

PROSPECTIVE

DES CONSEILS SCIENTIFIQUES DE DÉPARTEMENT

MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE, PLANÈTE ET UNIVERS

Directeur du département
Michel LANNOO

Président du Conseil scientifique de département
Rémy MOSSERI

Membres du Conseil scientifique de département

Angel ALASTUEY
Éric BUFFENOIR
Monique COMBESCURE
Jean-Yves DUBOZ
Karine DUMESNIL
Bertrand GIRARD
Didier GUYOMARC'H
Raphaële HERBIN
Mathieu KOCIAK
Claudine LACROIX
Annick LOISEAU
Dominique MAILLY
Antoine MATTEI
Alexandre MATZKIN
André NEVEU
Xavier OBRADORS
Éric PEREZ
Joël PLANTARD
Anne RENAULT
Jean-Luc SAUVAGEOT
Vladimir TIKHONCHUK
Stefaan VAES
Fabrice VALLÉE

PRÉAMBULE

La structure particulière du département MPPU, avec ses deux instituts (IN2P3 et INSU) disposant de Conseils Scientifiques, nous conduit à ne pas intégrer directement dans nos réflexions leurs thématiques propres, et à nous appuyer donc principalement sur l'activité couverte par 5 sections du Comité National (01, 02, 04, 05, 06). Nous avons néanmoins essayé de préciser quelques interfaces, déjà en action ou simplement prometteuses avec ces instituts. Nous renvoyons par ailleurs le Conseil Scientifique aux documents fournis par les différentes sections du CN pour largement compléter le présent texte, en particulier pour le chapitre sur le « front de la connaissance ».

La recherche au CNRS c'est d'abord des femmes et des hommes, chercheurs et ITA. Rêver de la recherche (et du CNRS) en 2020, c'est aussi savoir intégrer la dimension de ressources humaines qui fait encore défaut à l'organisme. Il faut convaincre les décideurs politiques, mais aussi le grand public, qu'une politique ambitieuse pour la recherche et l'innovation ne peut faire l'économie d'une action prolongée qui passe par un effort programmé, pluriannuel, qui puisse éliminer les effets d'accordéon néfastes mais coutumiers.

La période récente met en avant la probable responsabilité de l'activité humaine quant à des déséquilibres à venir importants. La gravité des problèmes que l'on peut anticiper interpelle la communauté scientifique, qui doit clairement les intégrer dans sa stratégie. Les mathématiques et la physique ont ici un rôle très important à jouer, à travers en particulier les nombreuses interfaces qu'elles ont développées, sur des termes aussi divers que l'énergie, la prévision des risques naturels, les mesures de pollution, les applications multiples des nanotechnologies, etc.

Les relations du CNRS avec le grand public et la société doivent s'adapter aux évolutions de cette dernière vis-à-vis des questions de science et de technologie. Les chercheurs du CNRS ont un statut largement reconnu d'expert, et sont régulièrement sollicités pour éclairer des points d'actualité.

Mais, au-delà, il convient d'organiser un dialogue où se conjuguent des éléments de la « demande sociale », et l'ensemble des problèmes d'éthique autour de la pratique scientifique et de ses applications. Des thématiques importantes pour nos domaines (nanosciences, énergie, sécurité et information, etc.) sont l'enjeu de débats auxquels nous nous devons de participer.

Le plan de ce document est le suivant. Le chapitre 1 résume, de façon non exhaustive, des points saillants du front des connaissances dans nos disciplines. Nous avons séparé les mathématiques et les activités de physique théorique d'un côté, et regroupé une part importante des thématiques expérimentales de l'autre. D'autres sont présentés au chapitre 2 sous le chapeau des nanosciences, le seul parmi les thèmes fédérateurs mis en avant par la direction que nous avons pu traiter. Le chapitre 3 est consacré aux interfaces, que nous avons dû limiter ici à celles avec les deux instituts du département et à l'interface avec la biologie. Enfin le chapitre 4 contient diverses recommandations, avec une attention particulière pour le calcul numérique et l'instrumentation.

1 – DYNAMIQUE DU FRONT DE CONNAISSANCE

La recherche scientifique s'appuie sur le besoin impérieux pour l'homme d'augmenter sa connaissance du monde, et dans le même temps sur la nécessité de répondre à des problèmes concrets, posés par la société dans toutes ses composantes. Et l'on retrouve, en physique comme en mathématique, cette coexistence d'une dynamique propre à la recherche fondamentale, d'études aux interfaces, et de recherches plus directement appliquées. Soutenir la première est une condition nécessaire au développement des deux autres. Il est toujours bon de rappeler que de nombreuses technologies de notre quotidien (lasers, imageries diverses, écrans plats, etc.) sont des purs produits d'une recherche fondamentale plus ancienne qui répondait alors à sa logique propre.

Par ailleurs, la physique tient une place particulière dans l'ensemble des sciences du fait du caractère particulièrement intégrateur, prédictif et précis de ses modèles de la nature. Il s'en suit un rapport historique particulier avec les mathématiques, qui y manifestent souvent une « efficacité déraisonnable » comme le soulignait le physicien E. Wigner.

