

Conseil Scientifique de l'Institut de Physique

Président du CSI
CASANOVE Marie-José

Membres de la section
ALBRECHT Michèle
AMY-KLEIN Anne
BOCQUET Lyderic
BOUCHOULE Isabelle
BRIET Philippe
BRISON Jean-Pascal
CHANDESRIS Dominique
CORAUX Johann
D'ANGELO Marie
DOUILLET Denis
DULIEU Olivier
DUMESNIL Karine
DURRY Georges
GASPARD Jean-Pierre
GIL Bernard
LABAYE Ivan
MONTAMBAUX Gilles
PEREZ Eric
REYNAUD Serge
SIBEUD Pierre-Frédéric
SONDERGARD Elin
STRINGARI Sandro
VALLEE Fabrice

PREAMBULE

Les quatre années qui viennent de s'écouler ont vu des changements importants dans l'organisation de la recherche et de son évaluation. La structure du CNRS a évolué: les départements ont fait place aux instituts, des alliances ont été créées sur des thèmes partagés par plusieurs organismes. La mise en place de différents projets (initiatives d'avenir, plan Campus,...) dans le cadre du grand emprunt redessine durablement les structures et les métiers de la recherche, notamment au travers des modes de financement de plus en plus orientés vers le soutien de projets à court ou moyen terme, au détriment des soutiens récurrents.

Comme toujours coexistent en physique plusieurs dynamiques fortement couplées : une dynamique propre de recherche fondamentale centrée sur le cœur de la discipline, accompagnée d'une fertilisation croisée aux interfaces thématiques, et complétée par le souci constant de l'application de ces recherches. Faire valoir cette richesse est une constante nécessité à laquelle le chercheur fait face quotidiennement.

L'objectif premier du physicien demeure l'avancée du front des connaissances dans son domaine dans ses aspects les plus fondamentaux, dans le cadre d'allers-retours permanents entre expérimentation, formalisation, modélisation et simulation numérique. C'est sous cet angle que débute ce rapport de prospective, en déclinant les enjeux selon l'échelle des systèmes étudiés depuis les interactions fondamentales, l'atome, la molécule, la matière complexe structurée ou non, ainsi que l'optique. Ces disciplines sont regroupées au sein de l'Institut de Physique et représentées au Comité national dans les sections 2, 4, 5, 6 et également dans une part de la section 11 de l'Institut de Chimie. Les forts liens des recherches relevant du périmètre de l'INP avec les autres instituts du CNRS sont également identifiés à cette occasion, notamment avec l'INC, INSIS ou encore l'INSU. Une seconde partie du rapport décrit ce que nous pourrions appeler des thématiques d'interface à proprement parler comme par exemple dans le domaine du vivant. C'est également autour de plusieurs instituts que s'organisent nombre des développements instrumentaux de pointe, et en particulier les grands instruments. La physique occupe dans l'instrumentation une place particulière puisqu'elle est impliquée dans toutes les étapes des projets, de l'idée première à la réalisation et l'utilisation pour des recherches dédiées. Les perspectives autour de l'instrumentation innovante sont détaillées dans la troisième partie. Cette recherche fondamentale s'inscrit résolument dans la nécessité de répondre à des enjeux sociétaux (énergie, développement durable, nanotechnologies,...) dont les aspects prospectifs sont présentés

dans la quatrième partie. Ce rapport se conclut sur les recommandations émises par le Conseil Scientifique de l'INP concernant le soutien et le support à la recherche, tant du point de vue des femmes et des hommes que du point de vue matériel et financier.

