

02

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES, THÉORIES ET MODÈLES

JEAN-BERNARD ZUBER

Président de la section

PIERRE BINETRUY

Rapporteur

Martine Ben Amar

Pierre Chiappetta

Alain Comtet

Stephan Fauve

Jean-Michel Ghez

Daniel Gogny

Alain Joye

Nicole Lambert

Patrick Leboeuf

Dominique Levesque

Jean-François Luciani

Pronob Mitter

Alain Pumir

Nicole Ribet

Jean Ruiz

Nicolas Sourlas

Dominique Turc

Jean-Christophe Wallet

Timothy Ziman

Les domaines couverts par la section 02 sont très divers puisqu'ils traitent de l'ensemble de la physique fondamentale et se sont récemment élargis à des domaines frontières tels la biologie, la géophysique ou même l'économie. Cette grande variété de thèmes rend difficile la présentation des caractères communs. Nous nous sommes risqués néanmoins à cet exercice, en essayant de dégager d'abord quelques traits généraux de la discipline. Puis, dans le rapport plus technique qui suit, nous passons en revue les grands thèmes de recherche. Pour éviter une énumération par spécialité qui gommerait les aspects transdisciplinaires, nous avons groupé ces thèmes en deux grands domaines : **la physique des interactions fondamentales** qui regroupe la physique nucléaire, la physique des hautes énergies, la théorie de la gravitation, l'astrophysique et la cosmologie ; **la physique des systèmes à grand nombre de degrés de liberté** sous laquelle se rangent la physique statistique, la physique de la matière condensée, la physique non-linéaire et les plasmas. Il est clair qu'une telle classification est en partie arbitraire, mais elle regroupe à un instant donné des communautés assez bien discernables. L'arbitraire vient du fait que ces communautés sont assez perméables : cette perméabilité est même une des richesses de la physique théorique. Elle est rendue possible par l'application dans différents contextes des mêmes méthodes formelles, comme celles issues de la théorie des champs. Nous avons donc jugé bon d'intercaler entre les deux grands domaines

précédents une présentation des thèmes actuels de la **physique mathématique**, qui nous semble à la croisée des chemins.

Dans une dernière partie, nous avons sélectionné deux sujets qui fournissent un éclairage un peu différent sur notre discipline : l'un traite des problèmes soulevés par la "physique théorique aux frontières", c'est-à-dire aux interfaces avec les autres disciplines (le cas de la biologie est traité plus particulièrement ici) et l'autre porte sur les simulations numériques.

1 - LA PHYSIQUE THÉORIQUE, SES BUTS ET SES MOYENS

1. 1 THÉORIES ET MODELES

Au risque de tomber dans la tautologie, rappelons que l'objet de la physique théorique est de développer les méthodes et les concepts permettant la compréhension des phénomènes naturels. Il s'agit donc d'une part de savoir prédire ou corroborer par le calcul des résultats observés expérimentalement et de l'autre de présenter ces méthodes prédictives sous une forme aussi générale, simple et esthétiquement satisfaisante que possible. La réduction d'un problème complexe à ses éléments les plus importants conduit à sa *modélisation* en termes simplifiés, se prêtant mieux à la solution ou à la discussion. Inversement, l'élaboration de théories fondamentales et cohérentes rendant compte de phénomènes dans une large classe est en général considérée comme le but ultime. Encore faut-il que la dite théorie se prête au calcul, donc à la prédiction précise des phénomènes étudiés. La notion de *théorie effective*, découlant d'une théorie fondamentale, mais la décrivant plus simplement dans un régime donné, répond à ce souci.

Il sera souvent question de théories quantiques des champs dans ce qui suit. Ces théories ont

été conçues au départ pour décrire de façon quantitative et relativiste les interactions, créations et annihilations de particules. Elles ont connu un grand essor dans les deux dernières décennies, avec des succès remarquables dans la physique des particules, où les "théories de champs de jauge" jouent un rôle central, mais aussi de façon croissante dans d'autres domaines. L'application de la théorie des champs s'est en effet étendue aux systèmes à grand nombre de degrés de liberté et a permis de traiter toute une gamme de problèmes de mécanique statistique, de physique des solides et même de chimie.

Illustrons ces généralités par un exemple tiré de la physique des hautes énergies. On dispose actuellement d'une théorie adéquate dans une large gamme d'énergies pour décrire les interactions des particules, comme celles observées au CERN. Cette théorie de champs de jauge - dite "Modèle Standard" - est à la fois confirmée de façon remarquable par les expériences actuelles - aucun désaccord n'est à ce jour venu l'infirmier -, mais trop complexe et incomplète, car elle semble dépendre de trop nombreux paramètres a priori arbitraires et n'incorpore pas la gravité. D'une part, on utilise donc des modèles simplifiés - modèle des partons, modèle de Regge, modèles chiraux, etc. - permettant de décrire des régimes d'énergie donnés. De l'autre, on cherche à construire une grande théorie unificatrice dont le Modèle Standard serait une version effective de basse énergie : les théories de cordes, constituent le fer de lance actuel de cette recherche.

Cette double démarche de réduction à des modèles simplifiés et d'élargissement à une théorie plus globale se répète à travers toute la physique théorique.

1. 2 QUELQUES OUTILS THÉORIQUES ET PRATIQUES

Le théoricien dispose d'une "boîte à outils" constituée de méthodes théoriques souvent applicables à une variété de problèmes dans des domaines éloignés. Ainsi, la théorie des perturbations, souvent mentionnée dans la suite, est une méthode générale de développement en puissances

d'un couplage. Elle est en général d'un usage bien compris et contrôlé. Les problèmes de convergence de ce développement, ou ses limitations à couplage fort, conduisent à rechercher des "méthodes non-perturbatives", un thème récurrent en physique théorique. Une des plus notoires est le "groupe de renormalisation", dont il n'est pas excessif de dire qu'il est omniprésent en physique. Après avoir permis une refonte de notre approche à la physique des très hautes énergies ou aux phénomènes critiques de la mécanique statistique, il a irrigué de très nombreux autres domaines. Son application à des problèmes variés et nouveaux et sa transformation d'outil heuristique en méthode mathématiquement précise restent des sujets d'actualité.

La physique théorique est en principe une physique légère. L'époque du théoricien armé de son seul tableau noir et bloc de papier est néanmoins révolue. L'outil nouveau dont l'usage a révolutionné la vie du physicien théoricien est bien sûr l'ordinateur. L'ordinateur est indispensable tant pour le calcul scientifique que pour les tâches de communication. Dans le domaine du calcul, il a d'une part conduit à la découverte de phénomènes nouveaux, tels les attracteurs étranges des systèmes dynamiques ; de l'autre, il permet de mener des calculs algébriques trop longs et trop complexes pour être effectués à la main. Enfin, les calculs numériques de grande ampleur - diagonalisations de grandes matrices, simulations de Monte-Carlo, calculs de dynamique moléculaire, simulations de plasmas, de systèmes turbulents, etc. - apportent un moyen d'investigation très puissant des systèmes à grand nombre de degrés de liberté, permettent de tester des modèles et fournissent des "données", en se substituant parfois presque aux systèmes expérimentaux véritables ! L'émergence de nouveaux domaines de recherche dans les deux dernières décennies - en physique des systèmes désordonnés et physique des systèmes non-linéaires par exemple - n'aurait pas été possible sans l'apport des puissants moyens de simulation modernes.