1.1 QUESTIONNEMENTS THÉORIQUES

Les mathématiques ont ceci d'original qu'elles inventent leurs objets d'étude de façon souvent autonome. Pourtant, si les mathématiques d'avant-guerre, héritières de Hilbert, cherchaient un approfondissement hors de toute considération extérieure, elles ont su trouver depuis cinquante ans, sollicitées par la physique pour les besoins de la formalisation de la physique quantique, des théories de champs et modèles de physique statistique, de nouveaux questionnements souvent féconds. Ces vingt

dernières années, les progrès de la théorie des cordes (et des outils développés en parallèle que sont les modèles intégrables, les théories conformes et les modèles de matrices) ont même parfois ouvert des pistes ou jeté des ponts inattendus entre divers champs de recherche.

Si les mathématiques s'interrogeront encore sur les problèmes centraux liés, par exemple, à la classification des variétés de petite dimension, au cobordisme algébrique, ou encore chercheront à clore le programme de Langlands liant théorie des nombres et théorie des représentations des groupes, les développements des mathématiques aux interfaces et en particulier avec la physique seront probablement très féconds également. Ainsi, l'exemple des processus de Loewner stochastiques et ses relations avec les modèles de physique statistique est prometteur, les théories conformes et modèles intégrables apportent également de nouvelles approches du programme de Langlands géométrique et d'autres champs d'études algébriques (algèbres de Hecke affine, etc.). Le problème des dualités entre théories de champs et de cordes, nécessaire à l'identification de la « théorie ultime », ouvre des abîmes à la recherche en mathématiques.

Il serait toutefois erroné de croire que les sciences physiques seraient seulement dans une phase d'approfondissement et de clarification mathématiques des théories existantes. Si la physique des hautes-énergies attend des grandes expériences à venir (LHC, VIRGO, etc.) une confirmation des modèles actuels sur certains aspects (particule de Higgs, supersymétrie, ondes gravitationnelles) et des indications sur la physique au-delà du modèle standard, les problèmes fondamentaux liés à la matière noire et à l'énergie noire, surgis dans les expériences astrophysiques de la décennie passée, questionnent les approches standards de la physique des très-hautes-énergies de manière très profonde et invitent modestement à ne privilégier a priori aucune approche de quantification de la gravitation. Dans l'avenir, ces théories physiques, difficiles à tester expérimentalement, devront leur intérêt à leur richesse mathématique, à leur capacité à résoudre les problèmes d'auto-

consistance des théories physiques actuelles, et à la possibilité de les déduire d'un socle conceptuel « simple ». Un véritable développement d'une double culture physique mathématique achevée en Russie ou aux États-Unis, ainsi qu'un rapprochement des deux communautés, apparaît donc comme une nécessité. Ce découpage ne doit pas stopper l'exploration de leurs conséquences cosmologiques et d'éventuels tests indirects. En tout état de cause, les années à venir devraient être riches en surprises dans ce domaine.

La situation de la théorie de la matière condensée est différente. Les systèmes corrélos présentent des comportements où les rôles des interactions, des fluctuations et du désordre sont prépondérants, et cela de façon exacerbée dans les cas de dimensionnalité réduite. Cela stimule la démocratisation des techniques de théories des champs et de renormalisation, l'introduction d'outils théoriques sophistiqués (théories conformes, modèles intégrables), et la compétition entre diverses méthodes numériques (approches DFT, champ moyen dynamique, Monte Carlo quantique, méthodes semi-empiriques), avec une probable nécessité d'approches multi-échelles pour traiter de systèmes réalistes. Des progrès importants ont été obtenus dans l'étude des transitions de phase de systèmes ordonnés de plus en plus complexes, des systèmes désordonnés, des milieux granulaires (systèmes hors-équilibre), de leurs aspects non-linéaires, et de leurs dynamiques lentes ou stationnaires.

Le thème de la complexité, historiquement fécond entre mathématiques et physique, est devenu largement pluridisciplinaire, incluant en particulier la biologie. Une bonne théorie de la turbulence, des processus hors-équilibre et du chaos passera, pour les premières, par une révolution conceptuelle de la théorie des probabilités. En physique, des directions de recherche se développent comme en turbulence lagrangienne, ou sur l'effet dynamo. D'autre part, à la frontière entre physique statistique et informatique, les problèmes d'optimisation et la physique des systèmes désordonnés ont connu de nombreux points de rencontre et d'enrichissement

mutuel. On attend des progrès dans le domaine de l'inférence statistique, des perspectives s'ouvrent en neurobiologie, ou bien encore à l'interface avec le monde économique, avec l'étude du comportement collectif de systèmes d'agents en interaction.

La modélisation et la simulation numérique jouent un rôle croissant, alimenté par l'augmentation des puissances de calcul disponibles, mais également en réponse aux demandes scientifiques, technologiques et sociétales. Elle permet la possibilité d'éviter des expériences coûteuses ou nuisibles pour l'environnement ou l'équilibre politique (essais nucléaires, etc.). Une tendance actuelle est d'évoluer vers des modèles hiérarchiques (des modèles simples à grande échelle aux modèles complexes à échelle fine), mêlant des approches déterministes basées sur la physique aux modèles probabilistes et statistiques (identification des données par méthodes bayésiennes, etc.). Nous y reviendrons au chapitre 4. Enfin, notons le développement important du calcul formel, qui pourrait conduire à une inflexion des pratiques, dont il n'est pas facile de mesurer l'ampleur, si l'on cherchait par exemple à comparer avec ce qui s'est produit il y a plusieurs dizaines années avec la généralisation du calcul numérique dans l'activité scientifique.