I - LA PHYSIQUE : DES ENJEUX FONDAMENTAUX

La physique des interactions fondamentales est en attente des résultats expérimentaux de grandes expériences de physique des particules (anneau de collision LHC) ou gravitationnelles (interféromètre VIRGO) à venir ou en cours, qui confirmeront ou infirmeront les prédictions théoriques actuelles concernant par exemple le boson de Higgs ou les ondes gravitationnelles. En effet il subsiste des interrogations sur la validité du modèle standard dans le domaine du couplage fort qui rend capitale l'amélioration de la précision des calculs basés sur la chromodynamique quantique. Le développement des simulations numériques sur réseau a motivé la construction de superordinateurs dédiés. Afin d'atteindre la précision requise, il faudra encore augmenter les puissances de calcul tout en mettant en œuvre des algorithmes spécifiques prenant en compte les contributions déterminantes des fermions dynamiques. En parallèle, l'élaboration de modèles phénoménologiques et de théories effectives demeure indispensable. Un effort important devra porter sur les premières extensions proposées du modèle standard, incluant la supersymétrie ou des dimensions supplémentaires, afin de comprendre en particulier la nécessaire brisure de la supersymétrie. La théorie des cordes inspire de nombreuses idées aux applications fertiles en physique, comme la correspondance AdS/CFT (Anti-deSitter/Conformal Field Theory). Cette théorie devrait apporter une meilleure compréhension de la supersymétrie et de l'intégrabilité dans le calcul des quantités pertinentes pour la physique des particules et les observations attendues au LHC. En liaison avec la correspondance AdS/CFT, elle devrait aussi permettre l'extension des théories conformes à plus de deux dimensions.

Un enjeu majeur pour la gravitation reste sa quantification, qui s'avère extrêmement difficile. Il existe actuellement deux approches concurrentes : l'une basée sur la gravité à boucles propose de quantifier un système hamiltonien contraint en préservant les symétries de la relativité générale, à travers l'introduction de «mousses de spin» ; l'autre approche se fait à partir de la théorie des cordes permettant de s'affranchir de la renormalisation qui constitue un frein à la quantification par les méthodes habituelles de théorie des champs. L'observation d'ondes gravitationnelles, traquées dans de grandes expériences comme VIRGO, constituera un test capital pour la relativité générale.

La géométrie non commutative établit des liens profonds et prometteurs entre des structures mathématiques établies récemment et la physique quantique. En particulier, via l'hypothèse de Riemann et la théorie des champs, elle fournit une interprétation dite «Galoisienne motivique» du groupe de renormalisation ou du modèle standard relié à la gravitation.

Si la recherche d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard est naturellement porteuse, de nombreux

phénomènes complexes restent à comprendre dans le cadre de ce dernier. Dans les collisions d'ions lourds à haute énergie, on attend la formation d'un plasma de quarks et gluons, semblable à celui rencontré aux premiers instants de l'Univers. Les instabilités caractéristiques des plasmas, les processus de thermalisation, la transition de confinement, constituent des phénomènes complexes, dont l'étude exige la combinaison de calculs numériques lourds inspirés de la physique statistique, et d'outils analytiques sophistiqués de la théorie quantique des champs à température finie. Les processus de formation de baryons ou de mésons à partir de quarks et d'antiquarks, doivent être mieux compris au regard de la découverte de particules hybrides formées de quarks et de gluons. Enfin, il reste à approfondir la compréhension de la structure nucléaire en termes de hadrons, en réponse à l'observation des propriétés inattendues de noyaux exotiques riches en protons ou en neutrons. Celle-ci devrait s'avérer utile aux astrophysiciens pour décrire quantitativement les processus de nucléosynthèse ainsi que pour étudier des objets compacts comme les étoiles à neutrons.

