

02

Théories Physiques: Méthodes, Modèles et Applications

Présidente de la section

Claire Lhuillier

Membres de la section

Olivier Babelon
Constantin Bachas
Véronique Bernard
Elizabeth Bernardo
Thierry Dauxois
Sacha Davidson
Cédric Deffayet
Dominique Delande
Sébastien Descotes-Génon
Nicolas Destainville
Ulrich Ellwanger
Vincent Hakim
Malte Henkel
Véronique Jonnery
Jean-Loïc Kneur
Thierry Martin
Alberto Rosso
Christian Taggiasco
Emmanuel Trizac
Pierre Vanhove

Comme le disait Niels Bohr « Prediction is very difficult, especially about the future. ». Ainsi notre PDG, M. Fuchs, s'interrogeait sur l'utilité du rapport de conjoncture en 2006, alors qu'il était président de la section 13 du CoNRS. Il constatait que ces rapports sont systématiquement passés à côté de toutes les révolutions scientifiques...

La physique théorique a pour but l'élaboration d'un cadre conceptuel et mathématique, qui vise à décrire de façon unifiée la vaste diversité des phénomènes naturels observés. Cela veut dire, bien sur, la recherche des lois fondamentales du monde physique, mais aussi le développement de méthodes générales permettant d'analyser et de comprendre les phénomènes physiques dans toute leur complexité.

La section 02 « Théories physiques, méthodes, modèles et applications » ou plus simplement Physique Théorique regroupe des chercheurs représentants des domaines très variés de la physique, chacun enrichissant et bénéficiant à son tour des avancées venant d'autres thématiques. C'est cet échange permanent entre disciplines qui caractérise et justifie la section 02.

Initialement organisée autour de la physique des particules élémentaires, tous les aspects de la recherche fondamentale en physique sont maintenant représentés en section 02 ainsi qu'un certain nombre d'interfaces avec l'astrophysique, la biologie, les mathématiques, l'informatique... Si cette évolution de la physique théorique est générale dans le monde, elle est particulièrement marquée au CNRS et il convient de s'en féliciter.

La section 02 ne représente cependant pas l'ensemble de la physique théorique au CNRS. Des théoriciens sont aussi présents en particulier en sections 03, 04, 05, 06, 11 et 17, dans des laboratoires avec une forte composante expérimentale. Inversement, des expérimentateurs en physique non linéaire et en mécanique statistique, proches de la modélisation, font partie de la section 02. Ainsi le lien théorie-expérience demeure solide et constitue une richesse de la communauté française de physique théorique. Les fortes interactions de la physique théorique avec les mathématiques sont aussi importantes.

On peut regrouper les thématiques couvertes par la section 02 schématiquement en cinq grands domaines :

- physique des interactions fondamentales et cosmologie : structures et dynamique nucléaires, structure des hadrons, plasma de quark et gluons, physique des saveurs, extensions du modèle standard, cosmologie, astroparticules, théories de la gravitation et ondes gravitationnelles;
- physique mathématique : théorie des cordes, théorie quantique des champs, théories conformes et systèmes intégrables, systèmes dynamiques et équations aux dérivées partielles, mécanique statistique rigoureuse à

l'équilibre ou hors équilibre, processus stochastiques et géométrie aléatoire, chaos, matrices aléatoires;

– mécanique statistique et physique non linéaire : systèmes hors équilibre, milieux granulaires et matière molle, systèmes désordonnés et thèmes aux interfaces processus stochastiques, invariance conforme, physique non-linéaire, hydrodynamique, turbulence, physique des plasmas, un renouveau de la mécanique des solides et de la science des matériaux;

- matière condensée : systèmes unidimensionnels, effet Hall quantique fractionnaire, matériaux à forte corrélations quantiques, liquides de spins, q-bits quantiques, physique mésoscopique, information quantique, gaz atomiques ultra froids;

- physique et biologie : traitement des données et développement de nouveaux algorithmes, interactions moléculaires, physique de la cellule, assemblées cellulaires, mouvements collectifs et morphogénèse, réseaux, physique statistique et sciences humaines, neurosciences computationnelles.

1 - PHYSIQUE DES INTERACTIONS FONDAMENTALES ET COSMOLOGIE

Les Modèles Standards en physique des particules et cosmologie sont en accord avec un grand nombre d'observations. Il reste cependant des questions ouvertes, même dans le cadre de la physique des particules: dans le secteur des interactions fortes (QCD), la théorie manque de prédictions précises (ou analytiquement contrôlables) dans le domaine non-perturbatif du couplage fort; dans le secteur électrofaible, le mécanisme de Higgs, sous-jacent à la brisure spontanée de la symétrie électro-faible, reste encore à confirmer à l'heure actuelle.

De plus, ces modèles ne décrivent ni l'origine de la matière et énergie sombre, ni l'asymétrie baryonique de l'univers, ni les masses et mélanges observés pour les neutrinos. Enfin, ces théories soulèvent des questions plus profondes, telles que l'origine et les propriétés des trois familles de quarks et leptons et la violation de CP; l'origine des symétries de jauge; l'origine et propriétés du boson de Higgs; l'origine du Big Bang et de l'inflation en cosmologie; ainsi que la quantification de la gravitation.

Dans certaines théories "au-delà du Modèle Standard", on tente de répondre à une partie de ces questions (en profitant d'échanges d'idées avec la physique mathématique et physique statistique). On espère également que les expériences (en cours ou à venir) en physique des (astro-) particules et en astronomie donneront des indices cruciaux sur la nature de telles théories.

1.1 Structure et dynamique nucléaires

Les hadrons forment les noyaux atomiques selon des structures complexes. Ces dernières années de nombreuses expériences ont fait apparaître des phénomènes inattendus, déplacement ou disparition des nombres magiques, inversion de parité, halos et peaux de neutrons, brisures spontanées de nouvelles symétries,

nouveaux types de radioactivité, qui remettent en cause beaucoup des concepts traditionnels de la structure des noyaux. La compréhension des noyaux exotiques, noyaux loin de la stabilité, riches en protons ou en neutrons, permet de fournir des prédictions quantitatives pour les réactions intervenant dans les processus de nucléosynthèse. Un domaine à l'interface entre la structure nucléaire et l'astrophysique observationnelle connaît un développement important depuis quelques années : les modélisations des objets stellaires compacts, qui font appel aux théories nucléaires. Des travaux sur l'équation d'état de la matière nucléaire et de la matière de neutrons ont ainsi mis en évidence des propriétés superfluides des objets stellaires. L'ensemble de ces domaines a vu l'émergence ces dernières années de calculs ab-initio.

Les physiciens nucléaires français se sont beaucoup investis dans le développement de techniques microscopiques afin de décrire les propriétés des noyaux. Avec les données obtenues avec les faisceaux radioactifs SPIRAL et prochainement SPIRAL2 à GANIL, ces méthodes sont étendues pour mieux décrire les états et systèmes exotiques. Un grand effort est mis également dans le développement d'une théorie de type fonctionnelle de la densité d'énergie. D'autre part, comprendre les noyaux nécessitent d'avoir une très bonne connaissance de l'interaction nucléaire. Un des objectifs est de déterminer des paramétrisations de l'interaction effective capable de décrire aussi bien les propriétés globales des noyaux que les différents types de corrélation dont ils sont le siège. De plus, l'interaction nucléon-nucléon est maintenant obtenue à partir de QCD en utilisant une théorie effective chirale. Sa dépendance d'échelle nécessite l'utilisation des méthodes du groupe de renormalisation pour construire un potentiel dit mou à deux ou trois nucléons.

1.2 Structure des hadrons

A basse énergie, dans le régime non-perturbatif, il semble impossible de résoudre la QCD analytiquement. Toutefois on peut exploiter ses symétries et construire une théorie effective équivalente à QCD dans ce domaine d'énergie, la théorie chirale des perturbations dont les degrés de liberté ne sont plus les quarks et les gluons mais les pions, les kaons et les nucléons. Une autre façon de procéder est de discrétiser l'espace-temps pour résoudre numériquement QCD sur réseau. Des machines de plus en plus puissantes, de meilleurs algorithmes et des types d'action nouveaux ont donné lieu à de récents progrès : les masses des quarks légers sont à présent proches des valeurs physiques (en particulier pour le quark étrange), les effets de volume et de maille finis sont mieux maîtrisés, tandis que les simulations incluent à présent des quarks de la mer (se libérant de l'approximation « quenched »). La précision des déterminations de quantités hadroniques en QCD sur réseau va devenir dans les prochaines années une question cruciale pour des tests précis du Modèle Standard par le biais des transitions hadroniques (voir Physique des saveurs plus loin). La communauté française en QCD sur réseau est impliquée activement dans plusieurs collaborations à l'échelle européenne pour mettre en commun puissance de calcul, configurations de jauge et outils d'analyse, mais aussi pour concevoir en

partenariat avec des ingénieurs et des informaticiens les machines et les logiciels les mieux adaptés pour résoudre ces problèmes.

Un certain nombre de propriétés des mésons et des baryons a ainsi été obtenu par ces méthodes et les calculs sont actuellement étendus au cas des résonances, principalement motivés par les programmes expérimentaux à JLAB, ELSA, COSY et MAMI. Expérimentalement on utilise des sondes hadroniques et leptoniques et la mesure des réactions exclusives (réactions où l'état final hadronique est détecté) est maintenant possible. On peut ainsi avoir des informations sur les diverses contributions au spin du proton. Parmi les autres quantités intéressantes se trouvent les distributions de partons (quarks et gluons) généralisés qui permettent de comprendre l'ensemble des caractéristiques non-perturbatives du nucléon et certains de ses processus exclusifs.

La physique hadronique s'intéresse également à la spectroscopie de l'interaction forte : pourquoi la plupart des hadrons apparaissent soit comme des états à trois quarks (baryons) soit comme des états à un quark et un anti-quark (mésons). Des expériences récentes dans les usines à B ont remis en question cette image simple en mettant en évidence une spectroscopie d'états exotiques, et une importante activité théorique a été déployée sur ce sujet (QCD sur réseau, théories effectives). L'expérience PANDA auprès du nouvel accélérateur FAIR dont le fonctionnement est prévu pour 2012, cherchera de nouvelles formes de matière, particules uniquement formées de gluons ou encore particules hybrides formées de quarks et de gluons.