1.2 DE L'ATOME À LA MATIÈRE MACROSCOPIQUE

Les progrès réalisés dans la compréhension de l'interaction matière-rayonnement au niveau atomique, et des relations structure-propriétés en milieu condensé, ont conduit en retour à une forme de «domestication» de la matière qui n'est plus seulement un objet d'étude sous ses formes «brutes» (atomes, molécules, cristaux), mais bien souvent manipulée et/ou artificiellement recomposée en vue de lui faire exprimer telle ou telle propriété. C'est d'ailleurs l'objectif principal de la nanophysique, ce qui explique que nombre

des perspectives qui auraient pu suivre dans ce chapitre sont reportées au chapitre 2.

La physique des «atomes froids», qui continue son développement prolifique (*Voir* les travaux sur les molécules froides, les lasers à atome, les condensats de Bose), a ouvert de belles perspectives à ses frontières, et en particulier avec la matière condensée. Ainsi en métrologie, les progrès conjugués de l'optique atomique et de la physique mésoscopique pourraient, à l'horizon 2010, faire dériver toutes les unités électriques de l'unité temporelle, alliée aux constantes fondamentales universelles. Ou bien encore les propositions mariant condensats et réseaux optiques, pour illustrer de façons quasi «analogique» des questions importantes de la matière condensée (transitions de phase quantiques, systèmes de spins frustrés, etc.). Notons enfin la miniaturisation spectaculaire des expériences de physique atomique, promise par les «puces à atomes».

L'Information Quantique, au cœur d'une triple interface, entre physique, mathématique et informatique, cherche à utiliser les subtilités de la théorie quantique (en particulier sur la non-localité, l'intrication ou la mesure) pour inventer des façons nouvelles de traiter et transmettre de l'information.

Certains aspects sont proches des applications (cryptographie), d'autres à beaucoup plus long terme (calcul quantique), mais tous sont porteurs en parallèle d'un approfondissement des fondements et implications de la théorie quantique.

L'intérêt croît pour des objets (et événements) uniques (sources de photon unique, sauts quantiques, transistors à «1 électron», traçage de macromolécules biologiques, manipulation d'atomes et molécules sur substrats, etc.). De nouvelles modalités sont alors offertes pour tester la théorie quantique, ou bien encore par exemple pour traquer le circuit «ultime» de l'électronique moléculaire.

Mais la physique s'intéresse tout autant aux cas où les propriétés collectives dominent. Ainsi, les systèmes de fermions en interaction, qu'il s'agisse de matériaux (cuprates, organi-

ques, fermions lourds, manganites) où différents ordres de la matière entrent en compétition, et qui ouvrent la voie vers de nouvelles applications (capteurs, nouveaux composants pour l'électronique), ou bien de systèmes de basse dimensionnalité plus artificiels, avec leurs excitations électroniques originales.

Les questions de plasticité restent un domaine très actif en métallurgie physique aussi bien sur le plan expérimental que de la modélisation, dont les enjeux sont multi-échelle (par exemple de la description des coeurs des dislocations à leurs comportements collectifs). On espère ainsi éliminer les aspects phénoménologiques de la mécanique des milieux continus classique appliquée à la plasticité.

La « physique des matériaux » concerne un spectre très large de matériaux (pour l'optique, le magnétisme, etc.) et comporte des aspects fondamentaux et appliqués. Mais, bien que très active, sa place en France est un peu ambiguë car les aspects « synthèse » relèvent plutôt de la chimie alors que l'étude de leur structure et de leurs propriétés est l'apanage de la physique. Il faudrait réfléchir à la mise en place de réseaux de recherche interdisciplinaires pour réconcilier ces différents aspects.

La matière ne s'organise pas toujours, loin s'en faut, de façon régulière. Les matériaux désordonnés (verres, granulaires), la matière dite « molle » (matières plastiques, gels, cristaux liquides, boues, pâtes), très présents du côté des applications (dans des secteurs très divers), aux interfaces avec la chimie et la mécanique, continuent de poser des problèmes de nature fondamentale.

Ainsi les questions d'élasticité et de plasticité (qui requièrent des analyses multi-échelles originales) ; de fracture (où le rôle de la dissipation est mieux compris) ; les fluides complexes (avec l'étude des systèmes mixtes et de films minces) ; la microfluidique, que nous renvoyons dans la partie nanosciences ; les milieux granulaires, prépondérants dans les milieux naturels, avec donc des perspectives importantes au niveau des applications industrielles et de gestion des risques (écoulements, avalanches, érosion).

Il faut, pour sonder cette matière, la soumettre à des sollicitations diverses, en mesurer les effets, en dégager des interprétations. Ceci exige une instrumentation toujours plus performante et une modélisation accrue (points évoqués plus loin), qui toutes deux conduisent à des développements aux interfaces. Ainsi, l'effort porté sur l'étude de la propagation des ondes, dans les milieux complexes ou bruités, intéresse la physique du globe et la biologie. Ou bien encore les hautes pressions, utilisées pour mieux comprendre les interactions qui fixent la cohésion des solides, intéressent de façon évidente les géologues, mais également l'industrie (techniques de pascalisation pour la conservation alimentaire).