La physique quantique des atomes et des molécules s'oriente vers le contrôle de l'ensemble des degrés de liberté des systèmes quantiques, notamment au moyen de champs électromagnétiques externes. Elle est actuellement marquée par le rapprochement de ses concepts avec ceux de la matière condensée, de telle sorte que de nombreux problèmes sont aujourd'hui abordés à la fois du point de vue traditionnel du système à petit nombre de corps («few-body systems») et de celui du système à N corps («N-body systems») Cette évolution a été induite par l'observation expérimentale directe en 1995 de la condensation de Bose-Einstein dans les gaz dilués d'atomes ultra-froids (de température pouvant atteindre le nanokelvin), 75 ans après sa formulation théorique. Les atomes et molécules froids constituent un domaine expérimental proche de l'expérimentation numérique, où des situations modèles peuvent être étudiées en variant différents paramètres (état interne, interactions inter-particule,...) de façon contrôlée. Ceci a donné naissance à la notion de simulateurs quantiques permettant la réalisation de systèmes fortement corrélés (gaz quantiques dégénérés, polaritons en micro-cavité) cantonnés jusqu'alors aux modèles phénoménologiques. Ils permettent d'étudier des systèmes difficilement réalisables en matière condensée traditionnelle, par exemple la création de bosons de pseudo-spin $\frac{1}{2}$, l'implémentation de champ de jauge non-abélien ou la mise en œuvre d'interactions anisotropes entre molécules polaires. De nouvelles questions théoriques liées à la dynamique et la physique hors-équilibre peuvent aussi être abordées. Au-delà de la réalisation et du contrôle avec des systèmes atomiques d'états de la matière prévus par la physique du solide, ces progrès pourront déboucher sur la mise en évidence de nouveaux états mésoscopiques ou macroscopiques de la matière. Les progrès réalisés dans le refroidissement des molécules jettent les bases d'une nouvelle «chimie froide» régie par des modèles universels et où les effets à N corps deviennent importants. Des mesures de grande précision de constantes fondamentales (constante de structure fine, rapport des masses de l'électron et du proton, moment dipolaire électrique de l'électron, rayon du proton) sont activement développées et marquent un rapprochement

inattendu de ce domaine avec celui des hautes énergies. Ces recherches accompagnent l'amélioration constante des mesures de métrologie optique, par exemple sur la violation de la parité dans les molécules, ou dans la perspective de la redéfinition de l'unité de masse du système international. Les systèmes ultra-froids et piégés constitués d'atomes de Rydberg, d'ions atomiques ou de molécules sont des voies actuellement explorées pour relever le défi de l'information quantique, qui requiert la réalisation de dispositifs expérimentaux avec un nombre arbitraire de qubits. Un autre domaine prometteur est celui de la réalisation de systèmes mésoscopiques hybrides (optomécanique en cavité avec des condensats de Bose-Einstein, refroidissement d'oscillateurs nano-mécaniques), qui permettra d'attaquer sous un angle nouveau la question de la taille maximale permettant de conserver des propriétés quantiques.

Outre le développement des molécules froides, la physique moléculaire connaît des évolutions ayant trait à l'étude de phénomènes de plus en plus complexes (plus grand niveau de détails, systèmes plus grands, prise en compte d'interactions avec l'environnement, lien avec des méthodes issues de la physique de la matière condensée) en relation avec des développements instrumentaux performants (nouvelles sources laser, rayonnement synchrotron à SOLEIL) souvent rendus possibles par une meilleure compréhension de la physique (contrôle cohérent de processus réactifs, caractérisation du rôle des surfaces dans les méthodes de manipulation et contrôles de molécules individuelles pouvant prochainement déboucher sur l'assemblage de nano-machines...). Le perfectionnement des bases de données de spectroscopie moléculaire est important pour l'astrophysique (environ 5 nouvelles espèces moléculaires neutres ou ioniques sont mises en évidence chaque année dans les milieux interstellaires) ou pour les applications à l'environnement (détections de polluants, conception d'instruments).

Les sciences optiques et photoniques vivent actuellement une véritable révolution due à la conjugaison de nombreuses avancées fondamentales issues de l'optique non-linéaire et ultra-rapide, de l'optique quantique, des fibres optiques, de l'optique guidée et de champ proche. La compréhension et le contrôle des processus optiques constituent un véritable challenge qui vise au développement de nouvelles fonctions optiques avancées tirant parti des propriétés de la lumière dans différents milieux.