La révolution informatique, en particulier les réseaux électroniques, a par ailleurs modifié la façon de travailler de nombreux chercheurs, rendant possible l'accès immédiat et quotidien aux derniers travaux dans chaque sous-discipline, et permettant des discussions quotidiennes, voire des

collaborations, entre des individus et des équipes éloignés. Ces nouveaux moyens ont un impact évident sur la mobilité thématique : dans de nombreux domaines, l'évolution des thèmes dominants de recherche reflète avec très peu de délai le mouvement des idées et se fait au gré des "percées". Le couplage international entre de nombreuses équipes, rendu possible par les moyens informatiques, présente toutefois un danger, celui d'amplifier les effets de mode. Dans certains autres domaines, cependant, où les liens entre théorie et expérience sont forts et impliquent des expériences longues sur de gros équipements, la continuité des thèmes de recherche est plus sensible. Il s'agit soit de préparer des expériences à venir, soit d'analyser des données expérimentales, en faisant le meilleur usage des théories existantes. C'est le cas par exemple de la physique nucléaire ou des particules élémentaires, de l'astrophysique théorique ou de la physique des plasmas.

Même si l'informatique a fait beaucoup pour rapprocher les individus, les rencontres entre personnes demeurent irremplaçables. Pour éviter de se scléroser, pour confronter ses travaux et ses idées à la critique extérieure, le théoricien se doit de changer régulièrement son environnement intellectuel. Cela est vrai, bien sûr, dans toute activité de recherche, mais sans doute particulièrement dans celle-ci, en raison de la grande mobilité thématique. Le physicien théoricien est donc demandeur de moyens d'échange et de communication : conférences et écoles d'été, visites d'instituts étrangers et séjours postdoctoraux. On ne saurait trop insister ici sur le caractère vital de ces échanges pour la vie scientifique des laboratoires.

1. 3 RELATIONS THÉORICIENS- EXPÉRIMENTATEURS

Pour beaucoup de physiciens théoriciens, les contacts avec les expérimentateurs jouent un rôle important dans l'élaboration des concepts et des théories. Ces contacts peuvent se faire au jour le jour si une équipe de théoriciens est immergée dans un laboratoire expérimental, comme c'est souvent le cas en physique de la matière condensée. Ils peuvent être de nature plus volontariste, quand

le laboratoire de physique théorique est une structure indépendante. En France, c'est généralement, mais pas exclusivement, le cas pour les laboratoires qui dépendent de la section 02. Les relations se font alors sur la base de discussions sur des thèmes précis d'intérêt commun.

Dans les domaines où de grands équipements doivent être conçus (physique des particules, physique nucléaire, astrophysique en particulier), ces discussions revêtent une importance particulière et doivent traiter tant de la faisabilité du projet que de son intérêt sur une échelle de temps qui est souvent de l'ordre de la dizaine d'années. Elles sont alors institutionnalisées au sein de groupes de travail, généralement internationaux, qui sont chargés d'élaborer un certain nombre de recommandations scientifiques.

2 - PHYSIQUE DES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Le domaine des interactions fondamentales recouvre une large palette de phénomènes, à des échelles aussi bien subatomiques - particules et noyaux - qu'astronomiques, en cosmologie et en astrophysique. Ce domaine qui intéressait traditionnellement des communautés de physiciens assez différenciées a été le témoin ces dernières années de rapprochements : entre physique nucléaire et physique des particules en ce qui concerne la physique hadronique (c'est-à-dire des interactions fortes) ; entre physiciens nucléaires ou des particules et astrophysiciens ou relativistes dans des efforts conjoints dans les domaines de l'astrophysique nucléaire, de la cosmologie ou de la détection d'ondes gravitationnelles.

2. 1 PHYSIQUE DES INTERACTIONS FORTES

L'étude de l'interaction forte porte sur les constituants de la matière que sont les noyaux, leurs constituants (proton et neutron, nommés généralement nucléons) et autres "hadrons", et à un niveau encore plus élémentaire, les quarks et gluons. Cette physique rassemble les physiciens nucléaires et ceux des particules ; on associe traditionnellement les premiers à la physique de basse et moyenne énergie, et les seconds à celle de moyenne et haute énergie mais cette distinction va tendre à s'estomper dans le domaine des collisionneurs de très haute énergie dédiés aux collisions d'ions lourds : RHIC aux Etats-Unis et LHC en Europe.

Les grands thèmes de recherche en physique nucléaire de basse énergie peuvent être classés selon les deux rubriques, structure nucléaire d'une part, mécanismes et réactions nucléaires d'autre part. La liste des axes de recherche présentés dans ce qui suit est loin d'être exhaustive, mais elle est assez représentative des travaux d'une grande majorité des physiciens nucléaires.

En structure nucléaire, un effort majeur porte sur l'étude des noyaux à la limite de stabilité. L'arrivée prochaine de machines à faisceaux radioactifs en France (SPIRAL à Ganil) et à l'étranger permettra d'étudier expérimentalement les propriétés des noyaux riches en neutrons. Ces expériences devraient permettre d'affiner les modèles existants sur les noyaux proches de la ligne d'évaporation de neutrons. Ces études de structure sur les noyaux riches en neutrons intéressent différents processus en astrophysique. D'autres axes de recherche actifs concernent l'étude théorique des noyaux transactinides et superlourds, en liaison avec l'activité expérimentale soutenue sur la production de noyaux superlourds à Dubna et à Darmstadt (GSI), et aussi la recherche d'isomères de forme, c'est-à-dire de noyaux très déformés stables, avec des enjeux théoriques et éventuellement technologiques (possibles implications dans le stockage d'énergie).

Dans le domaine des réactions nucléaires, l'étude des différents mécanismes permettant

d'expliquer la fragmentation des noyaux très excités formés par collisions d'ions lourds donne lieu à de nombreux travaux. La tendance actuelle est d'essayer de donner une image dynamique de la cassure des noyaux. Une autre activité importante concerne la théorie du transport nucléaire, en vue d'extraire l'équation d'état nucléaire à partir des résultats expérimentaux sur les collisions d'ions lourds. Enfin, un domaine qui devrait prendre de l'essor dans les années à venir concerne les mécanismes de réactions sur des cibles isomériques.

La théorie de l'interaction forte, la chromodynamique quantique, est issue de l'étude de la physique à haute énergie (ou à courte distance). L'expérience montre en effet que les couplages entre constituants de la matière hadronique - quarks et gluons - sont faibles à haute énergie. Or seules les théories de jauge, qui forment une classe très restreinte de théories des champs, jouissent de cette propriété de "liberté asymptotique". La chromodynamique quantique est ainsi une théorie de jauge couplant quarks et gluons. Grâce à la liberté asymptotique, la théorie des perturbations rend compte des interactions à courte distance : production dans les collisions de haute énergie de particules à grand moment transverse, jets, bosons de jauge, etc. La question actuelle est d'aller au-delà des calculs existants et d'incorporer les effets non-perturbatifs. L'une des approches consiste en des resommations partielles de la série perturbative. Elle conduit à d'intéressants développements portant sur les fonctions de structure à petit x . Ces fonctions déterminent la probabilité qu'un "parton" (quark ou gluon), constituant d'un proton, emporte une fraction x de l'impulsion de ce proton. Elles sont actuellement mesurées avec une précision croissante dans les collisionneurs électron-proton (HERA à Hambourg, ou futur RHIC). L'étude de ces fonctions de structure intéresse aussi la communauté de physique nucléaire après le résultat inattendu de l'expérience EMC indiquant que les quarks contribuent peu au spin du nucléon.