Enfin, un dernier pan de l'activité théorique concernant l'interaction forte est l'étude de QCD à haute énergie. En effet, cette discipline jouera un rôle très importante dans la compréhension des collisions hadroniques à très haute énergie du LHC, où le bruit de fond lié à l'interaction forte doit être analysé de façon précise pour isoler les collisions pertinentes où de nouvelles particules sont produites. Cela nécessite et suscite d'importants progrès sur le plan théorique : identification des processus en jeu, utilisation et limites des approches de factorisation, calculs perturbatifs à ordre élevé, formalisme des amplitudes d'hélicité, resommation de la théorie de perturbations dans des configurations cinématiques donnant de larges contributions... En parallèle, des questions plus phénoménologiques, importantes pour le LHC, sont actuellement en plein essor, dans le domaine des simulations Monte-Carlo et des algorithmes de jets.

1.3 Plasma de quarks et de gluons

Les collisions d'ions lourds sont utilisées afin de porter, de façon transitoire, la matière aux hautes densités d'énergie nécessaires pour permettre la formation d'une matière de quarks et de gluons, différente de la matière hadronique usuelle. On s'attend à observer à un certain stade un plasma de quarks et de gluons, similaire à celui rencontré aux premiers instants de l'Univers. Un résultat étonnant a ainsi été obtenu à RHIC, en effet cette matière se comporte plus comme un liquide que comme un gaz. Les énergies plus élevées mises en jeu au LHC avec

l'expérience ALICE permettront d'étendre le domaine d'étude à des densités d'énergie extrêmes. Lorsque l'énergie diminue une transition de phase vers la matière hadronique se produit. Plusieurs équipes françaises sont impliquées dans l'étude de ces questions, tant au niveau expérimental que théorique.

Les sujets d'étude dans ce domaine sont en effet nombreux: thermalisation de la distribution initiale de la matière pour former le plasma, rôle des instabilités, caractérisation du plasma et de ses propriétés thermodynamiques, nature de la transition de phase de déconfinement et de restauration de la symétrie chirale, diagramme de phase. Pour étudier un problème d'une telle complexité, les méthodes mises en jeu sont multiples et font appel à différents domaines de la physique et à des approches analytiques aussi bien que numériques: théorie des champs à température et densité finie, théorie des cordes et correspondance AdS/CFT (pour étudier le régime de couplage fort), calculs sur réseau ab initio, théorie cinétique, hydrodynamique visqueuse.

1.4 Physique des saveurs

La physique des saveurs cherche à comprendre l'origine des interactions qui différencient les six types (ou saveurs) de fermions (quarks et leptons), et d'étudier leur phénoménologie. Dans le cadre du Modèle Standard, ces différences proviennent des interactions des fermions avec le boson de Higgs. Elles sont donc liées (a) à la hiérarchie des masses des fermions, (b) à la brisure de la symétrie électrofaible, qui détermine les propriétés de l'interaction faible et (c) aux propriétés de l'interaction forte dans le cas des quarks.

L'information sur les transitions faibles chargées peut être encodée dans deux matrices de mélange, l'une pour les quarks (de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa), l'autre pour les leptons (de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata). Un effort théorique et expérimental remarquable a permis de confirmer récemment que la matrice de mélange des quarks, de structure nettement hiérarchique, décrivait précisément les transitions entre les différents saveurs (en particulier grâce aux expériences Babar et Belle). Le phénomène d'oscillations a prouvé que les neutrinos sont massifs (un premier signe de physique au-delà du Modèle Standard), deux des angles de la matrice de mélange des leptons se sont avérés proches de 1 ($\pi/4$ et $\pi/6$), tandis que le troisième est nettement plus petit (en-dessous de $0,1$).

Les activités théoriques du domaine seront fortement liées aux résultats expérimentaux attendus dans les prochaines années. La précision des observations sera en particulier améliorée grâce à deux expériences du CERN (LHCb et NA62), le démarrage de l'expérience BESIII à Beijing, et la mise en place des expériences Belle-II et SuperB. Ces expériences ont pour objectif d'étudier des processus très sensibles à une nouvelle physique au-delà du MS (désintégrations rares du K et du B, dynamique du charme) ou de tester la matrice de mélange des quarks dans des secteurs nouveaux (mélange et désintégrations du méson Bs, dynamique du méson Bc).

L'expérience MEG mesure des transitions violant la saveur dans le secteur des leptons chargés, qui constitueraient une preuve incontournable de nouvelle physique. Plusieurs expériences (dont double Chooz sur réacteur, et T2K sur faisceaux) vont déterminer les paramètres manquants de la matrice de mélange des leptons, tandis que des détecteurs aux sensibilités accrues (dont SuperNEMO) étudieront les désintégrations double beta sans neutrino, afin de mettre en évidence un éventuel caractère de Majorana des neutrinos, les singularisant comme les seuls fermions constituant leur propre antiparticule et fournissant une explication à leur masse très faible.

Cette activité expérimentale fournira naturellement plusieurs axes de recherche. Les mesures de précision sur les transitions dans le secteur des quarks, soumis à l'interaction forte, nécessiteront un contrôle rigoureux des incertitudes hadroniques, obtenu grâce aux progrès des simulations de QCD sur réseau (voir ci-dessus) et des théories effectives.

Deuxièmement, dans le Modèle Standard à trois générations de fermions, c'est l'interaction faible qui contient les sources de violation de CP (asymétrie entre particule et antiparticule) apparaissant comme des phases dans les matrices de mélange. Les mesures de la phase apparaissant dans la matrice de mélange des quarks montrent que la violation de CP dans ce secteur est insuffisante pour expliquer la prépondérance de la matière sur l'antimatière observée dans l'Univers actuel. Le secteur leptonique pourrait produire naturellement un tel excès cosmologique à l'aide des phases de la matrice de mélange des leptons avec une extension minimale du Modèle Standard (via un mécanisme «de balançoire»), qui est donc l'objet d'une intense activité théorique.

Troisièmement, les transitions neutres d'une saveur à une autre sont petites dans le Modèle Standard, et possèdent donc une sensibilité quantique à de nouvelles particules virtuelles de masse de l'ordre du TeV et au-delà. Elles placent ainsi des contraintes très fortes sur l'échelle de la nouvelle physique et/ou l'espace des paramètres acceptable pour des extensions du Modèle Standard. La mise en relation des contraintes issues de la physique des saveurs et des observations des expériences à grand-pT du LHC et de Fermilab constituera certainement une activité importante des théoriciens français du domaine dans les prochaines années.

1.5 Extensions du Modèle Standard

La mise en opération du LHC marque le début d'une ère sans précédent pour la physique des particules, avec la perspective d'explorer en détail l'échelle d'énergie du TeV pertinente pour la brisure de la symétrie électrofaible, et de révéler non seulement l'origine de cette brisure mais toute une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard.

La première tâche des expériences auprès des grands accélérateurs comme le Tevatron et le LHC est sans doute la confirmation et la vérification du secteur de Higgs: la mesure de la masse et des couplages du boson de Higgs et éventuellement la découverte d'un nombre plus élevé de tels bosons donneraient des informations précieuses

sur des extensions plausibles du Modèle Standard, typiquement reliées au secteur de Higgs. Pour cela une bonne compréhension des différents signaux du boson de Higgs et de ses propriétés est nécessaire. Ces études sont effectuées par les phénoménologues dans plusieurs laboratoires en France, souvent en collaboration étroite avec des expérimentateurs.

Les théories ``au-delà du Modèle Standard'' les plus étudiées sont: la supersymétrie; les théories à dimensions spatiales supplémentaires; les théories de nouvelles interactions fortes à une échelle de l'ordre du TeV. Dans tous ces scénarios de nouvelles particules (outre le boson de Higgs) sont prédites, mais ces prédictions ne sont pas uniques. Les masses, mais aussi les nombres quantiques de ces nouvelles particules, dépendent largement des détails des modèles. Ces particules devraient éventuellement être produites auprès des grands accélérateurs: des ``sparticules'' (super-partenaires des quarks, des leptons et des bosons de jauge) en supersymétrie, des états de Kaluza-Klein pour les modèles à dimensions supplémentaires, ou encore de nouveaux états liés dans le cas de nouvelles interactions fortes. Ces deux derniers scénarios peuvent aussi mener à des modèles sans boson de Higgs.

Une question importante concernant les modèles supersymétriques est de préciser le mécanisme précis encore assez mystérieux à l'origine de la nécessaire brisure de la supersymétrie. Cette brisure pourrait être reliée à la (super)gravité; ou à des interactions de jauge, ou encore à des mécanismes plus complexes dans le cadre de dimensions supplémentaires. Ces questions sont étudiées activement par plusieurs équipes françaises, qui abordent également des aspects plus formels ``au-delà du Modèle Standard'': en effet la supersymétrie et les dimensions supplémentaires sont en partie motivées par les théories des supercordes, et une activité importante concerne la construction de modèles réalistes dans ce cadre, avec compactification des dimensions supplémentaires, par exemple avec des ``flux'' de champs tensoriels et/ou de D-branes, en essayant de réaliser la brisure spontanée de la supersymétrie, et si possible une constante cosmologique suffisamment petite.

Au LHC on espère pouvoir vérifier (ou infirmer) une large gamme de modèles, mais un nouvel accélérateur e+e- (ILC, International Linear Collider) sera sans doute nécessaire pour clarifier la situation. D'autre part la détection directe de nouvelles particules n'est pas le seul moyen de validation de théories ``au-delà du Modèle Standard'': il est également nécessaire de tester les prédictions d'une telle théorie pour des observables telles que les désintégrations rares (de leptons et de quarks lourds), mesurées avec une précision élevée dans certaines expériences actuelles ou à venir. De plus, ces théories donnent des prédictions sur les propriétés de la matière sombre. Ainsi de nombreuses études phénoménologiques sont essentielles pour rendre possible l'interprétation de données par les modèles. Notamment la prédiction précise de nouveaux processus dans le cadre de ces différents modèles nécessite le développement d'outils analytiques et numériques sophistiqués, et adaptés à l'environnement d'un collisionneur tel que le LHC, ou bien également pour

prédire les observables pertinentes à la problématique de la matière sombre, et la communauté française joue un rôle très actif dans tous les domaines de ces analyses, avec une interaction étroite entre expérimentateurs et théoriciens.