Les lasers évoluent toujours vers des dispositifs de plus en plus puissants, rapides, compacts (nanolasers), agiles en longueurs d'ondes, à très faible bruit ou à très haute cadence. La course aux fortes puissances est illustrée par la construction en cours de deux grands instruments (le laser petawatt PETAL et le laser de haute puissance APOLLON au plateau de Saclay qui devraient être opérationnels d'ici 5 ans). Les intensités et les puissances atteintes par les lasers ces dernières années ouvrent la voie à l'étude de la matière dans des conditions extrêmes de densité, de température, études rendues accessibles grâce à l'exposition à de telles sources extrêmes. La génération d'impulsions lasers ultra-brèves (jusqu'à quelques dizaines de atto-secondes, qui est l'échelle de temps caractéristique des transitions électroniques dans l'atome ou la molécule), donne accès à la dynamique des constituants internes des atomes, au contrôle précis d'excitations moléculaires

et de réactions chimiques et à la création de hautes densités d'excitations électroniques dans les diélectriques. Deux autres grands instruments en développement, ITER et le laser Mega-Joule (LMJ) fourniront probablement les résultats principaux à venir de la physique des plasmas, en liaison avec l'enjeu sociétal majeur que représente l'invention de nouvelles sources d'énergie (voir la partie III de ce rapport).

Dans le domaine moins énergétique, un effort continu concerne le développement de sources compactes aux propriétés uniques en termes de cadence (quelques kHz), de stabilisation en phase, de durée (quelques cycles optiques), et de mise en forme temporelle et spatiale. A titre d'exemple on peut citer les lasers Raman entièrement fibrés dans la perspective de la conversion de longueur d'onde. L'étude de la propagation de la lumière en milieu aléatoire vise à la réalisation de lasers aléatoires sans cavité, dont l'effet de piégeage des photons est provoqué par de la diffusion multiple.

La compréhension de l'interaction de la lumière avec la matière aux échelles nanométriques (plasmonique, cristaux photoniques) est un champ d'investigation fondamental qui continue de se développer à l'interface avec la physique de la matière condensée. De nouvelles actions transversales voient le jour pour élaborer des nano-structures innovantes (structures en semi-conducteur, microcavités, cristaux photoniques sur substrat, nanoparticules) permettant d'optimiser l'interaction non-linéaire. Un grand nombre d'applications reposent sur ces propriétés, allant de marqueurs et capteurs biologiques, amélioration de cellules photovoltaïques et de LED à des guides d'ondes plasmoniques.

La physique de la matière condensée se déploie sur trois axes essentiels qui sont, la recherche de matériaux nouveaux, l'élaboration des concepts et outils (instrumentaux ou numériques) nécessaires à leur analyse ainsi que leur fonctionnalisation au sein de dispositifs.

La synthèse de familles de matériaux nouveaux à fortes corrélations électroniques (cuprates, pnictures, cobaltates, conducteurs organiques, fermions lourds,...) et la découverte de nouvelles phases ont mis à jour toute une problématique qui vise tant les matériaux massifs que ceux de dimension réduite. D'un point de vue théorique, les grandes questions toujours vivement débattues comme la supraconductivité à haute température critique, la transition de Mott, le magnétisme quantique ou les effets Hall quantiques fractionnaires, ont nécessité l'émergence de concepts nouveaux comme le champ moyen dynamique, des brisures de symétries inhabituelles, la frustration ou encore des ordres topologiques avec des quasi-particules de charge et statistique exotiques. Les isolants magnétiques soulèvent des questions liées aux fluctuations quantiques, à la frustration. Les progrès dans ce domaine font appel à toute la panoplie des outils de la physique théorique: théories des champs et théories de jauge pour décrire des excitations exotiques, groupe de renormalisation fonctionnel et/ou «non perturbatif». En plus de l'émergence de concepts analytiques nouveaux, la complexité des systèmes étudiés a nécessité un effort accru dans le développement des techniques numériques de pointe (théorie de champ moyen dynamique (DMFT), calculs de Monte Carlo quantique, de structure de bande (théorie de la fonctionnelle de la densité, diagonalisation

exacte). Il est possible que l'amélioration des méthodes de champ moyen dynamique (cluster DMFT) élargisse les limites théoriques inhérentes au champ moyen, mais il est douteux que les propriétés les plus nouvelles, en termes de symétries brisées ou d'excitations collectives puissent être abordées par cette méthode. Une combinaison d'approches analytiques et numériques semble la plus prometteuse (ex: calcul *ab initio* des paramètres introduits dans un modèle analytique).