Une autre approche non-perturbative consiste à discrétiser la théorie sur un réseau d'espace-temps, ce qui permet d'effectuer des simulations numériques permettant d'atteindre les propriétés de basse énergie de la théorie. Elle sera traitée dans la partie sur les simulations numériques. Rappelons à

ce point que cette discrétisation de la théorie sur réseau offre actuellement les indications théoriques les plus probantes - quoique non rigoureuses - de la validité de l'hypothèse fondamentale du confinement des quarks, c'est-à-dire le fait que ces constituants de la matière n'apparaissent pas isolément.

Enfin, une activité théorique importante accompagne les investigations expérimentales portant sur la production du plasma de quarks et gluons dans les collisions d'ions lourds ultrarelativistes (noyaux accélérés à très haute énergie). Une telle phase déconfinée, qui constituerait un nouvel état de la matière à haute température ou haute densité, est prédite par des simulations numériques sur réseau. Des progrès importants ont été accomplis dans la description de l'équation d'état et des propriétés de transport de ce plasma. Ceci a facilité les prédictions quantitatives sur l'émission de photons et de dileptons d'un plasma de quarks et gluons, la détermination de nouveaux coefficients de transport, etc.

Parallèlement, des efforts ont porté sur l'obtention de théories effectives de QCD à basse énergie. En particulier, on sait maintenant déduire de la chromodynamique quantique des théories effectives incorporant la symétrie "chirale" et sa brisure et fournissant un cadre prédictif à basse énergie ; on sait aussi inclure de manière systématique les effets des quarks lourds à basse énergie.

2. 2 INTERACTIONS FAIBLES ET THÉORIES UNIFIÉES

Ces dernières années ont vu la confirmation du "Modèle Standard" des interactions électrofaibles proposé dans les années soixante-dix. Les expériences au collisionneur LEP du CERN ont pu confirmer la théorie de Glashow-Weinberg-Salam avec une précision de quelques pour mille. Toutefois, la clef de voûte du système, la particule de Higgs, dont l'existence est supposée expliquer le mécanisme d'apparition des masses de la plupart des particules observées, n'a pas encore été découverte, ce qui laisse le champ à plusieurs hypothèses sur sa nature exacte : s'agit-il d'une particule fondamentale ou d'un état lié, condensat de fermions

par exemple ? La découverte de cette particule constituerait une confirmation cruciale de la théorie, et à l'inverse, sa non-découverte poserait un défi majeur aux théoriciens.

Dans le domaine des interactions faibles une double évolution d'apparence contradictoire s'est produite : d'une part, les mesures expérimentales les plus précises au collisionneur LEP ont confirmé que la physique fondamentale est bien décrite à cette échelle par le Modèle Standard (c'est ainsi que la masse du quark top a pu être prédite avant sa toute récente découverte) ; de l'autre, des questions purement théoriques - stabilité de la théorie sous les corrections quantiques, origine des larges hiérarchies observées dans le spectre de masse des quarks et leptons - conduisent à envisager des théories englobant et dépassant cette théorie.

Les modèles "au-delà du Modèle Standard" basés sur la supersymétrie semblent actuellement privilégiés. Rappelons que le principe de la supersymétrie est de coupler fermions et bosons comme partenaires de cette symétrie d'un nouveau type. Il en résulte de fortes contraintes sur la structure de la théorie, qui restreignent les arbitraires rencontrés dans les théories usuelles. La physique de basse énergie des extensions supersymétriques du Modèle Standard demeure tout à fait compatible avec l'expérience, mais les propriétés liées à leur structure pourraient permettre de résoudre les problèmes laissés ouverts. On se retrouve à l'heure actuelle dans la situation totalement inédite où une majorité de théoriciens travaillant dans le domaine semblent convaincus de la nécessité de la supersymétrie alors qu'aucune confirmation expérimentale n'existe. C'est pourquoi la découverte de nouvelles particules qui seraient les partenaires supersymétriques des particules usuelles serait une étape fondamentale. Ceci justifie le travail phénoménologique important accompli pour étudier les capacités de découverte de nouvelles particules et les mérites respectifs des diverses machines (Tevatron, LEP200, LHC ou un futur collisionneur linéaire électron-anti-électron).

Les travaux sur les interactions faibles ne se limitent pas aux théories supersymétriques. Deux domaines bénéficient d'une situation favorable avec la promesse de résultats expérimentaux dans un

avenir proche : l'étude de la violation de CP et la physique des neutrinos. Dans les deux cas, il s'agit de tester les mélanges qui résultent du fait que les fermions du Modèle Standard ne sont pas états propres de masse. Selon l'interprétation actuelle, la violation de la symétrie CP serait liée à l'apparition de phases complexes dans les mélanges de quarks. Le démarrage prochain d'une "usine" à mésons B (contenant le quark b) aux Etats-Unis devrait permettre d'obtenir pour la première fois des informations précises sur certains de ces mélanges, et par là, des indications précieuses sur les mécanismes responsables des hiérarchies de masse. Par ailleurs, demeure le problème du déficit de neutrinos solaires observés, par rapport au flux prédit par les modèles solaires. Ceci suggère qu'il y ait des transitions entre divers types de neutrinos (on parle d'oscillations) et que ces neutrinos aient une masse. Si cette hypothèse se vérifiait, cela serait un signal sans équivoque que le Modèle Standard est insuffisant. Des résultats expérimentaux importants sont attendus dans ce domaine dans un futur proche. Les progrès dans ce domaine pourraient être très importants pour la compréhension de certains problèmes en cosmologie : prédominance de la matière sur l'antimatière dans l'Univers, et nature de la matière cachée.

Les extensions supersymétriques du Modèle Standard se situent dans le cadre des tentatives d'unification des interactions : les théories de grande unification cherchent à unifier les interactions électromagnétique, faible et forte tandis que les théories de cordes sont les meilleures, voire les seules, théories candidates à une unification de toutes les interactions connues (y compris gravitationnelle). Ces théories de cordes identifient les particules à des modes propres d'oscillation d'objets unidimensionnels. Elles fournissent un cadre d'investigations particulièrement riche qui dépasse la physique des particules au sens strict. Elles ont aussi des implications en cosmologie et gravitation (*voir plus loin*), ou sur une possible reformulation des principes de la mécanique quantique. En ce qui concerne la physique des particules, de grands progrès (remarquables vu la complexité mathématique du problème) ont été réalisés dans la construction explicite et détaillée de modèles basés sur les cordes. Pour obtenir alors des prédictions vérifiables expérimentalement, il est nécessaire de dis-

poser d'une théorie effective de basse énergie. Indépendamment de ce contexte des cordes, un effort théorique important a été accompli pour mettre au point des méthodes fiables qui permettent d'identifier la théorie effective à basse énergie à partir d'une théorie plus fondamentale sous-jacente (pour prendre un exemple plus phénoménologique, ceci permet par exemple d'identifier au LEP les effets induits par une théorie au-delà du Modèle Standard).