1.6 Cosmologie

Depuis plusieurs années la cosmologie vit une révolution tant sur le plan théorique qu'observationnel. En effet, l'observation des fluctuations de température du Fond Diffus Cosmologique (CMB), les relevés des grandes structures de l'Univers ainsi que les observations des supernovae de type Ia, ont, par leur précision sans précédent, permis d'affiner le modèle cosmologique standard fondé sur la Relativité Générale, et d'inférer dans ce cadre, avec un degré de confiance jamais acquis auparavant, la présence d'énergie noire et de matière noire dans l'Univers. Les observations du CMB ont en outre ouvert une nouvelle fenêtre en cosmologie primordiale. Ces dernières années ont vu une intense activité théorique allant de pair avec les grandes expériences, activité dont la France a pris une part importante.

Pour ce qui concerne la cosmologie primordiale, lieu naturel de rencontres entre physique des hautes énergies et physique gravitationnelle, l'activité de la communauté française a concerné notamment, en lien avec les résultats à venir et les équipes de l'expérience PLANCK, où la France joue un rôle majeur, l'étude des fluctuations primordiales dans le cadre des modèles d'inflation, et particulièrement l'étude des non-gaussianités. De nouvelles signatures observationnelles des périodes de « pre-heating », de « re-heating » ainsi que de la transition électro-faible ont été également proposées. Celles-ci pourraient être mises en évidence par les observatoires d'ondes gravitationnelles. Les théoriciens français ont aussi pris une part importante à l'étude de nouveaux modèles d'inflation issus de la théorie des supercordes, à celle des cordes et supercordes cosmiques ainsi qu'à celle de modèles de cosmologie quantique notamment dans le cadre des idées de « paysage » de la théorie des cordes.

Une intense activité théorique a été engendrée par la récente observation de l'expansion accélérée de l'univers qui concerne principalement l'histoire récente (au sens cosmologique) de l'Univers. Cette accélération s'interprète dans la cadre du modèle cosmologique standard, par la présence d'énergie noire (ou d'une constante cosmologique non nulle). Des travaux ont été menés pour étudier l'influence d'éventuelles interactions de l'énergie noire avec la matière noire. Une autre voie, où les théoriciens français ont également joué un rôle important, est l'étude théorique et phénoménologique de modèles alternatifs où la gravitation est modifiée à très grande distance. Il s'agit notamment des modèles de type caméléon, de modèles avec des dimensions supplémentaires ou encore de la « gravitation massive ».

1.7 Astroparticules

Les théoriciens français sont impliqués dans l'étude de la matière noire dont l'identité reste mystérieuse, bien qu'elle constitue la majeure partie de la matière non relativiste de l'Univers. De nombreuses expériences essaient de cerner la nature non-baryonique de cette matière, soit quand elle se désintègre et produit un rayonnement détectable par des télescopes gamma comme HESS (pouvant détecter les produits de l'annihilation ou la désintégration de la matière noire), soit par des effets de lentille gravitationnelle, soit encore par la recherche directe d'interactions de cette matière noire avec un détecteur à faible bruit, comme Edelweiss (situé dans l'environnement propice du Laboratoire Souterrain de Modane).

Du côté théorique, plusieurs modèles ont été proposés, faisant notamment appel à des extensions supersymétriques du Modèle Standard des particules, mais aussi des modèles « Little Higgs », ou des modèles de dimensions supplémentaires. Des chercheurs français sont actifs dans le développement de logiciels permettant de calculer la densité relique de matière noire. Si les soupçons actuels d'événements en détection directe se confirment, ces travaux constitueront un point de contact avec la physique des hautes énergies à un moment où les premiers résultats du LHC sont attendus et devraient éclairer ces problèmes d'un jour nouveau. Dans tous ces efforts, les avancées théoriques sont liées aux progrès expérimentaux et la communauté française est fortement engagée dans les deux directions.

Par ailleurs, des traces de la physique fondamentale nous arrivent du cosmos sous forme de particules variées aux énergies étalées sur 25 ordres de grandeur. Ces signaux sont étudiés par plusieurs expériences comme PLANCK (fond cosmologique à température presque nulle) et AUGER (rayons cosmiques de ultra-haute énergie). Des théoriciens français sont impliqués dans ces expériences en s'intéressant à la physique fondamentale qu'on peut extraire de ces données (telle l'identité de la matière noire), et aussi aux questions astrophysiques attenantes (comme le taux de naissance des étoiles à travers les âges). Les études récentes du flux de neutrinos émis par une supernova suggèrent qu'une telle explosion dans notre galaxie pourrait nous en apprendre plus sur le mécanisme d'explosion des supernovae, et déterminer certaines propriétés des neutrinos.

1.8 Théories de la gravitation et ondes gravitationnelles

Dans le domaine de la gravité classique, outre les travaux évoqués plus haut qui concernent la cosmologie, les théoriciens français jouent un rôle important dans l'étude et le suivi des tests de la relativité générale via diverses observations (pulsars binaires, observations dans le système solaire), ainsi que dans les calculs liés aux observatoires, tels que VIRGO ou LIGO, qui cherchent actuellement à obtenir une détection directe d'ondes gravitationnelles. Une telle détection serait une confirmation

importante de la relativité générale. Une activité théorique est également en développement autour du futur observatoire LISA, dont la France est partie prenante. Ces travaux concernent la préparation de l'analyse du signal, via des calculs liés aux émissions d'ondes gravitationnelles par des objets astrophysiques, que ce soit par des calculs analytiques ou par des méthodes numériques.

L'interaction gravitationnelle et le problème de sa quantification suscitent de nombreux efforts théoriques où la communauté française est impliquée. Différentes approches sont suivies, principalement en France autour de celles de la théorie des supercordes/théorie M, mais aussi de celles de la gravité quantique en boucle ou des mousses de spins. Si ces approches, en particulier celles liées à la théorie des cordes, concernent pour l'instant principalement la physique mathématique (voir plus loin), elles viennent également apporter des idées dans certains des domaines plus phénoménologiques (décrits ci-dessus). Un effort théorique est mené notamment pour construire des modèles réalistes incluant par exemple la supersymétrie, le nombre correct de familles, etc. ou encore utiliser la théorie des cordes pour décrire certains aspects de l'interaction forte.

2 - PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

La physique théorique fait appel à de nombreuses méthodes et concepts mathématiques. Souvent, ces notions font appel à des progrès récents, en cours, ou à découvrir en mathématiques.

Cependant à côté du développement de nouvelles descriptions mathématiques de la réalité physique, les efforts pour comprendre, voire démontrer rigoureusement, les comportements prédits par des théories munies d'un cadre mathématique déjà précisé sont parmi les sujets traditionnels de la physique mathématique. Là où les solutions exactes ou numériques sont difficiles ou impossibles à obtenir, les méthodes de l'analyse mathématique sont souvent la source de progrès importants, surtout quand il s'agit de trouver des réponses qualitatives.

Nous exposons ici les directions de recherche les plus actives développées par les chercheurs de la section 02 en physique mathématique. Selon la dominante des mathématiques utilisées, il est commode de distinguer une direction plus géométrique et algébrique et une autre plus analytique. La théorie des cordes, les théories conformes ou les systèmes intégrables appartiennent à la première, alors que les développements sur les systèmes dynamiques, les équations non linéaires aux dérivées partielles, la mécanique statistique à l'équilibre ou hors équilibre appartiennent à la seconde.

2.1 Théorie des cordes

Ces quatre dernières années ont vu le développement des applications de la correspondance AdS/CFT, des contraintes sur les compactifications de la théorie des cordes, l'analyse des degrés de liberté

des trous noirs microscopiques et des théories de jauge perturbatives. Ces progrès se situent souvent à l'interface avec d'autres domaines de la physique fondamentale et des mathématiques, indiquant l'aspect universel des idées issues de la théorie des cordes.

La correspondance AdS/CFT propose une description gravitationnelle classique de certains systèmes physiques fortement couplés, et qui n'étaient pas jusqu'à présent accessibles à une étude analytique. Le modèle le plus étudié, en particulier grâce à la découverte de symétries cachées et de structures intégrables, est la théorie de Yang-Mills avec supersymétrie maximale à quatre dimensions. Mais la correspondance peut s'appliquer au-delà du cadre initial de cette théorie, et des développements récents ont montré la pertinence de cette description duale pour des phénomènes tels que le plasma de quarks et gluons ou, de façon plus spéculative, pour des systèmes de fermions fortement corrélés en matière condensée.

À l'interface avec les mathématiques, l'analyse des degrés de liberté microscopiques des trous noirs se fait facilement lorsque ceux-ci préservent beaucoup de supersymétries. Dans les théories avec moins de supersymétries, l'espace des paramètres des trous noirs présente des zones de stabilité séparée par des plans, ou murs. La traversée des plans donne lieu à des phénomènes de désintégrations. L'évaluation de l'intégrale de chemin sur toutes les configurations contribuant à l'entropie d'un trou noir se trouve compliquée par ces phénomènes. Les progrès récents accomplis par M. Kontsevich et Y. Soibelman dans l'analyse des propriétés mathématiques des zones de stabilité seront sûrement centraux pour une compréhension complète de ces phénomènes. De façon plus générale, l'analyse des symétries discrètes de la théorie de cordes, dont on ne perçoit actuellement qu'une petite partie, reste un domaine fertile de recherche à l'interface entre physique et mathématiques.

Grâce à une compréhension accrue du rôle de la supersymétrie et de l'intégrabilité dans les calculs perturbatifs en théorie de jauge et de supergravité, il est été possible d'évaluer un grand nombre d'amplitudes en diverses dimensions et pour diverses configurations des états externes, pertinentes pour la physique des particules. Pour accomplir ces calculs, il a été nécessaire de mettre à jour des symétries inattendues des amplitudes en théorie de jauge, et ces progrès permettent l'évaluation numérique d'un grand nombre de quantités pertinentes pour la physique du LHC.

Enfin, l'analyse et la construction de solutions de la théorie des cordes s'approchant de la physique du modèle standard sont toujours en plein développement. Des structures géométriques qui incorporent les flux et les symétries de dualité jouent un rôle important sur le plan à la fois théorique et phénoménologique.

2.2 Théorie quantique des champs, théories conformes et systèmes intégrables

La théorie des champs conformes et celle des systèmes intégrables font partie des grands succès de la physique mathématique moderne. Leur étude se poursuit très activement.