Amener certains outils à des performances toujours plus extrêmes ouvre à chaque fois de nouvelles portes à la recherche fondamentale. Ainsi, les champs magnétiques très intenses (développés à Grenoble et Toulouse) donnent-ils accès à des régimes d'excitations élémentaires originaux ; il importera ici de faire l'effort nécessaire pour permettre aux deux centres français de maintenir leur rang. Les sources laser d'impulsions toujours plus brèves et intenses permettent de sonder des processus dynamiques inaccessibles jusqu'ici. Les enjeux sont de disposer d'impulsions femtosecondes intenses sur un spectre étendu, de les mettre en forme pour réaliser un « contrôle cohérent » à l'échelle moléculaire), de créer des impulsions ultrabrèves attosecondes où se situent les mouvements des électrons, ou d'atteindre des intensités importantes sur cible pour produire des rayonnements sub-picoseconde ou des particules énergétiques. Cette technologie ouvre une nouvelle physique largement inexplorée, mais aussi des champs d'applications en médecine et biologie.

La décision de construire ITER à Cadarache et la volonté du ministère de la défense d'« ouvrir » le Laser MégaJoule (LMJ) auront des implications profondes en physique des plasmas.

Les enjeux en physique des plasmas magnétisés sont par exemple, l'étude des instabilités magnétohydrodynamiques en régime non linéaire, et le transport turbulent dans des

régimes de température élevée. Pour la fusion inertielle, il faudra s'appuyer sur une approche numérique qui suppose un accès à des grands calculateurs et d'un programme d'expérimentation tirant profit des installations laser accessibles par la communauté française.

2 – LES THÈMES « FÉDÉRATEURS »

La direction du CNRS a listé un certain nombre de grands thèmes de recherche fédérateurs :

« *Origine de la vie... et ailleurs* », « *planète Terre et facteur anthropique* », « *du neurone au cerveau et à la conscience* », « *information, communication, connaissance, observation et images* », et enfin « *nanomonde* ». À chaque fois les mathématiques et la physique y trouvent effectivement une place importante, sur le plan conceptuel et/ou instrumental. Mais, le temps nous a manqué pour y analyser plus à fond la place de notre communauté, et nous nous restreindrons ci-dessous au dernier de ces thèmes.

Nanomonde : Nanosciences et Nanotechnologie

Les nanosciences et les nanotechnologies sont un thème majeur de la recherche actuelle dans les grands pays industrialisés et émergeants. Elles évoluent à une rapidité prodigieuse, soutenues par de nombreux programmes nationaux et internationaux, largement motivés par des enjeux économiques considérables dans des domaines aussi divers que l'information et la communication, les matériaux, la santé et l'énergie. Les recherches en nanosciences et nanotechnologies sont intrinsèquement multidisciplinaires ; elles s'appuient sur de nombreux savoir-faire en physique, chimie, biologie, ingénierie et sciences humaines et sociales. Elles impliquent un travail en réseaux des équipes ainsi qu'une interaction et une continuité fortes entre recherches

fondamentales et appliquées avec le double objectif de miniaturisation et de réalisation de nouvelles propriétés. Dans ce contexte, la richesse thématique du CNRS est une opportunité qui a été et doit continuer à être exploitée.

Sept grands axes complémentaires et tous stratégiques peuvent être dégagés. Ils comportent à la fois des thèmes déjà établis mais nécessitant encore des développements importants, et d'autres en émergence ou plus prospectifs :

– *Introduction de nouveaux concepts et nano-systèmes présentant de nouvelles propriétés.* Les possibilités offertes par les nano-systèmes pour la miniaturisation des composants ou pour tirer profit de leur nouvelles propriétés physiques ou chimiques sont extrêmement vastes que ce soit en modifiant la taille, la structure, la composition ou le nombre et l'organisation des nano-objets constitutifs (boîtes quantiques et nanofils semi-conducteurs, nanotubes, nanoparticules métalliques, nano-objets hybrides, métamatériaux, NEMS, etc.). Elles s'appuient également sur le développement de nouveaux matériaux (semi-conducteurs à grand gap ou magnétiques, multiferroïques, etc.). Les nombreux travaux réalisés ces dernières années ont commencé à avoir des retombées économiques et doivent être poursuivis, avec à l'esprit des applications en nano-électronique, spintronique, nanomagnétisme, nano-photonique, plasmonique, nano-fluidique, nanothermie, matériaux, énergie renouvelable, catalyse, biologie et nano-médecine.

– *Étude, modélisation, simulation et compréhension des propriétés fondamentales et des mécanismes de croissance.* La mise en évidence expérimentale ainsi que la compréhension et la modélisation théorique des processus fondamentaux sont indispensables à la conception et à l'utilisation de nouveaux nano-systèmes. Cela concerne aussi bien le nano-objet unique (« briques élémentaires », dont les agrégats sont des systèmes modèles) que son intégration individuelle ou collective dans un dispositif. La modélisation et la compréhension des mécanismes de croissance par des techniques physiques ou chimiques sont également des points clefs pour leur contrôle.

– *Élaboration, synthèse, auto-organisation et auto-assemblage d'objets et de systèmes nanométriques.* L'ensemble des approches complémentaires top-down ou bottom-up pour la fabrication de nano-objets est à soutenir. L'amélioration des techniques existantes mais également le développement de nouvelles approches, permettant la concrétisation des nouveaux concepts, sont essentiels (réalisation de nano-systèmes par lithographies, assemblage de nano-objets ou autoorganisation en utilisant les acquis de la physique des surfaces, des méthodes chimiques, ou des systèmes biomimétiques par exemple). L'élaboration de structures tri-dimensionnelles demeure un challenge. La coordination des grandes centrales de technologie et leur plus large ouverture à la communauté sont indispensables, tout comme le maintien de leur excellence technologique. Le soutien aux centrales de proximité qui offrent un support complémentaire essentiel et structurent le tissu local, doit être réalisé en parallèle.