Deux problèmes majeurs subsistent pour identifier la (les ?) théorie(s) de cordes qui pourrait être la théorie de toutes les interactions connues : celui de la brisure (non-perturbative ?) de la supersymétrie, et le nombre *a priori* considérable de modèles envisageables. Dans ces deux problèmes, la solution pourrait venir de développements tout récents liés au concept de dualité. Il s'agit au départ d'une généralisation aux théories de champs supersymétriques de la dualité bien connue entre électricité et magnétisme. Interprétée comme dualité entre couplage faible et couplage fort, cette dualité apparaît aussi dans les théories de cordes. Or une dualité de type couplage faible-couplage fort permet de relier entre elles différentes théories supersymétriques, que ce soit des théories de jauge (dualité de Seiberg-Witten) ou des théories de cordes. Dans le premier cas, cela pourrait permettre de traiter le problème du confinement des quarks ou celui de la brisure de supersymétrie. Dans le second cas, il est suggéré que toutes les théories de cordes soient des réalisations différentes d'une hypothétique théorie mère ("M-théorie" ou "F-théorie").

Ces idées ont donné lieu à une très intense activité au cours des deux dernières années. L'importance de ces développements et leur forte coloration mathématique justifie que nous y revenions plus bas dans la section de physique mathématique.

2. 3 GRAVITATION, COSMOLOGIE ET ASTROPHYSIQUE

La mécanique céleste relativiste est aussi très importante en astrophysique pour la description du mouvement des pulsars binaires et des binaires en coalescence. Il est maintenant important d'avoir une

formulation relativiste du problème à N corps. Les outils théoriques en gravitation relativiste existent pour l'essentiel mais demandent plus de développements. Dans le domaine de l'astrophysique, la gravitation relativiste est importante pour les modèles de quasars et de noyaux actifs de galaxies, les systèmes binaires, les disques d'accrétion, tous les systèmes contenant (hypothétiquement) des trous noirs, etc.

L'astrophysique nucléaire est aussi un domaine de grande activité. On peut citer dans le domaine de la nucléosynthèse le calcul de l'abondance des éléments jusqu'au Zinc, et une meilleure compréhension des phénomènes qui se produisent lors de l'explosion des supernovae. Enfin, on peut noter des progrès théoriques sur la structure des étoiles à neutrons, en particulier dans la zone où matière nucléaire et matière purement neutronique coexistent.

En ce qui concerne les aspects expérimentaux de la gravitation, des projets approuvés ou en cours devraient donner dans les années à venir des résultats importants pour la théorie. La théorie de la détection des ondes gravitationnelles est bien comprise. En revanche, la théorie de l'émission de ces ondes nécessite de gros efforts théoriques dans les années proches alors que vont démarrer les expériences de détection LIGO et VIRGO. L'effort à accomplir est à la fois théorique et numérique, et requiert aussi des progrès dans l'analyse des données. D'autres programmes expérimentaux testant la théorie de la gravitation sont en progrès ou en projet : tests améliorés du Principe d'Équivalence, mesures de la constante de Newton G (actuellement conflictuelles), tests de la loi en $1/r^2$, comparaison d'horloges (peut-être avec des horloges dans l'espace).

Le problème d'une formulation quantique de la gravitation peut désormais être attaqué selon deux approches : le formalisme canonique (Ashtekar) et la théorie des cordes. La théorie des cordes fournit un cadre pour décrire toutes les interactions fondamentales, mais l'une de ses grandes réussites est d'inclure la gravitation dans un cadre quantique cohérent. Dans cette perspective, une activité théorique importante s'est développée dans les dernières années au sujet des trous noirs,

en particulier sur les problèmes de perte d'information à leur voisinage. Le rôle des effets quantiques est mieux compris grâce à des modèles bidimensionnels solubles.

La cosmologie représente un vaste sujet d'investigation aux multiples connexions avec les développements en physique des particules. On peut distinguer plusieurs thèmes en liaison avec des résultats expérimentaux récents qui ont marqué le domaine : d'une part un domaine couvrant les structures à grande échelle, la formation de galaxies, les cordes cosmiques et autres défauts topologiques en liaison avec les résultats du satellite COBE sur les anisotropies du fond cosmique ; d'autre part, la recherche de matière noire baryonique (en liaison avec les résultats des expériences utilisant l'effet de microlentille gravitationnelle) ou non-baryonique (recherche de particules supersymétriques ou d'axions).

Les développements récents en physique des hautes énergies permettent d'aborder avec un regard renouvelé des sujets tels que asymétrie matière-antimatière, transition de phase associée à une brisure spontanée de symétrie (par exemple électrofaible), inflation, ... Dans le cadre d'une théorie de cordes, on attend des modifications du secteur gravitationnel à cause de la présence d'un champ de masse nulle nommé dilaton ou de champs scalaires appelés modules. Les implications cosmologiques peuvent alors fournir des tests de la théorie, dans un secteur difficilement accessible par les méthodes traditionnelles de la physique des particules parce que ces champs interagissent très faiblement avec la matière.

3 - PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

La recherche en physique mathématique présente plusieurs aspects. Son objectif premier est d'affiner les méthodes empiriques utilisées couramment par les théoriciens, de mieux définir en termes mathématiques les objets considérés ou les

opérations effectuées et d'en déduire des résultats généraux. Ce souci de rigueur n'est pas purement académique. Les exemples abondent de problèmes actuels qui demeurent dans un état incertain faute d'un traitement suffisamment précis. Dans certains cas, une approche plus rigoureuse a permis de clarifier la situation.

La physique mathématique était traditionnellement concentrée autour de quelques sujets : mécanique quantique et analyse spectrale, théorie quantique des champs et physique des hautes énergies, fondements de la mécanique statistique, etc. Elle s'est ouverte dans les dernières années à des problèmes concrets venant de la physique de la matière condensée, tels les systèmes fortement corrélés dont l'analyse nécessite des méthodes mathématiques non perturbatives. Cette remarque vaut aussi pour la physique de la matière molle et ses phénomènes critiques. Les méthodes de la théorie quantique des champs, en particulier du groupe de renormalisation et de l'analyse multi-échelles, continuent à jouer un rôle fondamental dans l'analyse mathématique des phénomènes les plus complexes.

Au cours des dernières années, les interactions entre la physique théorique et les mathématiques pures (analyse, géométrie, topologie, théorie des nombres, probabilités) ont fortement augmenté. La part grandissante des mathématiques les plus avancées dans la physique théorique moderne a conduit un nombre important de théoriciens à effectuer des travaux de physique mathématique. Cette interaction physique-mathématiques a aussi porté ses fruits en mathématiques pures où l'on a vu certaines percées spectaculaires grâce aux idées provenant de la physique théorique (théorie des champs et topologie, théorie des nœuds, groupes quantiques, ...). La théorie des cordes et les domaines reliés de théories de champs conformes et/ou intégrables ont ainsi été un moteur puissant de création mathématique.

Passons maintenant en revue quelques directions saillantes de la recherche récente en physique mathématique. Plusieurs des thèmes ont déjà été évoqués dans la section précédente ou le seront dans la suivante ; l'objet de cette discussion est de les examiner ici sous un angle plus mathématique

et de faire ressortir comment des traitements communs peuvent s'appliquer à des problèmes variés.