Les théories conformes bidimensionnelles décrivent à la fois des phénomènes critiques et des solutions classiques de la théorie de cordes. Des méthodes algébriques puissantes ont permis de classifier les théories rationnelles, et de calculer le spectre de dimensions conformes et les fonctions de corrélation. Mais plusieurs directions de recherche restent ouvertes: (1) les théories non-compactes, dont l'exemple type est la théorie de Liouville, ne sont que partiellement comprises; (2) les théories logarithmiques, qui apparaissent comme limites critiques de certains modèles de mécanique statistique comme la percolation, ne peuvent pas être étudiées avec les outils disponibles à présent; (3) les observables non-locales -- opérateurs de défaut ou courbes SLE -- restent l'objet d'études intensives. Par ailleurs, la théorie de cordes et la correspondance AdS/CFT ont ouvert une fenêtre sur les théories conformes à plus de deux dimensions, pour lesquelles les outils bidimensionnels (algèbres infinies, groupes de tresses, etc.) ne sont pas adaptés.

En mécanique statistique, l'invariance d'échelle est à la base de toute approche moderne afin de comprendre le comportement collectif des systèmes avec un très grand nombre de degrés de liberté, interagissant fortement entre eux. Son extension vers l'invariance conforme rend accessibles les outils mathématiques précédents. Leur application en physique statistique, dans la matière condensée, ou encore dans la théorie des cordes et la physique des particules élémentaires à très hautes énergies, a ouvert des avenues novatrices. Parmi les avancées majeures récentes figurent la description de structures géométriques fluctuantes comme on les rencontre dans des interfaces critiques ou bien l'étude des systèmes désordonnés bidimensionnels ou la turbulence bidimensionnelle. L'adaptation de l'invariance conforme hors de son contexte d'origine produit également des nouvelles idées en dynamique hors d'équilibre, notamment dans l'étude des verres et en vieillissement physique. Des progrès futurs dépendront aussi d'une interdisciplinarité renforcée, en particulier avec les méthodes probabilistes, mais aussi avec celles provenant de la physique non linéaire et de la théorie des matrices aléatoires et des problèmes de combinatoire reliés.

Pour les systèmes intégrables, des avancées sur le calcul des fonctions de corrélation, principalement réalisées en France, ouvrent de nouvelles perspectives. Les applications multiples génèrent à leur tour un approfondissement de la compréhension de ces systèmes. La place centrale des systèmes intégrables dans la correspondance AdS/CFT a déjà été mentionnée. Des progrès récents dans le domaine des matrices aléatoires montrent une convergence des méthodes toujours plus étroite avec les systèmes intégrables. Des applications inattendues à des

problèmes de combinatoire se développent rapidement. Dans tous ces domaines, les chercheurs français jouent un rôle de premier plan.

La mécanique statistique et la matière condensée apportent une grande variété de nouvelles applications où l'accent est mis maintenant sur les phénomènes hors équilibre et les phénomènes de transport. Les résultats récents sur les fonctions de corrélation auront un impact immédiat dans ces domaines traditionnels d'applications des théories conformes et des systèmes intégrables.

En théorie quantique des champs perturbative, de nouveaux outils puissants (algèbres de Hopf) sont apparus, qui permettent de reformuler la théorie de la renormalisation et d'entrevoir de nouveaux développements. Ces techniques trouvent naturellement de nouveaux domaines d'applications comme la renormalisation des modèles en espace courbes ou non commutatifs.

Le problème de la quantification de la gravité suit deux approches : l'une est la théorie des cordes qui contient intrinsèquement une description de la gravitation et qui a déjà passé certains tests de cohérence comme, par exemple, la finitude perturbative, l'absence d'anomalies, le calcul de l'entropie microscopique des trous noirs. Une autre approche est la gravité quantique à boucles (LQG) qui est un programme visant à quantifier la gravitation en préservant les symétries classiques de difféomorphisme de la relativité générale selon une approche hamiltonienne des systèmes contraints. La quantification de tels systèmes contraints est difficile et fait appel à un formalisme mathématiquement sophistiqué. Afin de contourner les difficultés associées à la quantification de la contrainte hamiltonienne, et de s'assurer que la limite classique permette de retrouver la relativité générale, un formalisme de mousse de spins décrivant la propagation dans l'espace temps d'états de graphes colorés est développé. Certaines applications à la cosmologie et aux calculs des états microscopiques des trous noirs ont été considérées récemment.

2.3 Systèmes dynamiques et équations aux dérivées partielles

Les méthodes de l'analyse mathématique continuent à jouer un rôle très important dans l'étude des équations non linéaires aux dérivées partielles de la physique. Étant donné leur place centrale en physique les domaines concernés sont très divers et il faut se reporter aux chapitres adéquats dans ce rapport de notre section, ainsi qu'aux contributions des autres sections concernées pour des descriptions plus détaillées. Ceci concerne aussi bien la relativité générale où des résultats nouveaux ont été obtenus sur la dynamique de trous noirs, que la physique des plasmas où la naissance des singularités et les effets subtils de dissipation non linéaire ont été élucidés récemment par des mathématiciens. Les questions fondamentales sur l'existence des singularités dans les équations d'Euler ou de Navier-Stokes restent cependant ouvertes malgré des progrès récents dans le domaine complexe.

L'effort de pluridisciplinarité de la fin du XX^{ème} siècle dans le domaine du chaos a fourni des outils utilisés par les mathématiciens d'une part, les scientifiques intéressés par les applications d'autre part. Du point de vue des mathématiques, il faut mentionner la très fructueuse activité qui se poursuit en France dans le domaine des systèmes dynamiques différentiables. Du point de vue des applications, citons les importantes études sur la stabilité du système solaire, ou encore des applications à la géophysique.

2.4 Mécanique statistique rigoureuse à l'équilibre ou hors équilibre

Une autre direction traditionnelle de la physique mathématique étudie la mécanique quantique non relativiste des systèmes à grand nombre de corps. Ici beaucoup d'activités récentes concernent la validation rigoureuse des descriptions effectives du type champ moyen dont l'intérêt a été renforcé récemment par les expériences sur les atomes froids et la condensation de Bose-Einstein. Des résultats rigoureux sur l'existence du condensat dans les pièges et sur sa dynamique ont été obtenus récemment.

Les travaux sur la modélisation et l'analyse des systèmes quantiques ouverts rejoignent ceux sur l'analyse de systèmes classiques hors d'équilibre par exemple dans les avancées importantes sur le fondement des approches cinétiques ou dans les démonstrations des comportements diffusifs à grandes échelles dans les systèmes-modèles. Dans la mécanique statistique hors d'équilibre, des résultats mathématiques importants ont été obtenus par la combinaison de méthodes probabilistes et de solutions exactes, sur la statistique des fluctuations dans des systèmes simples étendus avec des interactions aléatoires.

La recherche mathématique sur les systèmes avec désordre continue à faire des progrès aussi bien dans l'analyse des propriétés dynamiques que dans celles de l'équilibre dans le prolongement des avancées importantes des années précédentes.

2.5 Processus stochastiques et géométrie aléatoire

Le mouvement brownien est un objet fondamental de la physique théorique moderne et il a permis d'expliquer beaucoup d'effets observés dans les systèmes physiques. Décrire les propriétés de persistance et les probabilités des valeurs extrêmes sont des questions ouvertes dans la physique statistique et dans les mathématiques appliquées, notamment dans la théorie des matrices aléatoires. De même, comprendre la nature de courbes ou trajectoires aléatoires est un problème récurrent en physique et en mathématique. Depuis une dizaine d'années, des progrès significatifs ont été obtenus dans leur description dans le cas où ces courbes manifestent une propriété d'invariance conforme, suite à la découverte de processus stochastiques adaptés (processus SLE, découvert par O. Schramm) et de leurs liens avec la physique statistique des systèmes

critiques bidimensionnels.

L'introduction de ces processus SLE a abouti à une description rigoureuse des interfaces critiques bidimensionnelles et a conduit à l'introduction d'outils et d'un langage probabilistes au sein des théories champs conformes. Bien que notre connaissance des processus SLE soit maintenant assez profonde, de nouvelles directions de recherche émergent : la description des courbes aux voisinages des points critiques est aujourd'hui encore embryonnaire, le lien entre ces courbes aléatoires et la théorie des surfaces aléatoires (gravité bidimensionnelle) reste à développer.

Plus généralement le mouvement brownien est aujourd'hui utilisé dans plusieurs domaines de la science pour comprendre le comportement des marchés financiers, la dynamique de molécules complexes à l'intérieur de la cellule ou encore les stratégies de recherche de nourriture des animaux. Pour décrire les fluctuations dans ces systèmes, il est souvent nécessaire d'aller au delà du monde brownien et comprendre les effets liés aux corrélations et aux milieux hétérogènes.

2.6 Chaos, matrices aléatoires

La théorie des matrices aléatoires a des applications physiques abondantes, allant de la physique nucléaire et atomique à la matière condensée, la physique statistique et des hautes énergies et la gravité quantique, et continue de susciter beaucoup d'activités. Les travaux récents sur les matrices aléatoires revêtent un caractère plus analytique avec l'analyse des ensembles sans symétries particulières et des résultats difficiles sur l'universalité de leurs comportements ont été obtenus en mathématiques. La pertinence de la théorie des matrices aléatoires pour décrire les systèmes quantiques chaotiques et/ou désordonnés est maintenant bien établie. Des résultats marquants ont été obtenus sur les statistiques des valeurs extrêmes, dans différents ensembles plus ou moins conventionnels de matrices aléatoires. Beaucoup de phénomènes physiques étant gouvernés par des grandes fluctuations, cela pourrait se révéler fécond en physique statistique des événements rares ou loin de l'équilibre. Une autre direction très dynamique, liée aux grandes matrices, concerne les limites continues des applications fluctuantes.

