de Modane.

Les projets engagés couvrent les thématiques suivantes : - Géosciences et "géo-particules": tomographie géophysique par muons et géo-neutrinos ; - Physique de l'atmosphère : AUGER, HESS & CTA - Mesures environnementales : mesures de radioactivités et influence sur les organismes vivants suivant l'intensité, radiochimie, flux de gaz à effet de serre, surveillance des feux de forêt - Sciences de la mer : ANTARES-MEUST - Planétologie. Certains de ces projets sont adossés à de grands équipements existants ou en projet (tel qu'un détecteur Megatonne) qui sont autant d'opportunités pour structurer des collaborations pérennes entre instituts.

L'intérêt sociétal de la valorisation des techniques et méthodologies innovantes issues de la physique des hautes énergies et de la physique nucléaire par l'interdisciplinaire est évident autant pour nos disciplines que pour l'implantation de nos laboratoires dans le territoire. Il est opportun que les projets menés dans le cadre de l'interdisciplinarité soient reconnus comme enjeux transverses prioritaires de l'IN2P3 et de l'INSU et que leur développement soit incité. Le soutien financier de ces activités n'a pas vocation à reposer uniquement sur IN2P3/IRFU, mais il est essentiel de définir des appels d'offres ciblés et pérennes pour les amorcer et leur permettre d'arriver à une maturation suffisante pour chercher le financement nécessaire à leur mise en place auprès d'autres agences de moyens. L'IN2P3/IRFU se doivent de les accompagner en structurant les réponses aux appels d'offre des réseaux européens, en facilitant le dialogue institutionnel avec des acteurs locaux (Universités, Régions) ou scientifique avec des chercheurs extérieurs aux instituts. Une partie importante des synergies IN2P3/INSU repose sur la valorisation des transferts de technologie et de savoir-faire, tant sur la partie instrumentale que sur plan méthodologique. Dans sa grande majorité l'implication de l'IN2P3/IRFU est nécessaire autant au niveau physicien que des services techniques de manière à assurer un retour technique et scientifique de l'investissement consenti. Ceci passe par une structuration de ces activités par un pilotage technique (cellules projets) et scientifique (création de GDR inter-instituts par exemple). Dans le cas des observatoires et des grands équipements le risque est en premier lieu lié à l'existence des projets eux-mêmes et leur pérennité, problématique où de nombreux paramètres interviennent. Dans ce cadre il est souhaitable que l'interdisciplinaire n'apparaisse pas comme un faire-valoir, un sous-produit ou une caution, mais bien comme une dimension assumée du projet. Des structures de pilotage communes avec l'INSU ne peuvent qu'être un atout dans cette mise en valeur. Elles doivent en particulier veiller à ce que l'interdisciplinaire ne soit pas une source de dispersion ni une charge de travail démesurée, à moyens constants, pour les collègues IN2P3/IRFU, mais bien une collaboration active avec d'autres instituts. La politique de recrutement joue à ce titre un rôle clé, comme pour

toutes les autres thématiques. Il est donc recommandé de pouvoir identifier des post-doc, des thèses voire des postes pérennes sur ce type de thématique pour en assurer un développement correct et non pirate. Enfin un risque particulier émerge sur la dimension sociétale de certaines thématiques comme le réchauffement thématique ou les risques liés au nucléaire civil. Il est important de maîtriser les particularités de cette dimension en général absente des préoccupations IN2P3/IRFU.

0.18 Théorie

La communauté de théoriciens impliqués dans les thématiques de physique des particules, physique nucléaire, astroparticules et cosmologie ainsi qu'aux interfaces de ces disciplines, regroupait en France, selon une statistique assez récente, environ 215 permanents, dont 43% à l'IN2P3 et 4% à l'Irfu et 175 non-permanents. Les domaines de recherche principaux sont la physique des particules (43%), la physique nucléaire (22%) et les astroparticules et la cosmologie (31%).

Fonctionnement: Les physiciens théoriciens travaillent souvent à l'interface entre plusieurs thématiques et la plupart du temps en petites collaborations (à l'exception des calculs de QCD sur réseau ou des simulations cosmologiques) permettant ainsi une grande souplesse dans l'organisation du travail. Les équipes de physique théorique doivent cependant maintenir une taille critique afin de créer une émulation scientifique porteuse d'idées nouvelles, et une réelle dynamique. Cela implique, au sein d'un laboratoire, une certaine cohérence dans les thématiques tout en gardant une diversité considérée comme source d'enrichissement scientifique.

Financement: Plusieurs sources de financement existent pour les équipes de physique théorique : financement récurrent par les autorités de tutelle et complément éventuel sur les ressources propres du laboratoire, et financement sur projet. Un équilibre entre ces deux modes de financement doit être recherché. Le financement récurrent, absolument essentiel, doit être suffisant pour permettre une activité normale de l'équipe, et le financement sur projet réservé à des projets bien identifiés, d'un montant minimum par chercheur. Le plan de financement des équipes de physique théorique pourrait d'ailleurs faire l'objet d'un engagement quinquennal, laboratoire par laboratoire, afin d'assurer un minimum de stabilité et permettre un investissement scientifique à moyen terme avec une visibilité forte. Le recrutement de post-doctorants devrait aussi faire l'objet d'un plan pluriannuel, et s'adapter au calendrier spécifique des théoriciens en permettant de faire des offres dès janvier aux meilleurs candidats.