La dualité dans les théories de jauge supersymétriques qui est apparue comme une généralisation de la dualité entre l'électricité et le magnétisme de la théorie de Maxwell est issue de la découverte par Seiberg et Witten que le régime fortement couplé de basse énergie des théories de jauge (de Yang-Mills) en quatre dimensions possédant une supersymétrie étendue peut être décrit à l'aide d'une autre théorie de jauge faiblement couplée. Cette découverte, fondée sur des études antérieures du spectre des monopoles et de la non-renormalisation des théories de jauge supersymétriques, a permis de mieux comprendre le régime notablement difficile du couplage fort de ces théories. Indépendamment des espoirs qu'elle suscite en physique des particules, elle a immédiatement eu des applications en mathématiques en donnant naissance aux invariants topologiques de Seiberg-Witten qui sont reliés à ceux de Donaldson tout en étant plus simples à utiliser. Ces invariants ont permis la démonstration de nombreux résultats nouveaux sur les variétés de dimension quatre.

On dispose actuellement d'un faisceau d'indications montrant que la dualité des théories de jauge supersymétriques reflète une dualité plus profonde au niveau des théories de (super-) cordes. Cette dualité entre cordes faiblement et fortement couplées compléterait ainsi l'ensemble des dualités mieux connues dans la théorie perturbative des cordes. Physiquement ces dualités signifieraient que la physique au-delà de l'échelle de Planck peut aussi être décrite par la théorie perturbative des cordes. Ce réseau de dualités actuellement très étudiées conduit à un nombre croissant de relations entre théories de cordes, ainsi qu'à des conjectures de nature géométrique qui se confirment peu à peu. L'étude de la dualité devrait certainement continuer à donner de nouvelles impulsions aux travaux en théorie des champs supersymétriques, conformes et/ou topologiques ainsi qu'en mathématiques pures. L'espoir est que cette étude permettra de comprendre la théorie non-perturbative des cordes, qui serait aussi la théorie d'autres objets étendus.

Rappelons que la théorie quantique de Yang-Mills, (une théorie de jauge), sans supersymétrie,

sous-jacente au modèle standard dans son état actuel, reste mal contrôlée dans le régime de grande distance. Des progrès considérables ont été effectués dans la définition mathématique précise, non-perturbative, de cette théorie, en s'appuyant sur des travaux en analyse de Fourier fine (découpage de l'espace de phases selon la méthode "multi-échelles"). Néanmoins la construction non-perturbative des observables et la preuve du confinement des quarks demeurent des problèmes ouverts et difficiles.

Les systèmes intégrables constituent une branche de la physique très étudiée depuis le siècle dernier, puisqu'il s'agit de problèmes qu'on sait résoudre exactement. Plus récemment, leur étude s'est élargie aux systèmes quantiques et aux théories des champs. Dans ces dernières années, la théorie de ces systèmes intégrables a subi une forte impulsion venue des progrès de la théorie des modèles invariants conformes de champs quantiques en deux dimensions. Ceux-ci décrivent des théories sans échelle de masse mais admettent des déformations massives qui demeurent intégrables, donc en principe exactement solubles. L'étude de généralisations des modèles intégrables sur réseau bidimensionnel introduits par Baxter a permis de comprendre la structure algébrique responsable de leur intégrabilité. Ces travaux ont abouti à l'idée de symétries quantiques (ou déformées) - groupes quantiques - qui a attiré beaucoup d'attention dernièrement, tant des physiciens que des mathématiciens. Les efforts actuels portent sur l'exploitation de ces symétries quantiques dans la résolution complète des théories considérées. Ils fournissent des résultats exacts et non-perturbatifs, riches d'enseignements sur des systèmes quantiques, et commencent à trouver des applications à des problèmes concrets de physique de la matière condensée (*voir ci-dessous*).

La recherche sur les symétries et les groupes quantiques peut être considérée comme une branche de la géométrie non-commutative, un domaine des mathématiques qui se développe vigoureusement. La géométrie non-commutative possède d'autres relations avec la physique théorique. Vu le rôle de la géométrie en physique classique, il n'est pas trop risqué de prévoir des applications grandissantes de la géométrie dans la physique quantique.

A l'opposé des systèmes intégrables, on trouve les systèmes physiques à comportement chaotique. Les plus simples d'entre eux sont décrits par des équations différentielles ordinaires. Leur étude a donné naissance à la théorie des systèmes dynamiques, aujourd'hui une branche mûre des mathématiques ayant de multiples applications. Le centre d'intérêt est maintenant la recherche de comportements chaotiques dans les systèmes à nombre infini de degrés de liberté. On trouve des exemples intéressants de tels systèmes, soit discrets, soit continus, décrits par des équations aux dérivées partielles, en physique (mécanique des milieux continus, croissance de structures dans la matière condensée, etc.) et ailleurs. Les concepts de la théorie des systèmes dynamiques (attracteurs, mesures invariantes, sensibilité aux conditions initiales, exposants de Liapunov) y trouvent des applications, mais l'étude de la plupart des systèmes chaotiques étendus présente des problèmes qualitativement différents et complètement ouverts comme ceux de la turbulence.

Les progrès dans ces domaines sont relativement lents mais, dernièrement, assez nets, en particulier grâce à l'application à ces problèmes de méthodes développées dans d'autres domaines de la physique et des mathématiques (groupe de renormalisation, invariance conforme et instantons de la théorie des champs, méthode des répliques de la théorie des systèmes désordonnés, théorie KAM des systèmes dynamiques). D'autres directions intéressantes dans l'étude des systèmes chaotiques sont représentées par la recherche sur le chaos quantique et sur l'idée originale de criticalité auto-organisée dans les systèmes hors d'équilibre. Ces deux domaines sont l'objet de beaucoup d'activité.

La mécanique statistique est depuis longtemps une des branches les plus actives de la physique mathématique. Citons les progrès récents concernant l'étude des transitions de phase dans les modèles quantiques ainsi que dans la description microscopique de la coexistence de phases. L'étude des propriétés interfaciales a été développée aussi bien du point de vue statique que dynamique (construction de Wulff, mouillage, nucléation, métastabilité).

La théorie des systèmes désordonnés est un domaine de la mécanique statistique contemporaine en pleine évolution. Elle peut aussi être abordée par les méthodes de la physique mathématique. On note de nombreux progrès, en particulier dans l'important problème de localisation (propriétés de conduction électronique dans les milieux désordonnés). Cependant la transition vers une phase d'états délocalisés (transition d'Anderson-Mott) n'a pas encore été démontrée rigoureusement. Les techniques récentes de l'analyse multi-échelles développées dans l'étude des théories de champs de jauge pourraient contribuer efficacement à ce sujet.

Il faut aussi noter un regain d'intérêt en physique mathématique au sujet des verres de spin. Il s'agit de systèmes désordonnés, proches des verres ordinaires, dont les propriétés d'approche à l'équilibre sont particulièrement délicates à comprendre. Beaucoup de problèmes demeurent (en particulier à propos de la "brisure de la symétrie des répliques"), que la physique mathématique pourrait efficacement contribuer à résoudre. On commence à voir un début de progrès mathématique dans ce domaine.