3 - MÉCANIQUE STATISTIQUE ET PHYSIQUE NON LINÉAIRE

3.1 Systèmes hors d'équilibre

Les théorèmes de fluctuation qui ont été mis au jour depuis une quinzaine d'années ont apporté un éclairage nouveau à la question de l'irréversibilité (résultant de dynamiques microscopiques réversibles), et fourni un ensemble de relations exactes permettant en particulier d'obtenir des potentiels thermodynamiques d'équilibre à partir de mesures hors d'équilibre. Dans ce corpus, les

fonctions de grande déviation se sont imposées comme une nouvelle pierre angulaire de la mécanique statistique, en ce sens qu'elles jouent pour les systèmes hors d'équilibre un rôle potentiellement analogue à l'énergie libre d'équilibre. De telles approches, dont le pendant quantique devrait être exploré plus en profondeur, sont particulièrement appropriées pour l'étude de systèmes de petite taille. Elles devraient permettre une meilleure compréhension de dispositifs miniaturisés (micro-fluidique, biologiques etc.). Un domaine porteur en la matière est par ailleurs celui des modèles solubles, précieux pour la mise en place d'une mécanique statistique hors d'équilibre.

Une nouvelle classe de systèmes hors équilibre est fournie par les systèmes avec interactions à longue portée, définis par une énergie qui diverge plus vite que le volume. De tels systèmes, non additifs, peuvent présenter des comportements thermodynamiques inhabituels, tels que chaleur spécifique négative ou non équivalence d'ensembles thermodynamiques. En particulier, la compréhension de la dynamique de tels systèmes a connu récemment un nouvel essor, notamment dans l'étude de la relaxation lente vers l'équilibre et la description de l'évolution sur des temps longs et leurs fluctuations au voisinage des transitions de phase et de multi-stabilités. Des exemples concrets abondent, en passant des systèmes autogravitants aux écoulements géophysiques (par exemple sur des échelles de temps d'évolution climatique) et à la magnétohydrodynamique. Ce retour vers les domaines d'application devrait également stimuler les développements théoriques dans de nouvelles directions, souvent en lien avec la physique hors équilibre du type "dynamique forcée", comme on peut le trouver dans les systèmes non conservatifs, des bruits corrélés ou des transitions de phase induites par le bruit. Il y a là sans doute un gros potentiel de développement pour cette thématique.

3.2 Milieux granulaires et matière molle

Les milieux granulaires représentent un domaine d'application privilégié de travaux de type "premiers principes", utiles dans un panorama dominé par des approches phénoménologiques, où le sens physique est par ailleurs souvent malmené par les observations expérimentales et numériques. Un défi d'actualité tient dans la rhéologie des écoulements granulaires génériques, mal comprise bien que les effets non newtoniens soient la règle plus que l'exception (c'est là une différence essentielle avec les liquides ordinaires). L'objectif est donc d'étendre aux systèmes denses les descriptions de type milieu continu qui ont été obtenues dans les dix dernières années pour les systèmes dilués. A une échelle plus micrométrique, les grains forment des dispersions colloïdales, que l'on peut voir comme des systèmes fortement couplés dès lors que les effets coulombiens sont à l'œuvre. Les condensats ioniques résultant présentent des comportements mal compris (dont l'inversion de charge) qui signent à température ambiante des effets d'ordinaire propres aux basses températures. Ces systèmes présentent également un défi pour les méthodes

numériques, qui ne permettent à l'heure actuelle pas une prise en compte satisfaisante des différentes échelles pertinentes, aussi bien de longueur que de temps. Un axe porteur et riche d'application concerne la manipulation des dispersions colloïdales par des champs extérieurs. Enfin, une question majeure porte sur la dynamique lente de ces systèmes, en lien avec la transition vitreuse.

3.3 Systèmes désordonnés et thèmes aux interfaces

Souvent le désordre peut changer le comportement qualitatif des systèmes physiques. La présence d'impuretés est à l'origine de phénomènes comme la métastabilité, le piégeage ou la dynamique par avalanches. De nombreux progrès ont été fait en physique statistique grâce à la combinaison de méthodes probabilistes (techniques 1d, graphes aléatoires), de notions physiques (loi d'échelle, universalité) et des algorithmes d'optimisation. Beaucoup de questions restent ouvertes comme, l'existence d'une transition dans les verres structuraux, la description théorique d'un système désordonné au delà du champ moyen ou de la dynamique activée en présence d'un grand nombre de barrières. Des méthodes de théorie des champs et de renormalisation fonctionnelle ont été développées pour prédire les comportements de ces systèmes.

Récemment la théorie des systèmes vitreux a fourni des outils pour comprendre les comportements collectifs des systèmes frustrés formés de nombreuses particules en interactions fortes. Ces développements ouvrent de nombreuses possibilités d'applications aux « systèmes complexes » où les « particules » peuvent être de nature très diverses, allant des agents sur un marché à des variables logiques.

Les résultats obtenus dans le contexte des problèmes de théorie de l'information comme la satisfaction de contraintes aléatoires et les codes de correction d'erreur avec les techniques inspirées de la physique des verres de spins, offrent une illustration de ces nouvelles possibilités.

3.4 Processus stochastiques

Le mouvement brownien est un objet fondamental de la physique théorique moderne et il a permis d'expliquer beaucoup d'effets observés dans les systèmes physiques. Aujourd'hui il est utilisé dans plusieurs domaines de la science pour comprendre le comportement des marchés financiers, la dynamique de molécules complexes à l'intérieur de la cellule ou encore les stratégies de recherche de nourriture des animaux. Pour décrire les fluctuations dans ces systèmes, il est souvent nécessaire d'aller au delà du monde brownien et comprendre les effets liés aux corrélations et aux milieux hétérogènes.

Décrire ces nouveaux processus stochastiques, les propriétés de persistance et les probabilités des valeurs extrêmes sont des questions ouvertes dans la physique statistique et dans les mathématiques appliquées.

3.5 Invariance conforme

L'invariance d'échelle est à la base de toute approche moderne afin de comprendre le comportement collectif des systèmes avec un très grand nombre de degrés de liberté, interagissant fortement entre eux.

Son extension vers l'invariance conforme rend accessibles les outils spécifiques des théories de champs invariantes conformes et celles des systèmes intégrables. Leur application en physique statistique, dans la matière, ou encore dans la théorie des cordes et la physique des particules élémentaires à très hautes énergies, a ouverte des avenues novatrices. Parmi les avancées majeures récentes figurent la description de structures géométriques fluctuantes comme on les rencontre dans des interfaces critiques ou bien l'étude des systèmes désordonnés bidimensionnels ou la turbulence bidimensionnelle. L'adaptation de l'invariance conforme hors de son contexte d'origine produit également des nouvelles idées en dynamique hors d'équilibre, notamment dans l'étude des verres et en vieillissement physique. Des progrès futurs dépendront aussi d'une interdisciplinarité renforcée, en particulier avec les méthodes probabilistes, mais aussi avec celles provenant la physique non linéaire et de la théorie des matrices aléatoires et des problèmes de combinatoire reliés.

3.6 Physique non-linéaire

La physique non-linéaire est un domaine où « l'école française », physiciens théoriciens mais aussi mathématiciens et expérimentateurs, a joué un rôle très important dans les quarante dernières années, avec des contributions marquantes qui vont de la dynamique des systèmes à petit nombre de degrés de liberté, à la formation de structures dans les domaines étendus, au chaos spatio-temporel et à la turbulence. De nombreuses questions anciennes restent ouvertes et nous tentons d'en décrire quelques-unes qui nous paraissent centrales. A côté de ce domaine classique, la source d'inspiration de disciplines voisines est incontestable. Le domaine de recherche de la communauté voit donc ses limites s'étendre et les physiciens du non-linéaire contribuent de façon importante à des disciplines variées. On notera bien sur l'influence ancienne de la géophysique, de l'astrophysique ou de la science des matériaux mais aussi et de façon croissante celle de la biophysique et même de l'économie et des sciences sociales. D'un point de vue méthodologique, la progression énorme des capacités de calcul des ordinateurs ainsi que la quantité croissante de données de tous ordres nouvellement disponibles jouent un rôle important, qui certainement ne fera que grandir sur l'orientation des recherches de la communauté.

3.7 Hydrodynamique, Turbulence

Comprendre et décrire de façon précise la turbulence détaillée est l'un des grands problèmes ouverts de la physique classique. L'activité autour des phénomènes turbulents est encore très riche non plus seulement en ce qui concerne les situations homogènes-isotropes mais aussi dans certains contextes plus précis

comme les couches limites ou les transitions dans divers écoulements. La possibilité de suivre des particules dans un écoulement turbulent a renouvelé très fortement la discipline tant au niveau expérimental qu'au niveau théorique, cette approche Lagrangienne étant un excellent complément à l'approche Eulerienne, plus traditionnelle. De très jolis résultats récents expérimentaux, numériques et théoriques augurent d'une activité soutenue dans les années qui viennent.

Depuis plusieurs années, la turbulence faible (ou turbulence d'ondes) est devenue aussi une question très active tant au niveau théorique qu'expérimental. Elle s'intéresse aux propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction. L'archétype est l'étude de l'état aléatoire des ondes à la surfaces de l'eau générées par le vent, mais des situations très similaires ont été récemment étudiées pour les ondes de gravités internes en océanographie, les ondes d'Alfvén du vent solaire, les ondes radars de l'ionosphère, les ondes de spins dans les solides, les ondes en optique non linéaire, les ondes quantiques des condensats de Bose, les ondes de Langmuir dans les plasmas, ... C'est un bel exemple où les études théoriques ont été relancées par des avancées expérimentales ou par la multiplicité des domaines d'applications de ces questions. Enfin, il nous faut mentionner la magnéto-hydrodynamique où l'observation récente de l'effet dynamo et de renversements spontanés du champ magnétique engendré dans un écoulement expérimental forcé, stimule l'activité théorique et numérique sur cette question fondamentale mais aussi cruciale pour l'astrophysique.

3.8 Physique des plasmas

Les plasmas, naturels ou de laboratoire, depuis les plus simples décharges électriques jusqu'aux plasmas de fusion, constituent des systèmes non linéaires complexes pouvant être le siège de phénomènes d'auto-organisation associés au développement d'instabilités variées.

A cet égard les plasmas chauds confinés par des champs magnétiques constituent un objet d'étude particulièrement intéressant. La dynamique d'un tel plasma implique en effet le couplage d'échelles -en temps et en longueur - très différentes, et des physiques différentes selon la région du plasma. Dans le cœur très chaud, où les effets d'auto-organisation magnétique dominant, un problème actuel et d'intérêt également en astrophysique, est celui de la reconnexion magnétique. Ce cœur est entouré d'une région où, sous l'effet d'énormes gradients transverses, se développe une turbulence induisant un transport convectif de chaleur et de matière.