– *Développement de l'instrumentation.* L'innovation dans ce domaine est primordiale et a des retombées sur l'ensemble de la recherche en nanosciences et nanotechnologies. Une véritable recherche en instrumentation est indispensable (techniques de lithographies, sondes locales, microscopie électronique, imageries optiques, résolution temporelle, techniques synchrotron, interfaçage nano-objets – monde macroscopique, etc.).

– *Conception de nano-systèmes à visées applicatives – réalisation de dispositifs, modélisation et compréhension de leur fonctionnement.* La réalisation de « vrais » nano-dispositifs tenant compte des contraintes techniques et de production (coût, environnement, compatibilité avec l'existant, etc.) est une priorité. Elle constitue un passage obligé pour un transfert du laboratoire vers l'industrie, mais n'est encore que trop peu abordée.

– *Interface avec la biologie.* Le foisonnement de nouveaux objets et techniques nanométriques apporte des outils innovants pour la biologie et la médecine (imagerie par sonde locale, nanodétecteurs de bio-molécules, traçage de bio-molécules, vectorisation de prin-

pes actifs, nanoparticules magnétiques pour l'IRM, etc.). Ces utilisations n'en sont qu'à leur début et ouvrent de nombreuses perspectives notamment en nano-médecine.

– *Analyse des impacts sociétaux et environnementaux.* Une nouvelle technologie, surtout à fort potentiel applicatif, nécessite des recherches sur ses répercussions. Les impacts tant sur l'environnement (métrologie, dégradabilité) et la santé (nano-toxicologie), que sur la société (éducation, économie, information du grand public, etc.) de la future utilisation massive des nanomatériaux ne sont encore que peu étudiés. De par sa pluridisciplinarité et sa crédibilité auprès du grand public le CNRS doit jouer un rôle central et renforcer son action dans ce domaine.

La très bonne place de la recherche française et l'implication croissante de nombreux laboratoires du CNRS sont des points positifs qui ne doivent pas masquer le manque de visibilité du CNRS dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. La mise en place de coordinations régionales par les C'Nano constitue ici une avancée importante.

L'interdisciplinarité est un atout qui pourrait être plus largement exploité, notamment par la poursuite de la création de GDR pluri-disciplinaires, par l'émergence de programmes interdépartements et par le développement de plates-formes interdisciplinaires communes à plusieurs laboratoires de différents départements, associant éventuellement des entreprises, et accueillant des projets à visées fondamentales et/ou applicatives. Le renforcement des partenariats laboratoires entreprises est indispensable pour répondre aux enjeux économiques des nanotechnologies.

3 – LES INTERFACES

Les interfaces de nos disciplines sont très développées et fertiles, tant avec les thématiques couvertes par l'IN2P3 et l'INSU ou la bio-

logie (ces dernières étant présentées ci-dessous) qu'avec la chimie, l'ingénierie et les sciences de l'information (qui auraient également mérité d'être développées).

3.1 INTERFACES AVEC L'IN2P3 ET L'INSU

Cette interface concerne de notre côté essentiellement la section 02 pour la partie théorique, et la section 04 au plan expérimental (lasers, miroirs, horloges, etc.). À noter également l'implication plus ponctuelle de physiciens de la matière condensée sur des problèmes de cryogénie embarquée.

Ainsi, l'accompagnement théorique des projets VIRGO et futur LISA (détection des ondes gravitationnelles), de l'expérience LHC (validation du modèle standard, particules supersymétriques), les progrès théoriques attendus devant les résultats obtenus au RHIC ou au GANIL et aux résultats des collisions d'ions lourds du LHC. À noter que le caractère attractif du LHC au niveau international ouvre des possibilités d'agrégation, pour un temps limité, des chercheurs de haut niveau. La convention récemment signée par le CNRS va dans le bon sens. Le thème des astroparticules est en plein essor, avec les projets AUGER ou HESS. Le CNRS est également bien impliqué dans les études des neutrinos, tant au Japon (super Kamiokande) qu'avec le projet près de la centrale de Chooz (Ardennes). Les études du fond cosmologique (récompensées par le Nobel 2006) sont très actives, avec le lancement prochain de la mission Planck.

La physique moléculaire trouve un nouvel essor dans ses applications terrestres (détection à distance par laser de polluants, de biomolécules en aérosols, étude de l'effet de serre, dynamique de formation des brouillards) mais aussi au niveau interstellaire. L'enjeu est d'accompagner les programmes spatiaux d'observation (HERSCHEL, IASI) qui vont fournir des quantités énormes de données à interpréter et analyser. La création d'une

étoile artificielle polychromatique par laser, couplée à l'optique adaptative, sera susceptible d'entraîner d'importants progrès dans la résolution des télescopes au sol.

On doit s'attendre, et encourager par les formes d'organisation et les moyens adéquats, à un fort développement de la simulation numérique, sur la modélisation de systèmes complexes nonlinéaires, les problèmes d'écoulements solides, et d'une façon générale les problèmes multi-échelles, qui incluent également chimistes et biologistes.