Les propriétés de la matière condensée à basse température posent le problème de la description du comportement de grands systèmes électroniques régis par la mécanique quantique. En ce qui concerne les progrès récents liés à la physique mathématique, on peut citer l'application des théories de champs conformes (algèbres de courants, algèbres W , théories conformes dans le demi-plan) à la théorie de l'effet Hall quantique (quantification de la conductance électronique dans un champ magnétique intense) ou à l'effet Kondo, les travaux sur le liquide de Fermi normal et anormal en basses dimensions, l'application des méthodes d'analyse multi-échelles aux théories de la superconductivité et de la condensation de Bose-Einstein. Citons aussi les applications des méthodes de la théorie des systèmes intégrables à l'étude des chaînes de spins quantiques et des statistiques fractionnaires, ainsi que les travaux sur les modèles de fermions fortement corrélés (modèles de Hubbard et $t - J$).

Un autre domaine qui se développe rapidement est celui des phénomènes critiques rencontrés

dans la physique de la matière molle (statistique des membranes de toutes sortes, en interaction et en milieu aléatoire, etc.). Les physiciens mathématiciens trouvent d'importants problèmes à résoudre dans ce domaine.

4 - PHYSIQUE DES SYSTÈMES À GRAND NOMBRE DE DEGRÉS DE LIBERTÉ

La variété des sujets et des méthodes dans ce domaine de la physique est considérable. Les sujets mentionnés ont été choisis comme représentatifs des résultats théoriques obtenus et des nouvelles orientations de la discipline au cours des quatre dernières années. Ils ont été traités de façon nettement moins détaillée que dans les sections précédentes, en raison de leur foisonnement et aussi de leur pluridisciplinarité.

4. 1 MÉCANIQUE STATISTIQUE CLASSIQUE SYSTÈMES COMPLEXES SURFACES ALÉATOIRES

Les travaux les plus marquants effectués en mécanique statistique des systèmes classiques continus portent sur les systèmes complexes. Associant approches analytiques et simulations numériques, les développements théoriques concernent la physique des mélanges, des solutions, des cristaux liquides, des colloïdes, des polymères, des agrégats moléculaires, des verres, des gels, des milieux granulaires. Les propriétés des interfaces liquide-gaz, liquide-liquide, fluide-solide sont aussi activement étudiées.

Basés sur des modèles simples, ces travaux se proposent de déterminer les propriétés qualitatives des systèmes réels. Par exemple, les diagrammes de phases sont interprétés et prédits en termes des

caractéristiques générales des molécules : dimensions, formes, charges, multipôles électriques. Les corrélations et les propriétés de transport (diffusion, viscosité, ...) sont calculées pour analyser et mettre en évidence les propriétés universelles des transitions structurales des polymères, des verres et des gels. Les travaux sur les agrégats portent sur leur croissance et leurs propriétés structurales (fractales, multifractales). La nucléation et la croissance des phases solides au sein d'un liquide sont étudiées aux échelles micro- et méso-scopiques (croissance dendritique).

Le développement d'une théorie apte à rendre compte de phénomènes quantiques dans les systèmes classiques (électrons dans les métaux liquides et les plasmas denses, électron solvaté, échange intermoléculaire de proton) est activement poursuivi. Des méthodes, inspirées de ces travaux, renouvellent l'étude des suspensions colloïdales.

La physique des milieux désordonnés est en progrès constant et bénéficie des idées développées dans la théorie des verres de spin. Les réalisations expérimentales incluent, outre les verres de spin, les lignes et interfaces en milieu aléatoire, les anti-ferromagnétiques dilués, les fluides dans des solides poreux, etc. On peut mentionner particulièrement le problème de l'accrochage des lignes de flux dans les supra-conducteurs. Pour l'étude de ces systèmes où l'hypothèse ergodique n'est pas vérifiée, de nouveaux concepts et méthodes ont dû être proposés qui étendent le champ d'application de la mécanique statistique à d'autres domaines : réseaux de neurones formels, optimisation combinatoire, théorie des codes correcteurs d'erreurs.

Les caractéristiques singulières de l'évolution dynamique des systèmes désordonnés et des verres – phénomènes de vieillissement liés à l'absence d'invariance par translation dans le temps et d'application valable du théorème de fluctuation-dissipation – ont été étudiées par de nouvelles théories avec des résultats très encourageants.

Adoptant une problématique différente, de nombreux travaux portent sur la modélisation la plus réaliste possible des systèmes réels (molécules, macromolécules, protéines ...) et en déduisent par le calcul les grandeurs expérimentales thermodyna-

miques ou structurales. Ce domaine de la mécanique statistique appliquée connaît, pour ses applications industrielles potentielles, un essor considérable.

La mécanique statistique des surfaces aléatoires est intimement liée à la théorie quantique de la gravitation dans sa formulation fonctionnelle. Elle joue un rôle très important dans la théorie des membranes dont les progrès intéressent la chimie-physique et la biologie théorique. Parmi les développements récents, il faut citer l'étude des interactions stériques (auto-évitement) entre surfaces aléatoires par des techniques de théorie des champs.

4. 2 MÉCANIQUE STATISTIQUE QUANTIQUE

Dans ce qui suit, on a privilégié un aspect de ce domaine : l'étude des fermions fortement corrélés et de l'effet Hall quantique. Ceci n'épuise pas le sujet ; il existe en particulier des contributions importantes en physique des plasmas faiblement quantiques.

Le phénomène de la supraconductivité à haute température est responsable en grande partie de l'intérêt porté aux fermions fortement corrélés. Cette découverte qui date d'une dizaine d'années a amené un renouveau d'intérêt pour l'étude des matériaux antiferromagnétiques et des isolants de Mott. En effet, les oxydes de cuivre dopés, qui présentent des propriétés supraconductrices à des températures élevées, sont dans leur état normal des antiferromagnétiques de Heisenberg. Bien que l'incidence exacte de ces propriétés magnétiques sur l'existence de l'état supraconducteur soit loin d'être comprise, les travaux entrepris ont amené des développements théoriques intéressants :

- étude du modèle de Hubbard et de certaines variantes (modèle $t - J$) ;

- développement de nouvelles méthodes d'approximation pour comprendre la transition de Mott (développement en $1/d$, d dimension de l'espace).

Il existe beaucoup d'autres systèmes qui se rattachent à ces sujets : citons les composés fermions lourds, les conducteurs moléculaires, l'hélium 3 adsorbé, et aussi les systèmes magnétiques frustrés.

Par ailleurs, ces recherches ont été une source d'inspiration dans l'étude de systèmes en basse dimension. Pour les systèmes unidimensionnels, on dispose maintenant de techniques analytiques très variées (Ansatz de Bethe, méthodes de bosonisation) et numériques (Monte Carlo quantique, diagonalisation exacte, groupe de renormalisation numérique). La compréhension théorique actuelle des systèmes bidimensionnels est loin d'être aussi avancée. A titre d'exemple, l'existence ou l'absence de liquides de Fermi bidimensionnels demeurent discutées. Une des propriétés spécifiques des systèmes bidimensionnels qui a été la plus explorée concerne l'existence de particules exhibant une statistique intermédiaire entre celle de Bose-Einstein et celle de Fermi-Dirac (anyons). Leur rôle dans l'interprétation de l'effet Hall quantique fractionnaire a donné lieu à de nombreux travaux.