Comme dans les écoulements géostrophiques et avec l'effet dynamo, on peut y observer la génération spontanée de mouvements globaux à partir de la turbulence. Ces écoulements («zonal flows»), qui apparaissent ainsi dans une étroite couche de cisaillement sur le bord du plasma peuvent constituer des barrières de transport efficaces et conduire à des régimes dits de confinement améliorés. La compréhension et le contrôle de ces mécanismes universels sont ainsi de première importance dans le cadre des recherches sur la fusion par confinement magnétique.

3.9 Un renouveau de la mécanique des solides et de la science des matériaux

L'intérêt des physiciens théoriciens pour la mécanique et la science des matériaux, sciences anciennes s'il en est, connaît actuellement un grand renouveau. Comme dans beaucoup d'autres cas, ce n'est pas le solide parfait qui pose question, mais le matériau désordonné que ce soit dans sa structure même, ou simplement dans sa forme macroscopique. La microstructure de la plupart des métaux ou des alliages communs est en effet un produit complexe de leur histoire et de leur mode de fabrication et la compréhension fine de leurs caractéristiques reste un important défi. Une compréhension approfondie peut être attendue de la possibilité de simulations numériques raffinées, avec des méthodes existantes comme la dynamique moléculaire ou les méthodes de champ de phase en plein développement, ou des techniques encore à inventer, qui stimuleront elles-mêmes des développements théoriques nouveaux.

Au delà de ces structures mésoscopiques, l'élasticité non-linéaire, la plasticité et les formes complexes, pliage, froissage, fractures, déchirures, résultant de contraintes macroscopiques sont un sujet d'étude qui se développe très activement, en parallèle avec nombre d'expériences « légères ». Comme nous le verrons ci-dessous, la description de mécanismes gouvernant des structures biologiques végétales (feuille, bourgeon,...) ou animales (cellules, tissus,...) est un moteur de nombreuses études. Enfin, les milieux granulaires, dont la compréhension a beaucoup progressé, que ce soit pour la description des structures statiques ou des écoulements et de la formation de structures variées, telles que les rides formées par l'eau ou le vent, dunes, restent un sujet de grand intérêt pour les physiciens du non-linéaire.

4 - MATIÈRE CONDENSÉE

La découverte il y a une vingtaine d'années des supraconducteurs à haute température critique, suivant celle de l'effet Hall quantique et précédant les développements technologiques considérables sur les nano-matériaux ont amplement démontré les limites des descriptions des matériaux en termes de fonction d'ondes d'électrons indépendants et des méthodes perturbatives. Ils ont même conduit dans certains cas à remettre totalement en cause le paradigme de Landau du liquide de Fermi qui consiste à décrire la physique de basse énergie des conducteurs comme une extension de la théorie des gaz de Fermi avec des quasi particules de spin $\frac{1}{2}$, « électrons habillés » en interaction supposée faible. Un tournant méthodologique et conceptuel s'est avéré nécessaire, défi que la physique théorique française a très bien relevé. On retrouve aujourd'hui les physiciens théoriciens de la matière condensée sur un très grand nombre de fronts actifs du domaine : depuis les systèmes unidimensionnels où les avancées des théoriciens de la matière condensée rejoint ceux de la physique mathématique, l'effet Hall quantique fractionnaire, la physique mésoscopique, les liquides de spins et les isolants topologiques, la glace de spins et ses « monopoles de Dirac », jusqu'à l'étude approfondie

des matériaux quantiques fortement corrélés: fermions lourds, supraconducteurs à haute température critique. Les progrès récents sur l'ensemble de ces sujets de la matière condensée ont été mis en œuvre à travers toute la panoplie des outils de la physique théorique : théories des champs et théories de jauge pour décrire les modélisations des excitations exotiques émergentes, groupe de renormalisation fonctionnel et/ou « non perturbatif », et méthodes numériques, DMRG, Monte Carlo quantique et diagonalisations exactes pour les problèmes couplés les plus difficiles. Dans le domaine des matériaux quantiques fortement corrélés la DMFT et ses extensions a construit un pont imprévu entre physique théorique et chimie des matériaux. L'ensemble des objets d'étude ci-dessus a d'importantes connections avec les thèmes fondamentaux de chaos quantique, de décohérence, le problème de la fabrication de bits quantiques, les notions d'intrication quantique et la question de la faisabilité d'un ordinateur quantique.

4.1 Systèmes unidimensionnels

Chronologiquement la première déviation au paradigme du liquide de Fermi est apparue dans les systèmes 1-d, où toutes les subtilités de la séparation des dynamiques de spin et de charge ont lentement émergé (Ansatz de Bethe, liquide de Luttinger). Ce champ de recherche, difficile, est toujours très vivant : plusieurs outils théoriques y sont appliqués, Ansatz de Bethe, bosonisation, et méthodes numériques (diagonalisations exactes et DMRG). Ces diverses méthodes ont permis la construction des diagrammes de phase des chaînes de spins dopées ou l'étude des propriétés des atomes froids piégés dans des réseaux optiques unidimensionnels. Une des frontières actuelles concerne la détermination des fonctions de structure dynamique de différents modèles unidimensionnels, tels que le modèle de Bose-Hubbard attractif et celui de Yang-Gaudin. Les matériaux synthétiques, les polymères conducteurs sont l'objet d'une intense activité expérimentale en particulier autour des grands instruments, activité qui bénéficie largement de l'interaction théorie-expérience: propriétés optiques, transfert de charge en présence de défauts topologiques (solitons). De nombreux matériaux en échelle (constitués de 2 systèmes unidimensionnels couplés) ont élargi le champ des possibles théoriques d'une manière tout à fait intéressante. Les expériences sur les atomes froids (gaz de Tonks-Girardeau, limite unitaire) devraient permettre des progrès supplémentaires dans cette fructueuse coopération théorie-expérience. La physique des états liés à trois corps dans le régime unidimensionnel est un des exemples de telles avancées. Un des défis des prochaines années est le transport dans les systèmes quantiques désordonnés avec interactions fortes. Les atomes froids ont ici permis l'observation directe de la localisation d'Anderson en 1d, mais cette problématique dépasse le cadre des atomes froids, puisque la thématique est également déclinée avec des ondes sismiques, acoustiques, électromagnétiques.

4.2 L'effet Hall quantique fractionnaire

L'effet Hall quantique fractionnaire a été le premier sujet de physique des solides, où l'introduction

des modélisations en termes d'excitations élémentaires de charge fractionnaire et de statistiques anyoniques (ni fermionique ni bosonique) s'est avérée extrêmement fructueuse. L'effet Hall quantique fractionnaire se manifeste dans les systèmes d'électrons dans les semi-conducteurs. La possibilité de les observer dans la physique des atomes bosoniques froids en régime de rotation rapide, fait l'objet d'une recherche active. En fait la théorie des fermions composites a permis de donner une description satisfaisante de nombreux états quantiques fractionnaires. Mais tous les efforts actuels se concentrent sur la fraction dite « du remplissage 5/2 » dont les excitations présentent peut-être une statistique non-abélienne encore plus riche que les statistiques anyoniques des fractions expliquées par les fermions composites.

4.3 Matériaux à fortes corrélations quantiques.

Ce sont des matériaux à bandes étroites (métaux de transition, leurs oxydes, composés de terres rares et d'actinides), dans lesquels les électrons « hésitent » entre un comportement itinérant et un comportement localisé (voisinage de la transition de Mott). La création par le CNRS il y a une quinzaine d'années du GDR « Fermions fortement corrélés » visait à la constitution d'une synergie entre les physiciens théoriciens purs, ceux de la matière condensée plus traditionnelle et les expérimentateurs de physique des solides et de chimie des matériaux : les résultats obtenus sont une preuve grandeur nature du bien fondé d'une telle démarche. Les activités des équipes françaises dépendant de la commission 02 recouvrent un spectre d'activités large depuis des développements purement théoriques (comme par exemple la construction d'une vision unifiée de la superfluidité depuis l'échelle microscopique de Bogolioubov, jusqu'à l'approche hydrodynamique de Popov à l'aide du groupe de renormalisation non perturbatif) jusqu'à des questions orientées vers la physique des matériaux, voire des applications (par exemple liées aux propriétés optiques ou thermoélectriques d'oxydes de métaux de transition ou de composés de terres rares). Un des moteurs de ce dernier progrès est la « théorie du champ moyen dynamique » (en abrégé DMFT pour « Dynamical Mean-Field Theory ») dont l'idée générale consiste à décrire globalement le solide comme un « atome effectif sur un site » plongé dans un milieu auto-cohérent avec lequel il peut échanger des électrons. Le premier succès de cette approche a été la description théorique détaillée de la transition métal-isolant de Mott. Le calcul des spectres de photoémission résolus en angle ont ensuite conduit à des prédictions quantitatives pour les expériences d'ARPES, dont certaines ont été depuis testées avec succès. L'extension de la méthode au traitement de plusieurs sites voisins dans un champ moyen dynamique (cluster-DMFT) a permis d'expliquer les observations expérimentales sur les cuprates (formation d'arcs de Fermi et comportement de la conductivité inter-plans) et l'origine des deux échelles d'énergie quasi-particules et pseudo-gap observées dans plusieurs spectroscopies (Raman, STM). L'intégration des méthodes à N corps aux calculs de structure électronique (fonctionnelle de densité dans l'approximation de la densité locale), qui nécessite de nombreux développements

techniques, dans le cadre de codes numériques souvent assez sophistiqués représente le mariage réussi de l'intuition du chimiste avec les méthodes quantitatives de la physique. Ces méthodes versatiles permettent également une interaction avec les expériences sur les atomes froids, en plein développement.