3.2 INTERFACE AVEC LA BIOLOGIE

Cette interface, encore embryonnaire il y a quinze ans, a littéralement explosé, et se retrouve active à tous les niveaux d'organisation du vivant. L'étude et la manipulation de molécules individuelles ont rendu possible l'observation en temps réel du fonctionnement biologique (enzymes, moteurs moléculaires). Les techniques d'imagerie (« champ proche », nanoparticules) permettent des performances hier impensables, telles que le suivi individuel d'une molécule au cours de son cheminement dans la cellule ou dans une synapse, la visualisation d'un réseau en action dans la cellule.

De nouvelles méthodes optiques d'imagerie (microscopie non-linéaire, tomographie cohérente et incohérente, à champ évanescents, etc.) offrent de nouvelles perspectives, tant en biologie que pour des applications médicales. La production de particules chargées très énergétiques par laser ultra-intense permettra d'ouvrir une nouvelle approche pour la protonthérapie. Le domaine des biopuces, déjà très utilisées en biologie et en médecine, poursuit développement, sous des formes originales.

À un niveau de complexité supérieur, la biologie cellulaire bénéficie de multiples approches relevant de la physique et de la chimie, qui permettent d'appréhender des processus comme l'adhésion cellulaire, la fusion

membranaire, la signalisation ou le transport. La reconstitution et l'auto assemblage de systèmes biomimétiques, domaine où s'exprime largement cette pluridisciplinarité, ouvre aujourd'hui de nombreuses voies d'application. Les systèmes multicellulaires, dont la dynamique de fonctionnement met en jeu de nombreux réseaux de signalisation et de régulation, peuvent aujourd'hui être abordés par une approche physique (populations neuronales, développement embryonnaire, régénération et différenciation tissulaire). La mécanique physique permet de modéliser la croissance ou l'évolution dans le cas du cancer de tissus dont les propriétés élastiques sont différentes de celles du milieu environnant. Des questions importantes de «bio-ingénierie» se développent, peut-être insuffisamment en France, impliquant des relations entre structure physicochimique et propriétés mécaniques (recherche sur le cartilage, ingénierie des tissus biologiques, etc.). Les réseaux biologiques (réseaux génétiques, ou de protéines) sont omniprésents dans la matière vivante et génèrent un grand nombre de boucles de régulation dans la cellule ou entre cellules. L'enjeu qui émerge clairement porte sur les systèmes ayant une multiplicité de niveaux d'organisation biologique dont le comportement global dépend de ces réseaux. Cette approche, que l'on appelle «biologie des systèmes», en fort développement à l'étranger, reste peu développée en France alors que des contributions importantes du domaine sont pourtant dues à des chercheurs français expatriés.

La physique apporte à ces études des méthodes, notamment optiques, mais aussi des concepts permettant de modéliser ces phénomènes.

Les mathématiciens, depuis longtemps intéressés aux modèles de populations (équations différentielles et aux dérivées partielles, systèmes dynamiques), se penchent de façon plus récente sur des problèmes de fonctionnement cellulaire, de phénomènes physio-pathologiques, de comportement d'organes. La simulation numérique s'avère particulièrement intéressante pour les phénomènes pathologiques, et demande la construction de méthodes de discréétisation efficaces. Les théories proba-

bilistes et statistiques sont également très présentes, comme pour l'analyse des réseaux complexes déjà cités. La génomique fait appel à des outils probabilistes (approche bayésienne) et à des algorithmes développés récemment (super vector machine) pour la classification des séquences biologiques.

Notons enfin que les chercheurs à cette interface ont un besoin fort en matière de bibliographie, et qu'un accès au site Bibliovie de l'INIST leur faciliterait considérablement leur travail.

4 – OUTILS ET MOYENS. AUTRES RECOMMANDATIONS

4.1 CALCUL NUMÉRIQUE

Nous l'avons dit, la modélisation devient un outil majeur en recherche fondamentale et appliquée, et émerge comme une nouvelle discipline entre théorie et expérience. Il est indispensable de soutenir le développement de codes de calcul, de reconnaître le travail particulier des chercheurs impliqués dans cette tâche, et de renforcer les groupes qui mènent des actions originales dans ce domaine. Cela doit passer par la formation de groupes d'une certaine taille, de noyaux d'excellence, plutôt que par l'embauche de chercheurs isolés.

Les projets de simulation nécessitent en particulier une forte interdisciplinarité (sciences physiques et biologiques, mathématiques, informatique) ; mais leur succès sera également renforcé par la diversité des origines (chercheurs du privé et du public) et la diversité des compétences (chercheurs, ingénieurs de recherche) au sein de différents groupements de recherche (contrats de recherche publique-privé, GDR, projets ANR) nationaux, mais aussi européens et internationaux. On gagnera à s'appuyer sur les communautés qui ont déjà

une grande expérience dans les calculs massifs et efficaces (météo, fusion, astrophysique, mécanique des fluides, etc.) L'incitation à la simulation numérique pourrait se faire par le biais de financements de thèses fléchées, ainsi que par une augmentation du nombre d'ingénieurs de recherche spécialisés en calcul scientifique (avec une meilleure coordination entre CNRS et universités), une aide à la mobilité temporaire des chercheurs vers l'industrie, tout en veillant à ce que cette mobilité ne nuise pas à leur carrière.