La théorie de l'effet Hall entier pour des électrons sans interactions est considérée comme bien établie. L'activité actuelle porte principalement sur l'effet fractionnaire (en particulier pour $\nu = 1/2$), le rôle des interactions sur la polarisation de spin et aussi la relation entre les courants de bords et les liquides de Luttinger chiraux. On s'attend à ce que ce domaine reste très vivant. La physique des champs magnétiques intenses attire en effet de plus en plus d'expérimentateurs, et une nouvelle génération de laboratoires voit le jour (Laboratoire National de Tallahassee aux Etats-Unis, à Tsukuba au Japon et peut-être un nouveau Laboratoire Européen).

4. 3 PHYSIQUE NON LINÉAIRE. CHAOS

Le domaine de la physique non-linéaire constitue sans doute un exemple de pluridisciplinarité harmonieuse, dans la mesure où il permet des contacts fructueux entre plusieurs sous-

disciplines des sciences physiques : mécanique, optique, matière condensée, chimie, et des mathématiques, ainsi que des incursions en direction d'autres sciences naturelles, telles que la biologie ou la géologie. L'unité de la discipline provient des concepts mathématiques utilisés, principalement ceux d'instabilité ou ceux issus de la théorie des équations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles (bifurcations), et d'un parti pris d'analyser les phénomènes de manière qualitative, à l'aide de l'outil numérique si nécessaire. Cette façon d'aborder la physique a acquis au cours de ces dernières années une reconnaissance aussi bien en France qu'à l'étranger, au sein de la communauté des physiciens (création d'instituts dans plusieurs pays, enseignements des concepts fondamentaux à l'université, vulgarisation très large). L'activité scientifique y est soutenue.

La théorie du chaos continue de connaître des développements importants, comme par exemple une meilleure compréhension des aspects statistiques (diffusion), l'optimisation du contrôle des comportements erratiques à l'aide de petites perturbations, le développement de codes numériques fiables pour le calcul de la stabilité du système solaire, etc. Aux échelles où les aspects quantiques interviennent, le chaos joue aussi un rôle essentiel en créant des classes d'universalité à l'intérieur desquelles différents systèmes manifestent un comportement identique. Ceci concerne par exemple les fluctuations spectrales des systèmes hamiltoniens ainsi que les fluctuations de la conductance électronique à travers des cavités chaotiques. Ces expériences, faites dans des cavités dont la taille est de l'ordre de quelques microns et dans des conditions telles que les électrons gardent la cohérence de phase dans tout le système, sont un exemple typique de ce qu'on appelle la physique mésoscopique. La vitalité actuelle de cette discipline est en grande partie liée à une convergence aussi bien thématique que méthodologique (théorie des matrices aléatoires, modèle sigma non-linéaire, méthodes semi-classiques) de la communauté du chaos quantique et de celle des systèmes mésoscopiques, plus proche de la physique de la matière condensée.

La physique non-linéaire conduit à une mobilité thématique importante, dans la mesure où les

méthodes d'approche des phénomènes sont assez souples pour permettre d'explorer des problèmes très différents. Ainsi, après avoir obtenu des résultats fondamentaux dans le domaine de la croissance et des instabilités hydrodynamiques, et dégagé une description qualitative de nombreux phénomènes connus depuis très longtemps, mais mal compris jusqu'alors, une fraction importante de la communauté s'intéresse à d'autres thématiques.

Certaines problématiques relativement anciennes reviennent au premier plan. L'activité en mécanique du solide (flambage, fractures) constitue un bon exemple. Les problèmes sont souvent formulés à l'aide d'équations aux dérivées partielles particulièrement impénétrables, telles que l'équation de Föppl-von Karman pour le flambage des plaques. Une combinaison de simulations numériques simples, et l'application de concepts qualitatifs devraient permettre de progresser dans ces sujets importants et ardues. Le problème de la turbulence hydrodynamique développée a déjà attiré une partie importante de la "communauté non-linéaire". Ce mouvement a été en partie provoqué par les grandes tendances internationales, mais constituait une suite thématique logique après l'étude des instabilités hydrodynamiques. Un couplage très naturel a été établi avec un certain nombre d'équipes travaillant depuis longtemps dans ce domaine (mécanique au sens large). La confrontation des points de vue a été un facteur d'enrichissement mutuel. L'utilisation judicieuse des moyens informatiques permettant des calculs détaillés, mais surtout l'étude systématique d'expériences de laboratoire bien contrôlées ont donné lieu à une activité très fructueuse. La visualisation de structures cohérentes (filaments de vorticité) est un succès reconnu de cette activité. Un regain d'intérêt théorique pour quelques problèmes simplifiés, mais bien posés – les modèles en couche (modèles simplifiés où l'espace de Fourier est modélisé par une ligne), l'équation de Burgers et les problèmes de dispersion turbulente – devrait permettre dans ce domaine d'aller au-delà de considérations heuristiques qui permettent une bonne représentation des résultats expérimentaux.

Dans tous ces domaines, l'outil numérique est essentiel. L'utilisation de machines multiprocesseurs puissantes, financ rement à la portée d'un labora-

toire, et permettant ainsi une utilisation interactive, devrait avoir un impact significatif dans un futur proche.

4. 4 PLASMAS

La physique des plasmas est un des domaines où la modélisation a pris le plus d'importance, et cette tendance s'est encore affirmée ces dernières années. Mais la modélisation des plasmas possède des spécificités propres, liées à la complexité des phénomènes mis en jeu. Dans la majorité des cas, les plasmas cinétiques classiques (plasmas chauds de fusion, par exemple) ne se prêtent pas à une description par des équations fluides traitables numériquement en deux ou trois dimensions. Leur étude est alors abordée par une hiérarchie de modèles, allant des modèles complètement cinétiques aux modèles fluides, avec de multiples intermédiaires.

Parallèlement, les concepts théoriques se sont déplacés du quantitatif vers le qualitatif : les modèles théoriques de turbulence, par exemple, ont pris moins d'importance, dans la mesure où la turbulence en plasmas n'exhibe pas les comportements universels que l'on peut rencontrer ailleurs. Par contre, les théoriciens ont un rôle central dans l'approche critique des expériences et des modélisations, par leur connaissance des multiples phénomènes qui opèrent simultanément, de leur ordre de grandeur, et des types de situations et de modèles où ils sont importants.

Cette hiérarchie de modèles donne naturellement lieu à une multiplicité d'outils numériques qui ont été développés dans les laboratoires : codes particuliers, fluides, hybrides. Les codes particuliers ont été parallélisés et vont constituer une des applications les plus importantes des moyens massivement parallèles d'IDRIS. En complément, des modélisations simplifiées, souvent extrêmement efficaces, utilisent les moyens locaux des laboratoires. Cette multiplicité d'outils ne va pas sans poser quelques problèmes : les développements numériques demandent beaucoup de travail, et les équipes sont peu nombreuses.

Or de grands projets concernent la physique des plasmas : Laser Mégajoule, projet ITER ; il faut y ajouter les plasmas spatiaux et astrophysiques liés à l'exploration du système solaire et de la magnétosphère. Pour y faire face, les physiciens des plasmas doivent encore renforcer les collaborations interdisciplinaires, avec les expérimentateurs, les astrophysiciens et les mathématiciens appliqués.