4.4 Liquides de spins, glace de spins, isolants topologiques, q-bits quantiques

Dans les isolants près de la transition de Mott les effets quantiques conjugués à la frustration des interactions et à la topologie du réseau conduisent à l'apparition de phases nouvelles : liquides de spins, glaces de spins. Dans les liquides de spins la formation de paires singlettes (de spin nul) en résonance sur le réseau conduit à l'apparition des phases nouvelles. Le premier de ces archétypes est une phase gappée, dont les excitations de basse énergie peuvent être décrites dans une théorie de jauge Z2 non confinante : une partie des excitations de basse énergie sont des excitations fractionnaires de spins $\frac{1}{2}$, d'autres excitations de jauge plus subtiles restent à identifier dans un certain nombre de modèles rentrant dans le cadre plus large posé initialement par Kitaev. L'état fondamental de ces modèles a une dégénérescence topologique et représente le premier système modèle pour un bit quantique protégé de la décohérence par l'environnement parce que essentiellement insensible aux perturbations locales. Cette idée, de coder de l'information quantique dans des états collectifs macroscopiquement distincts a été mise en œuvre dans les réflexions –couplées aux réalisations expérimentales– sur réseaux de Josephson : un chantier considérable et à première vue très prometteur. Les modèles de Kitaev eux-mêmes sont l'objet de nombreuses études, compréhension du rôle des symétries non-locales, nature des excitations abéliennes ou non, liens entre modèles d'Ising quantiques et théorie de jauge avec termes de Chern-Simmons. La réflexion autour des ces états intriqués conduit également à des propositions de nouveaux algorithmes prometteurs (MERA) qui mériteraient très probablement d'être étudiés en France. Une deuxième catégorie de liquides de spins non triviaux apparaît dans des systèmes quantiques dont le fondamental classique présente une entropie extensive du fait de la topologie du réseau. Dans cette catégorie, le problème de Heisenberg sur le réseau kagomé (un réseau d'étoiles de David) reste un problème ouvert. Les expériences suscitées par les réflexions théoriques ont mis en évidence des systèmes magnétiques qui restent fluctuant jusqu'à des températures de l'ordre de trois à quatre ordres de grandeur plus petits que la constante de couplage. Sur le réseau pyrochlore qui rentre dans cette même catégorie, la présence d'interactions dipolaires (naturelles dans de tels matériaux), conduit à des configurations fondamentales appelées « spin-ice » en analogie avec la glace. La frustration subie par les moments magnétiques sur de tels réseaux conduit à un fractionnement des dipôles magnétiques en quasi particules porteuses d'une charge magnétique monopolaire. Les transitions de phases dans le gaz de Coulomb de ces monopoles et plus encore la dynamique de ces excitations émergentes reste un problème ouvert. Il semble probable que seule

un petite partie de l'iceberg des théories émergentes avec excitations exotiques en physique des solides ait été explorées à ce jour. Les progrès expérimentaux demeurent difficiles parce qu'à l'état naturel les matériaux combinent a priori toutes les difficultés d'approche : impuretés, défauts, interactions « parasites » sont toujours présents. Et il n'y existe en général pas de « bouton » pour faire varier les paramètres de couplage. Donc l'aller retour entre les théoriciens, les numériciens modélisateurs et les expérimentateurs de physique des solides et les chimistes est absolument essentiel. Dans cette problématique, les gaz atomiques ultra-froids sont des laboratoires sous contrôle très intéressants (voir ci-dessous), quand bien même ils sont actuellement un peu « trop chauds » par rapport à la physique très fortement couplée abordée dans ce paragraphe. Par ailleurs le désordre dans ces systèmes quantiques semble ouvrir des questions nouvelles et différentes de celles de verres de spins « classiques ». Le corpus de résultats expérimentaux est actuellement sans doute insuffisant pour que le problème du désordre mérite d'être remis sur l'ouvrage à très court terme, mais la situation évoluera peut-être assez vite.

4.5 Physique mésoscopique

L'enjeu est de décrire des systèmes dont la température/la taille est suffisamment basse/réduite pour que la propagation des porteurs de charge s'effectue en préservant leur cohérence de phase. La décohérence est étudiée dans les réseaux complexes de fils métalliques diffusifs dans le régime de la localisation faible, et/ou de l'effet Aharonov Bohm. On s'intéresse en particulier à la décohérence de phase due aux interactions électron-électron. Cette physique mésoscopique tout à fait essentielle dans le domaine « nano », (domaine sur lequel porte de considérables efforts expérimentaux) est bien représentée dans notre communauté. Elle se concentre actuellement à la fois sur l'étude de l'état fondamental ou de l'équilibre thermodynamique de systèmes fermés et sur les propriétés de transport des systèmes ouverts hors équilibre. Ces derniers correspondent aux situations expérimentales réelles où les échantillons mésoscopiques sont connectés à des contacts et souvent polarisés en tension. Cette physique se pratique sur une grande variété de systèmes propres à la physique de la matière condensée, tels que les systèmes unidimensionnels, les boîtes quantiques connectés à des bornes de différente nature, les systèmes hybrides contenant des composants supraconducteurs, ferromagnétiques ou autres. L'injection d'électrons sur les fils quantiques tels que les nanotubes de carbone ou les états de bord dans l'effet Hall quantique fractionnaire permet de détecter quelles sont les charges (fractionnaires) associées aux excitations collectives de ces liquides de Luttinger qui interviennent dans le transport. Le diagnostic s'effectue à partir du calcul du courant et de ses moments supérieurs (bruit), en tenant compte des effets de taille finie ou d'écrantage. On s'intéresse également dans de tels systèmes à la détection du bruit haute fréquence à l'aide de circuits quantiques directement couplés au circuit mésoscopique que l'on veut mesurer. Une autre partie de l'activité en physique mésoscopique concerne les boîtes quantiques. Dans ces dernières, on aborde la problématique du chaos quantique à l'aide d'approches semi-classiques et de matrices aléatoires.

Dans ces mêmes systèmes, le problème de l'effet Kondo est abordé. Ce dernier peut s'explorer dans le cadre de dispositifs hybrides, par le calcul du courant Josephson, ou l'on observe une compétition entre corrélations Kondo et supraconductivité.

4.6 Information quantique

Les recherches sur l'information quantique ont continué à un rythme soutenu durant les dernières années. Après l'enthousiasme initié par l'invention d'algorithmes quantiques exponentiellement plus efficaces que les algorithmes classiques – enthousiasme tempéré par les difficultés de réalisation pratiques qui semblent considérables – l'activité s'est concentré d'une part sur une réflexion sur les fondements de l'informatique quantique (intrication, interférence), d'autre part sur les perspectives réalistes d'utilisation. Les obstacles principaux demeurent la rareté et le coût des ressources quantiques et la nécessité de les préserver des interactions avec l'environnement. Des recherches existent dans notre communauté sur ce sujet (q-bits Josephson protégés de la décohérence). Cela débouchera-t-il à moyen ou long terme sur un ordinateur quantique utilisable ? La communauté reste partagée sur ce point, comme elle l'a toujours été, mais il ne fait guère de doute qu'il faille continuer l'effort entrepris, qui apporte une moisson de nouvelles idées et outils.

4.7 Gaz atomiques ultra-froids

Depuis le début de la décennie, on a assisté à une explosion de résultats sur la physique statistique des gaz atomiques ultra-froids. Les études de physique statistique sur les gaz de bosons, de fermions, et tous les mélanges possibles, libres ou confinés dans un réseau optique, seront certainement très actives dans les années à venir, en continuité avec l'activité récente : recherches de phases plus ou moins exotiques, détermination des équations d'état, transitions de phase quantique (comme la transition BKT récemment observée), effets d'appariement, gaz en forte interaction. La possibilité de changer la dimensionnalité du système et d'étudier par exemples des gaz de Tonks-Girardeau (à 1d) ou des excitations anyoniques (à 2d) ouvre aussi des perspectives déjà évoquées. Avec les gaz en interaction dipolaire à longue portée, c'est une nouvelle branche qui s'ouvre, avec des connections naturelles entre la physique de la matière condensée et le magnétisme quantique (glace de spins). Dans ce domaine, des développements méthodologiques importants ont été observés ces dernières années, bénéficiant en particulier d'idées issues de l'information quantique (méthodes de type DMRG). A moyen terme, ces recherches sur la dynamique quantique qui fédèrent une communauté assez transversale pourraient modifier durablement les outils théoriques disponibles. Au-delà de l'approximation de champ moyen encore (trop) souvent utilisée pour décrire les gaz atomiques ultra-froids, se pose toute la question des systèmes à petit nombre de corps en interaction. On sait aujourd'hui réaliser des micro-condensats avec quelques dizaines d'atomes. La compréhension de leurs propriétés dynamiques et du rôle des fluctuations quantiques est un enjeu intéressant.

Il existe des convergences transversales entre tous les sujets décrits dans ce résumé non exhaustif. Intrication, décohérence sont des concepts clés autour desquels peuvent émerger de nouvelles approches théoriques voire numériques. Les problèmes de dynamique et de la physique hors d'équilibre des systèmes de taille finie (injection d'électrons dans les jonctions, thermalisation et quenching au voisinage d'une transition de phase quantique des atomes froids) ne seront certainement pas complètement résolus durant les quatre années à venir mais on peut espérer que les défis qui sont ainsi posés conduiront à l'émergence d'outils conceptuels et numériques nouveaux.

5 - PHYSIQUE ET BIOLOGIE

La connaissance des phénomènes biologiques a énormément progressé au cours des dernières décennies, à la fois grâce aux progrès de la biologie moléculaire, de la manipulation de molécules et à ceux des techniques d'imagerie et d'enregistrement. Des données toujours plus nombreuses et diverses sont disponibles, que ce soit à l'échelle des molécules, des génomes, des cellules, des tissus et des organes ou même des individus et de leurs interactions. La physique joue un grand rôle dans l'acquisition même de ces données que ce soit par le développement de techniques de microscopie plus performantes, de nouveaux marqueurs fluorescents (nanocristaux), ou de la manipulation des objets biologiques au niveau des molécules individuelles (pincettes optiques, magnétiques, ...), des cellules et des tissus (microfluidique, surfaces structurées, ...) ou des individus (internet, puces émettrices/capteurs de tailles réduites, ...). Nous décrivons cependant ici plus spécialement les domaines où la contribution des physiciens théoriciens nous paraît devoir être prépondérante, à savoir le traitement des données et surtout le développement de modèles conceptuels qui permettent de les interpréter et d'orienter leur collecte. En ce sens, l'interface physique-biologie est constituée d'aller-retours permanents entre les deux disciplines.