La simulation nécessite des moyens de calcul. Le nouveau centre de calcul intensif (GENSI) réunit le CINES (Montpellier), l'IDRIS (CNRS, Orsay), et les centres du CEA (DAM, CCRT, TERATEC). Le besoin en augmentation de puissance est criant, et les choix urgents à faire ne devraient pas intégrer des objectifs de soutien au constructeur national, retardant les équipements permettant d'être au niveau des meilleurs du top 500. Il serait probablement souhaitable de disposer d'un «environnement scientifique» au GENSI, qui dissémine les outils/techniques, potentiellement avec de l'open source (ce qui est fait aux «National Labs» américains par exemple); ceci permettrait en particulier d'encourager les laboratoires à utiliser et développer des «open sources», plutôt que d'utiliser des codes commerciaux «fermés».

En matière de stimulation d'initiatives de modélisation et simulation, qu'elles soient issues des composantes universitaires ou du CNRS (éventuellement en collaboration, avec des centres de recherche tels que le CERFACS ou avec l'industrie) le groupe ORAP a un rôle certain à jouer en tant qu'interlocuteur inter-établissement, ainsi que les groupes Calcul et le système d'archivage de logiciels CIEL (ce dernier permettant également un critère «scientométrique» en calcul scientifique).

4.2 INSTRUMENTS SCIENTIFIQUES

Ce chapitre traite en fait de trois types d'instruments scientifiques. La première partie

concerne le soutien à mettre en place pour le développement de l'instrumentation à l'échelle des laboratoires ; la seconde se place à un niveau de mutualisation plus important, de type «mi-lourd». La troisième se contente de rappeler brièvement des «grands instruments» nationaux, le temps nous ayant manqué pour la développer plus avant.

Instrumentation «de laboratoire»

Les exemples sont nombreux où le développement de nouveaux domaines fondamentaux de recherche est indissociable de percées instrumentales. En outre, l'instrumentation en particulier développée au MPPU joue également un rôle important comme «pourvoyeurs» d'instrumentation pour les autres disciplines, comme par exemple le domaine médical. De plus cette activité augmente le niveau technique général et a des implications économiques positives, par la création d'entreprises «high tech» permettant une diffusion efficace de l'instrument développé, et par ses liens avec des entreprises sous-traitantes de qualité. Cependant, cette activité est insuffisamment développée et valorisée en France. Nous proposons dans la suite quelques pistes pour revitaliser ce domaine.

En terme de soutien

Par une augmentation du soutien technique, en ciblant les lieux d'excellence dans ce domaine : les ITA sont essentiels au maintien et développement de l'instrumentation, qui nécessite une véritable synergie avec les chercheurs. Par une meilleure diffusion des innovations et des instruments à l'intérieur de la communauté française. Une aide au partage et à la diffusion des savoir-faire, ou à la duplication en quantité limitée (5 à 10) d'instruments à usage limités pourrait être précieuse. L'action de la MRCT et des réseaux en dépendant va dans ce sens et doit être soutenue et développée. Une partie du travail de réalisation doit probablement être sous-traitée, afin de développer un tissu solide d'entreprises

spécialisées. Ceci nécessite un effort financier particulier et structurel si ce choix est fait, car il faut avoir conscience que l'appel à la sous-traitance a pour conséquence l'absence de fonds pour la mise à niveau des ateliers des laboratoires et la perte de la capitalisation d'un savoir faire en interne. Enfin, nous soutenons le projet d'ANR « instrumentation » du département MPPU encourageant les projets instrumentaux risqués.

En terme de reconnaissance de cette activité

Inciter à ce que les thèses possèdent si possible une part d'instrumentation innovante, et que son caractère spécifique soit sérieusement pris en compte lors des concours de recrutement et des évaluations. Concernant les carrières et la valorisation : définir des indicateurs prenant en compte la reconnaissance de la réalisation instrumentale, les difficultés et la prise de risque encourues notamment quant à l'investissement en temps. Les efforts pour favoriser le transfert de connaissance et de technologie vers les entreprises ou vers d'autres laboratoires doivent faire partie de ces indicateurs.

Instruments mi-lourds

La sophistication et le prix croissants d'appareils mi-lourds (microscopes électroniques en transmission, spectroscopies, etc.) rendent leur implantation et leur développement de plus en plus difficiles à l'échelle des unités alors même que leurs performances nouvelles les rendent indispensables à une recherche compétitive. Il devient donc nécessaire de mettre en place une politique d'équipement et de fonctionnement de ces appareils, concrétée à l'échelle de plusieurs unités de recherche voire à l'échelle régionale pour certains appareils très hauts de gamme. Cela peut se concrétiser par une mutualisation d'un parc d'instruments ou la mise en place de plates-formes instrumentales. On pourrait s'inspirer du fonctionnement des plates-formes technolo-

logiques où travaux de collaborations de haut niveau et recherche et formation doctorale interne, permettent d'assurer un service de haute qualité couplé à une excellence de la recherche et du développement des techniques spécifiques aux instruments utilisés. Des programmes spécifiques de financement de ce genre platesformes (financement matériel et personnels) sont donc à prévoir.

D'autre part, il faut impérativement soutenir les équipements spécifiques, souvent fédérés, permettant de réaliser les expériences de physique extrême-haute pression, champs magnétiques intenses, phénomènes ultra-rapides, lasers à ultra-haute intensité, plasmas chauds, sans lesquels les avancées attendues dans de nombreux domaines stratégiques et très concurrentiels évoqués plus haut ne sauraient avoir lieu.