5 - LA PHYSIQUE THÉORIQUE AUX FRONTIÈRES

L'intérêt de nombreux physiciens pour des problèmes à l'interface avec les sciences naturelles ou sociales est l'une des grandes tendances actuelles, sans doute liée à des considérations sociales et politiques. Si les physiciens ont parfois réussi des percées spectaculaires dans ces domaines, il est juste de dire aussi que de nombreuses tentatives n'ont pas été très concluantes.

Le cas de la biologie est révélateur. Dans la mesure où cette science, en évolution rapide, est très diversifiée, elle offre un grand nombre de thèmes de recherche, et il paraît judicieux de distinguer ceux où les physiciens peuvent espérer contribuer de façon significative. Manifestement, un très grand nombre de progrès en biologie proviennent d'une meilleure caractérisation biochimique des processus fondamentaux dans la cellule ou dans l'organisme. Dans ces domaines la physique théorique peut difficilement dire grand chose, au moins à l'heure actuelle. Le comportement à plus grande échelle ("mésoscopique") est plus propice à une analyse quantitative. Dans cet ordre d'idées, on peut citer les travaux sur les moteurs moléculaires (comment les fibres musculaires glissent les unes sur les autres), la mécanique statistique des longues molécules (ADN, protéines), les problèmes de codage d'information dans l'ADN. Une modélisation plus "macroscopique" consiste à considérer des entités complexes (organismes entiers, grands ensembles de cellules) et à chercher à comprendre leur comportement à grande échelle. Des problèmes ont ainsi été identifiés : philotaxie, propa-

gation des ondes dans les nerfs et les muscles, croissance de certaines tumeurs cancéreuses, développement des fonctions chez l'embryon, problèmes liés à la circulation sanguine. Il existe dans ce domaine une très grande variété de problèmes où les méthodes utilisées en physique semblent bien appropriées, et où les applications vers la médecine semblent importantes. Les physiciens pourraient apporter une contribution utile dans ce domaine.

Les approches et les méthodes développées en physique théorique semblent avoir trouvé aussi d'intéressantes applications dans le domaine de la géologie, notamment dans la modélisation de la tectonique des plaques et des tremblements de terre. Dans le domaine de la finance, la modélisation des fluctuations des produits financiers semble pouvoir être améliorée à l'aide d'outils développés en physique théorique, ce qui pourrait permettre une meilleure estimation des risques encourus par les investisseurs.

Le problème lié à cette pluridisciplinarité provient de la grande différence de culture, de langage et d'intérêt avec les autres communautés. Les risques de produire des résultats sans implications ni pour la physique, ni pour la discipline étudiée ne doivent pas être sous-estimés. S'il est raisonnable d'encourager les approches pluridisciplinaires, il semble très souhaitable de rester vigilant sur leur impact et leur intérêt auprès des communautés concernées. Ce petit *caveat* ne doit cependant pas occulter le fait le plus important : la vitalité de la physique théorique lui permet de trouver sans cesse de nouveaux domaines d'application.

6 - SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Cette présentation des simulations numériques en physique théorique est limitée pour l'essentiel à la mécanique statistique et à la physique des parti-

cules, la situation dans les domaines des systèmes dynamiques ou des plasmas ayant déjà été discutée dans ce qui précède.

Dans les deux domaines considérés de la physique théorique, les simulations numériques ont un rôle considérable. En mécanique statistique, les simulations de Monte-Carlo ou de dynamique moléculaire contribuent de manière essentielle aux progrès de la discipline, et, en physique des particules, les calculs de QCD sur réseaux sont une composante importante des travaux théoriques. Étant les seules méthodes générales qui permettent une étude sans approximation des systèmes finis complexes, elles semblent, grâce aux progrès actuels des moyens de calcul, devoir conserver ce rôle déterminant dans les prochaines années. De plus, les améliorations remarquables des algorithmes d'échantillonnage utilisés dans les simulations de Monte-Carlo diminuent les erreurs statistiques et systématiques inhérentes à ce type de calculs. On se concentrera dans la suite sur les résultats récents des méthodes de simulation ayant une relation directe avec des problèmes théoriques.

6. 1 MÉCANIQUE STATISTIQUE

Parmi les progrès réalisés et les résultats obtenus dans la simulation des systèmes classiques, les plus notables portent sur la compréhension et l'analyse des effets de taille finie. Ils ont permis de déterminer, avec un gain de précision de plusieurs ordres de grandeur, les propriétés critiques des modèles sur réseaux, mais aussi de parvenir à une estimation crédible de celles des modèles classiques continus, en particulier de l'archétype des fluides classiques : le modèle de Lennard-Jones.

Les simulations des systèmes quantiques continus par les méthodes Monte-Carlo donnent des résultats neufs sur les propriétés de l'Hélium 4 en présence d'impuretés et sur la transition superfluide. Les améliorations apportées à la prise en compte de l'antisymétrisation ont permis un remarquable calcul des propriétés de l'Hélium 3. De même les simulations des systèmes quantiques sur réseaux ont permis l'étude des propriétés des modèles de Hubbard et des modèles similaires.

Les simulations des systèmes de polymères connaissent un développement rapide. Elles se proposent de tester les prédictions des théories de champ moyen, d'élucider le comportement de la diffusion des polymères en fonction de leurs masses et celui de la dynamique des chaînes en bon et mauvais solvant. Les phases des polymères mésogènes sont également étudiées.

L'étude par simulation des modèles de verres de spin se poursuit en particulier avec des résultats récents sur la transition à température finie des modèles d'Ising et des modèles d'Ising en champ aléatoire. Les résultats obtenus sur le phénomène de vieillissement par simulation se comparent favorablement aux résultats expérimentaux.

Les simulations des phénomènes aux interfaces ont contribué à clarifier et valider les suggestions théoriques, en particulier pour le séchage et le mouillage.

Les simulations numériques des surfaces aléatoires en relation avec la théorie quantique de la gravité sont activement poursuivies.

6. 2 PHYSIQUE DES PARTICULES

Les théories de jauge sur réseaux constituent un moyen d'investigation du Modèle Standard indépendant de la théorie des perturbations et comme

telles, elles jouent un rôle important dans la physique théorique des particules contemporaine. Les calculs les plus récents montrent que, grâce à l'accroissement de la puissance des ordinateurs et aux gains d'efficacité des algorithmes, les erreurs systématiques inhérentes aux simulations sur des réseaux de taille finie peuvent être contrôlées.

Les résultats obtenus se comparent de manière favorable avec les résultats expérimentaux, en particulier pour le spectre des hadrons légers, ceux du Y et du charmonium. Des évaluations de paramètres fondamentaux de QCD (constante de couplage forte et masses des quarks lourds) sont réalisables de manière précise. Les paramètres théoriques décrivant les désintégrations des mésons lourds D et B, en particulier semi-leptoniques, sont calculables avec des erreurs d'environ 10 %.

6. 3 AUTRES DOMAINES

Les simulations contribuent aussi, de manière souvent décisive, à la modélisation moléculaire (test des modèles d'interaction inter- et intra-moléculaires, interprétations des expériences, calculs des grandeurs thermodynamiques dans des conditions de température ou de pression extrêmes, etc.). Ce type d'applications se développe rapidement en physique des matériaux, chimie physique des solutions et de la catalyse, etc.