L'exploration des basses dimensionnalités mène à de nouveaux comportements qui restent à découvrir et à comprendre, lorsque l'une des dimensions devient de l'ordre de l'échelle caractéristique d'un phénomène donné. Elle aborde aussi les phénomènes hors d'équilibre, ainsi que les phénomènes dépendant du temps, domaines en plein développement à la fois en matière condensée et dans le contexte des atomes et molécules ultra-froids. Les nouveaux systèmes de basse dimensionnalité comme le graphène soulèvent des problèmes traditionnels de matière condensée dans un cadre complètement renouvelé. Les isolants topologiques sont un domaine effervescent, en évolution extrêmement rapide, où les calculs de bande sont un outil utile, et où les propriétés de transport sans dissipation, de caractère 1D ou 2D laissent entrevoir une moisson de propriétés encore inconnues qui doivent intéresser les théoriciens.

Une grande partie de la recherche sur les matériaux relève de la science des matériaux, c'est-à-dire qu'elle vise à corrélérer la structure microscopique du matériau (micro ou nano-structure) avec ses propriétés macroscopiques. Cette discipline qui émane de la métallurgie et l'étude des liens entre les propriétés mécaniques et les microstructures des alliages, couvre l'ensemble des matériaux synthétisés par l'homme (alliages métalliques, céramiques, polymères, hybrides bétons, composites, ...). Il s'agit d'un domaine proche des applications et à l'intersection de plusieurs champs scientifiques qui sont la chimie (INC), la physique du solide (INP) et les sciences pour l'ingénieur (INSIS).

Les nanostructures et les matériaux à l'échelle nanométrique occupent bien entendu une place très importante, en liaison avec l'étude des effets de taille et de dimensionnalité. Ainsi, parmi les matériaux d'importance pour la recherche, citons les matériaux à base de carbone (fullerènes, nanotubes de carbone et graphène), les nanoparticules et nanofils ainsi que les matériaux multicouches (semi-conducteurs, métal-oxyde, semi-conducteurs-metal...). Les mécanismes de croissance des nanotubes de carbone sont encore mal compris et la croissance d'une seule sorte de nanotube, de diamètre et d'hélicité fixés, est toujours un défi. La maîtrise de la croissance des nanomatériaux carbonés est un facteur limitant pour les applications comme pour les études fondamentales. Des analyses *in situ* pendant la croissance, développées dans un microscope électronique, sur un spectromètre Raman ou sur synchrotron, devraient conduire à des avancées importantes dans les années à venir. Les succès récents de la structuration radiale en cœur-coquille ou axiale dans les nanoparticules et les nanofils sont très prometteurs. L'idée est, soit d'associer deux propriétés, soit de les moduler, soit de préserver les propriétés de cœur. Par exemple, dans les nanoparticules magnétiques associer un cœur ferromagnétique avec une coquille anti-ferromagnétique, dans les

semi-conducteurs faire de la modulation de gap ou dans les quantum dots luminescents encapsulés, préserver les propriétés du cœur. D'un point de vue fondamental, il s'agit de comprendre les phénomènes de nucléation et croissance qui aboutissent à ces structurations. Une autre question importante est celle de la maîtrise de la structure de leurs surfaces et interfaces. L'obtention de nanofils quantiques semi-conducteurs par des méthodes de croissance «bottom-up» constitue un des résultats majeurs de ces dernières années. La très faible densité de défauts dans ces nanofils permet d'envisager des capacités radiatives bien supérieures à celles des hétérostructures plus classiques, avec des applications comme les nano-émetteurs par exemple. La compréhension des propriétés mécaniques des matériaux aux petites échelles, évoquée dès les années 1950, sera sans doute résolue dans les prochaines années grâce au formidable développement des techniques de fabrication et d'analyse des nano-objets qui offrent aujourd'hui des perspectives nouvelles pour aborder ces problèmes.

Les matériaux multicouches ont permis l'émergence de nouveaux domaines de la physique de la matière condensée et sont encore aujourd'hui en plein essor. C'est un domaine qui bénéficie de tout le développement industriel et académique acquis sur couches minces. La possibilité actuelle de combiner des matériaux différents (métal-oxyde, métal-semi-conducteur, oxyde-oxyde...) ouvre de vastes perspectives pour des applications allant de l'électronique à l'optique en passant par la spintronique. Les défis qui occupent actuellement la communauté sont la maîtrise des interfaces, l'incorporation de nano-objets dans ces systèmes, ou encore les problèmes d'adaptation d'impédance pour l'utilisation des semi-conducteurs en spintronique.