Evaluation: Le mode de fonctionnement et le financement des équipes de physique théorique doivent être au service de l'excellence scientifique. Ils doivent s'accompagner d'un processus d'évaluation adapté. L'évaluation actuelle par l'AERES n'est parfois pas adaptée aux équipes de physique théorique dans un laboratoire expérimental dans la mesure où le comité d'évaluation ne comporte souvent qu'un seul théoricien rendant ainsi difficile une évaluation objective. Afin d'y remédier, l'IN2P3 et l'Irfu pourraient mettre en place au niveau national, des comités d'évaluation par grandes thématiques pour l'ensemble des équipes de physique théorique de leurs laboratoires – en association avec l'INP. Il importe toutefois de veiller à ce que le temps consacré à évaluer et à être évalué, ainsi qu'à soumettre et évaluer des propositions de toutes sortes, n'empiète pas démesurément sur le temps qui devrait être consacré à la recherche. L'excès d'évaluation, auquel les chercheurs sont de plus en plus soumis, est ainsi à l'opposé du but recherché de qualité et d'efficacité de la recherche.

Relations théorie-expérience: Les collaborations scientifiques avec les équipes expérimentales au sein des laboratoires, et plus généralement au niveau national ou international sont favorisées par les structures du type GDR ou groupes de travail internationaux. C'est souvent en leur sein que démarrent les nouvelles idées de collaboration. Toutefois les rencontres impliquant un nombre limité de théoriciens sur une thématique donnée sont aussi importantes et doivent pouvoir s'organiser de façon extrêmement souple: de par leur nature elles doivent être financées au niveau du laboratoire.

Ressources humaines: Un investissement des théoriciens à moyen et long terme sur des sujets de plus en plus complexes et souvent multidisciplinaires nécessite une politique de recrutement cohérente

et continue de physicien(ne)s sur des postes permanent(e)s, particulièrement dans une période où l'on assiste à une multiplication des structures de recherche temporaires, faisant appel à un nombre significatif de chercheurs post-doctoraux.

Or on a assisté depuis longtemps, à l'INP et chez ses prédécesseurs au CNRS, à une érosion continue du nombre de physiciens théoriciens impliqués dans les thématiques de physique des particules, physique nucléaire, astroparticules et cosmologie au sein de la section 02 du CNRS, allant de pair avec un élargissement systématique des thèmes de recherches considérés comme relevant de la 02 plutôt que d'autres sections. Il est indispensable de s'attacher à renverser cette tendance au sein de l'INP, ou à prendre dans les autres Instituts, IN2P3 et Irfu, toutes mesures nécessaires pour pallier ses conséquences, faute de quoi ces thématiques traditionnelles seraient insuffisamment représentées, ce qui nuirait gravement à l'efficacité de la recherche française dans ces domaines.

Une telle politique de recrutement de chercheurs théoriciens permanents doit aussi être reconnue comme un atout majeur pour les grands programmes expérimentaux actuels et futurs de l'IN2P3 et de l'Irfu. Elle doit bien sûr rester associée à des ressources humaines suffisantes en visiteurs de longue durée, post-doctorants et doctorants, ce qui est essentiel pour maintenir une dynamique scientifique forte. Il conviendrait également d'assurer un accès équitable aux délégations d'enseignants-chercheurs pour les théoriciens. Enfin, un flux régulier de visiteurs de courte durée doit garantir une émulation scientifique permanente. Ce besoin est propre aux équipes de physique théorique, un budget spécifique devant aussi être dégagé à cet effet.

0.19 Organisation et financement de la recherche en Physique des 2 Infinis (P2I)

On assiste depuis plusieurs années à une réduction constante de la dotation de l'Etat aux organismes de recherche. La physique subatomique au CNRS, qui par ses spécificités historiques était soutenue essentiellement par cette voie, est touchée de plein fouet, d'autant plus que les sources alternatives de financement correspondent peu aux caractéristiques de ses programmes.

Plusieurs guichets de financement sont apparus progressivement depuis une dizaine d'années. Ils ont en commun la notion de projet, limité dans le temps, et fonctionnent par appels : les appels à projets ANR, les appels à projets européens (infrastructures, mobilités des chercheurs, 'ERC), appels plutôt bottom-up, et récemment les appels "Investissements d'avenir" (Equipex, Labex, Idex, Infrastructures...) lancés par l'ANR et plus orientés top-down.

Le développement d'agences pour ces appels d'offre mais aussi pour l'évaluation, se fait en superposition au système existant. C'est le cas de l'AERES par rapport au Comité National de la recherche.

Si la contribution des guichets externes est encore faible aujourd'hui pour la physique des deux infinis (P2I), comparée au budget total, leur impact devient prépondérant ("effet levier"), et tend à diluer la gouvernance et à affaiblir la recherche fondamentale associée. Le fonctionnement par projets n'est pas nécessairement pertinent lorsque les échelles de temps des programmes expérimentaux se comptent en dizaines d'années. De plus la multiplication de la production de dossiers, de leur évaluation et la gestion des financements multisources, consomment beaucoup d'efforts et de moyens au détriment des activités de recherche de base.

L'organisation de nos disciplines est caractérisée par des laboratoires de grande taille, peu nombreux et avec une forte compétence technique. Les collaborations dans lesquelles les groupes français sont engagés sont toujours internationales et souvent de grande, voire de très grande taille. Ceci requiert une coordination forte: elle assurée au niveau français par l'IN2P3 et s'appuie sur les très grandes infrastructures de recherche (TGIR), instruments essentiels de nos disciplines. L'irruption de ces guichets multiples a affaibli de fait cette capacité de coordination: la délégation par l'ANR de ses compétences dans l'attribution des ressources et l'évaluation des projets de ces disciplines à une instance conjointe IN2P3-Irfu permettrait de retrouver la cohérence dans la coordination et la définition

d'une politique scientifique, appuyée sur un Conseil Scientifique représentatif de la communauté.