5.1 Traitement des données et développement de nouveaux algorithmes

Le traitement des données expérimentales demande une méthodologie toujours plus technique, et les concepts sous-jacents se trouvent bien souvent dans la boîte à outils des physiciens. Les processus stochastiques sont par exemple indispensables à l'extraction d'information pertinente des données d'expériences en molécule unique. Le développement rapide des techniques de microscopie optique requiert un effort de modélisation de la diffusion et du transport dans divers milieux actifs, chargés ou très encombrés (membranes, cytoplasme, noyau). Les idées et méthodes de physique statistique se sont aussi révélées importantes pour analyser des problèmes difficiles d'optimisation combinatoire ou d'inférence statistique et pour proposer de nouveaux algorithmes performants. Leur mise en œuvre pour résoudre les multiples problèmes inverses qui se posent en biologie, où l'on désire souvent retrouver les interactions entre constituants à partir des

observations (entre gènes à partir des concentrations mesurées de ARNm ou de protéines, entre neurones à partir d'enregistrements de leurs activités) paraît une voie prometteuse. Le traitement des données génomiques mérite une mention spéciale. Depuis le séquençage des premiers génomes et du génome humain, plus de 1000 génomes d'espèces différentes ont été séquencés et bien plus sont en projet. Reconstruire l'histoire des espèces et des nouveautés évolutives est un défi théorique qui devrait attirer un nombre croissant de physiciens dans les années à venir.

5.2 Interactions moléculaires

Les modèles issus de la physique paraissent aussi appeler à jouer un rôle important à toutes les échelles. C'est naturellement le cas à l'échelle moléculaire où déterminer les conformations de molécules individuelles et spécialement celles des protéines est un problème important et difficile. Les nombreux travaux inspirés par la physique statistique des systèmes désordonnés ont clarifié différents aspects de la question mais de grands progrès restent à accomplir. De même, différentes questions d'interaction et de reconnaissance à l'échelle moléculaire comme celle concernant les protéines et l'ADN doivent être approfondies, pour obtenir des algorithmes prédictifs. La physique de la machinerie génétique est un objet d'étude en soi : les propriétés mécaniques de l'ADN en interactions avec ses protéines partenaires (enzymes, histones), la dynamique du nucléosome, de la chromatine, l'organisation des gènes dans le noyau sont encore mal comprises.

5.3 Physique de la cellule

À l'échelle supra-moléculaire, le fonctionnement des réseaux de régulation cellulaire est un sujet en plein développement. Le développement de modèles et des données nouvelles permettent d'aborder les questions du rôle des phénomènes stochastiques, des principes de l'architecture et du fonctionnement des réseaux génétiques, des bases de la différenciation cellulaire. L'organisation dynamique des différents organelles cellulaires est aussi un vaste sujet d'étude, de même que la régulation des processus de signalisation.

5.4 Assemblées cellulaires, mouvement collectif et morphogénèse

À l'échelle de la cellule ou d'une collection de cellules, les problèmes de forme, de motilité, de chimiotactisme sont d'une grande actualité et particulièrement importants pour la pathologie. C'est évidemment aussi vrai des interactions entre cellules qui régissent à la fois leur migration et l'architecture des ensembles cellulaires. Dans tous ces domaines, les contributions des physiciens théoriciens, qui mêlent modèles simples, à l'origine par exemple de comportement collectifs, et prise en compte de phénomènes de base (par ex. de la mécanique), sont importantes et paraissent appelées à le devenir encore plus. Le développement et l'évolution des structures à

l'échelle de l'organisme (embryogenèse, angiogenèse, croissance des tumeurs par exemple), plus généralement la morphogénèse, suscitent aussi l'intérêt des physiciens depuis longtemps. Les possibilités présentes et grandissantes de comparaison directe des modèles aux données expérimentales devraient permettre une extension considérable de ce domaine de recherche.

5.5 Réseaux, physique statistique et sciences humaines

L'étude des réseaux de toutes sortes (réseaux génétiques, réseaux de protéines, mais aussi, internet et réseaux sociaux ou économiques) est aussi un sujet d'étude en évolution très rapide. L'analyse de leurs structures, de la manière dont ils se forment, de leur dynamique, de la façon dont ils traitent et transmettent l'information posent de nouvelles questions de physique statistique. Les modèles développés ont déjà un très grand impact dans l'ensemble de la communauté scientifique et cela paraît annonciateur de développements très intéressants dans ce domaine. L'interaction entre la physique et les sciences humaines n'en est encore qu'à ses débuts mais, que ce soit en « éconophysique », pour la propagation des épidémies ou la formation des opinions, elle paraît fructueuse et promise à un bel avenir.

5.6 Neurosciences computationnelles

Les neurosciences computationnelles méritent enfin d'être traitées séparément pour plusieurs raisons. C'est, d'une part, le domaine de la biologie où la nécessité d'une approche théorique se fait sans doute le plus cruellement sentir. C'est, d'autre part, un domaine où les contributions des physiciens théoriciens sont essentielles depuis plus d'une vingtaine d'années que ce soit par le développement de modèles de mémoire associative, d'apprentissage, de traitement de l'information où bien encore par l'analyse de différents phénomènes dynamiques (oscillations, états d'activité haut ou bas, plasticité synaptique à court et long terme, ...). En conséquence, de nombreux centres mondialement reconnus de neurosciences computationnelles sont dirigés par des physiciens théoriciens (avec même plusieurs laboratoires de « neurophysique »). Certainement, ce mouvement, fruit de la nécessité et de l'intérêt du sujet ne devrait que s'amplifier.

En conclusion, l'organisation du vivant, son évolution au cours des quatre derniers milliards d'années, le traitement de l'information par les êtres vivants et spécialement le cerveau humain sont certainement parmi les plus grandes questions scientifiques du 21^{ème} siècle. Elles ne peuvent être résolues avec succès que par les efforts conjoints de disciplines diverses parmi lesquelles la physique théorique à un rôle essentiel à jouer.

Conclusion

Le CNRS a été séparé en dix Instituts. Les recherches développées par les membres de la section 02, étant très fortement influencées par les interactions avec les mathématiciens, les expérimentateurs en physique subatomique, les mécaniciens des fluides, les géophysiciens, les astrophysiciens, ou encore les biologistes, il est important qu'une attention toute particulière soit apportée aux liens de l'institut de Physique avec les autres Instituts. La direction du CNRS doit être particulièrement vigilante à la question des interfaces. Dans les laboratoires mixtes, dépendant de plusieurs instituts, la vie scientifique ne doit pas souffrir des difficultés inhérentes aux relations complexes entre instituts.

Pour ce qui concerne les recrutements, la section reconnaît l'importance et l'utilité des commissions interdisciplinaires, mais s'inquiète également des effets d'accordéon liés à leur création et leur suppression et au fait que ces structures, assez lourdes, ne permettent pas facilement d'embaucher des chercheurs travaillant dans des domaines peu représentés en France. En conséquence, la section encourage le CNRS à réfléchir, dans des domaines disciplinaires qui ne relèvent pas d'une section unique, à des procédures qui faciliteraient le recrutement de candidats ayant un profil interdisciplinaire et qui seraient plus légères que celles liées aux commissions interdisciplinaires.

Les GDR ont un rôle essentiel pour structurer les relations entre communautés et faire émerger de nouvelles thématiques. Ils sont peu coûteux pour le CNRS et doivent être préservés.

Depuis cinq ans, les financements ANR influent fortement sur la politique scientifique des laboratoires et les directions de recherches encouragées. Il est fondamental de conserver une place très importante aux projets blancs, y compris dans des thématiques émergentes et pour de petites équipes.

La section s'inquiète de la tendance actuelle au formatage prétendument objectif des critères d'évaluation (bibliométrie...), qui a des effets pervers sur la façon de travailler de la communauté scientifique.

Les échanges avec les chercheurs étrangers sont une source de dynamisme et d'innovation. Dans cette optique il est crucial de disposer d'un nombre suffisant de postes d'accueil adaptés au marché international. En particulier, la durée minimale d'un post-doctorat efficace est de deux ans. Nous souhaitons que le CNRS ait une politique ambitieuse en la matière.

Nous souhaitons également parler ici des liens entre le CNRS et les Universités, qui sont essentiels au bon fonctionnement de notre communauté, par l'implication notamment des enseignants-chercheurs. Ces derniers ont un triple métier : enseignants et chercheurs, ils doivent également assurer de nombreuses responsabilités d'intérêt collectif, aussi bien au niveau local que national. Les conditions de travail qui leurs sont offertes aujourd'hui ne leur permettent que difficilement de rester compétitifs sur

la scène internationale. Dans ces conditions, de nouveaux mécanismes de décharge régulière d'enseignement doivent être favorisés pour compléter ceux qui existent actuellement. Les délégations au CNRS restent un outil incontournable qu'il s'agit de mettre en corrélation avec la pression des demandes et d'étendre systématiquement aux enseignants-chercheurs qui s'impliquent à l'échelon national, en particulier ceux qui siègent au Comité National.

Par ailleurs, nous pensons que le CNRS et les Universités pourraient réfléchir à la mise en place de nouveaux mécanismes rendus possibles ces dernières années par la loi LRU. Favoriser les échanges d'enseignement entre chercheurs et enseignants-chercheurs dans une juste reconnaissance de l'ensemble des tâches de recherche et d'enseignement semble être une approche, trop rarement utilisée actuellement, qui devrait in fine être bénéfique à l'ensemble de la communauté. Les contrats ANR permettent des décharges d'enseignement dont la mise en œuvre doit être facilitée et encouragée. Enfin, concernant les chaires Universités/Organismes, nous pensons qu'un approfondissement des réflexions autour du système actuel et des aménagements seraient nécessaires.

Les ITA des unités dépendant de la section 02 ont vu leurs tâches devenir d'années en années plus complexes et leurs charges s'accroître. La diversité des contrats (ANR, programmes européens...), leur hétérogénéité et leur complexité ont renforcé les besoins en gestion. Il en est de même pour les postes d'informaticiens avec l'évolution incessante des outils. L'augmentation des contrats précaires, le non renouvellement des postes pérennes entraînent une perte massive des savoir-faire et compétences au sein des laboratoires. C'est une baisse d'efficacité et un coût trop élevé que ne peut se permettre le monde de la Recherche. Un renforcement des effectifs des ingénieurs et techniciens et administratif de haute technicité est nécessaire : une reconnaissance et une validation des acquis de l'expérience est indispensable pour motiver et stabiliser les ITA très compétents dont la recherche a un besoin essentiel.