Grands instruments

Les grands instruments font partie du paysage incontournable de la physique expérimentale, tout autant dans ses aspects fondamentaux et appliqués que pour les thématiques à l'interface avec d'autres disciplines. Notre communauté abrite sur le territoire national, ou à sa frontière, des équipements performants, gérés à l'échelle nationale, européenne ou mondiale : Collisions aux hautes énergies (CERN à Genève), production d'ions lourds (GANIL à Caen), champs magnétiques intenses (champs continus à Grenoble, pulsés à Toulouse), sources de neutrons (ILL à Grenoble, LLB à Saclay), rayonnement synchrotron (ESRF à Grenoble, Soleil à Orsay-Saclay). À cela s'ajoutent des projets plus « dédiés », d'échelle comparable, comme le laser MégaJoule à Bordeaux, et maintenant la perspective d'ITER à Cadarache.

4.3 AUTRES RECOMMANDATIONS ET REMARQUES

Le CNRS est un acteur essentiel de la recherche fondamentale. Seul le maintien d'emplois stables de chercheurs, distribués sur la totalité du front de la connaissance, lui permettra de continuer à mener ses missions.

La France doit proposer des carrières scientifiques attractives, pour que ses meilleurs étudiants se tournent vers les métiers de la connaissance, et afin d'attirer des chercheurs étrangers renommés. Il convient de trouver un juste milieu entre la circulation des jeunes chercheurs après leur thèse et des situations de précarité prolongée. Le nombre de promotions CR1-DR2 et DR2-DR1 doit être sensiblement augmenté et un meilleur suivi de carrière des CR1 doit être mis en place.

La situation des ITA est préoccupante, avec des besoins importants dans certains secteurs, et l'urgence d'une revalorisation des carrières pour mettre en adéquation compétences professionnelles et grades effectifs. Dans la période à venir, avec de nombreux départs à la retraite, il faut créer des effets de biseaux à l'embauche dans certains secteurs, faute de quoi nous payerions à terme des pertes de connaissance et de savoir-faire.

Les activités aux interfaces entre disciplines, pourtant encouragées, peinent encore à être reconnues, en particulier au travers du découpage disciplinaire du CNRS. Un exemple concerne l'évaluation scientifique lorsque critères de jugement et modes de productions scientifiques diffèrent, comme par exemple à l'interface entre mathématiques et physique, où la mise en place de jurys mixtes, voire la création d'une CID « Interactions entre les Mathématiques et Physique-Théorique » mériteraient d'être discutés. Enfin, les équipes travaillant à l'interface souffrent souvent de la dispersion sur le territoire et d'une absence de masse critique. Il est nécessaire de soutenir les projets de GDR et de rencontres pour ces communautés, et d'inciter au développement des programmes interdisciplinaires à l'ANR.

Il convient d'être attentif à la place croissante des données scientométriques, tant pour les jugements individuels que pour les disciplines ou les organismes. Celles-ci doivent rester simplement indicatives pour les prises de décisions, et ne peuvent remplacer le débat contradictoire.

Les relations avec les autres organismes, et en particulier les universités, se sont renforcées ces dernières années. Il faut augmenter le nombre de délégations, parfois leurs durées, avec le cas échéant des croisements de sections. Il faut redonner des prérogatives au comité national (qui a la double connaissance des laboratoires et des personnels) pour juger de leur attribution. Il serait souhaitable que les universités soient plus ouvertes aux personnels CNRS dans leurs fonctionnements et prises de décisions, à l'instar du comité national.

La période récente accélère la transformation du paysage de la recherche avec la mise en place de l'ANR, des RTRA, de l'AERES. Cette modification n'étant pas (essentiellement) le résultat d'une concertation mûrie entre le pouvoir politique et le monde de la recherche, on assiste aujourd'hui à un effort d'adaptation à court terme de notre milieu à ces nouvelles modalités qui va conduire à des mutations profondes dans l'organisation de la recherche dans les années à venir. Un travail de prospective plus sérieux inviterait à se pencher sur leurs bienfaits, mais également leurs effets pervers.

Il conviendrait probablement de plus affirmer la place de la communauté scientifique dans le processus d'évaluation des CPER, qui peuvent impliquer le démarrage de très gros projets. Notre CSD entend bien mener cette réflexion pendant ses 4 années de mandat, et faire connaître ses avis et éventuelles recommandations. Nous pouvons déjà préciser quelques points de cette réflexion.

La politique du CNRS est largement fondée sur l'emploi statutaire et les budgets récurrents, l'organisme se trouvant sensiblement dessaisi par l'ANR des financements incitatifs, en matière d'équipements, mais également de post-docs (la création de l'ANR en a

certes sérieusement augmenté le nombre). Cette situation porte en germe le risque de déstabiliser l'organisation en laboratoires, du fait de la prise d'autonomie d'individus ou d'équipes, de privilégier une recherche sur programme court, et donc peu à même de soutenir les prises de risques, les travaux de longue haleine, ou les travaux de veille scientifique. Par ailleurs l'arrivée d'un contingent significatif de post-docs dans les équipes, tout en créant de nouvelles opportunités, va nécessairement modifier l'équilibre de ces

équipes et notamment le statut des jeunes chercheurs. Comment éviter l'inévitable découplage entre moyens financiers et humains ?

Les modalités de création de l'AERES sont plus inquiétantes, en ce qu'elles semblent sourdes à plusieurs revendications largement exprimées par le monde de la recherche : présence d'élus, transparence à tous les stades de l'évaluation, lien entre évaluation des unités et personnels, la participation de toutes les catégories de personnel, et donc les ITA.