La recherche de nouveaux matériaux massifs reste le socle de plusieurs domaines de la physique du solide comme la supraconductivité, la thermoélectricité, le magnétisme, le multiferroïsme... Citons parmi les matériaux d'intérêt actuels MgB₂, MoS, les cuprates, les pnictures, les fermions lourds, les verres métalliques massifs.... Du point de vue expérimental, la synthèse de cristaux particulièrement optimisés (puretés, défauts, taille...) est essentielle pour révéler des cas emblématiques permettant une percée quantitative sur la compréhension de nouveaux états supraconducteurs (voir par exemple ce qu'a apporté la découverte de MgB₂ aux effets multigaps) ou magnétiques (ordres nématiques, multipolaires, couplage magnétisme-réseau avec excitations hybrides, transitions de phase quantiques, condensats de Bose...). On peut aussi mentionner l'émergence d'une optique quantique dans le domaine tera-Hertz grâce aux circuits supraconducteurs à base de jonctions Josephson, ou d'émetteurs tera-hertz grâce aux jonctions Josephson intrinsèques dans les cristaux massifs de cuprates (BiSCCO).

L'étude des matériaux à vocation industrielle (aéronautique, nucléaire ...), souvent très loin des matériaux modèles, bénéficie aujourd'hui des avancées considérables dans les techniques de modélisation, mieux à même de prendre en compte des structures et phénomènes complexes où plusieurs échelles entrent en jeu structure atomique, défauts, taille du grain, etc.... Les études *in situ* et *in operando* offrent également la possibilité d'étudier de manière fine l'influence de cette structuration multi-échelle sur les propriétés physiques pour un matériau en cours d'usage.

Dans tous ces domaines, on note la part croissante des grands équipements, que ce soit pour maîtriser toujours plus finement la préparation de matériaux et composants, pour les caractériser ou bien encore étudier leur réponse à des sollicitations diverses. En outre, l'amélioration de la résolution des techniques microscopiques et spectroscopiques (ARPES, Raman, X, RMN, neutrons, muons...), ainsi que la capacité à les appliquer à des matériaux en conditions extrêmes (fort champ magnétique, haute pression, basse température) constituent des avancées particulièrement attendues.

Le développement de nouveaux matériaux a également permis d'explorer des propriétés physiques originales au travers de nouveaux dispositifs ou composants, et participe à l'effort considérable mis sur les nouvelles technologies (information, communication, stockage de données, énergie, développement durable...). Les perspectives dans ces domaines, qui relèvent aussi des enjeux sociétaux, sont plus amplement décrites dans la partie IV de ce rapport.

Les qubits à jonction Josephson et les boîtes quantiques en cavité sont des candidats intéressants pour l'étude de problématiques de physique quantique dans des systèmes simples (en opposition avec la physique des systèmes corrélés à N corps). Des états quantiques purs non classiques du champ électromagnétique ont aussi été produits dans des micro-cavités à supra-conducteurs. De tels systèmes pourraient être utilisés pour l'information quantique.

Une avancée spectaculaire a été la réalisation de la condensation de Bose-Einstein (CBE) de quasi-particules de faible masse effective (exciton-polariton) dans des solides, une décennie après le résultat similaire obtenu avec les gaz d'atomes ultra-froids. La nature spécifique à deux composantes des excitons-polaritons font de leur condensat un laboratoire unique pour les études d'effets de spin dans les gaz de Bose en interaction (lasers à faible seuil, mémoires optiques, éléments de logique classiques et quantiques). Le transport de spin bosonique est un secteur fort jeune et extrêmement prometteur qui se rattache aux théories du transport mésoscopique et des transporteurs de charge, et au transport quantique dans des canaux unidimensionnels. La substitution des fermions par des bosons et celle d'une charge électrique scalaire par un vecteur de spin (i.e. les excitons-polaritons) nécessite de reconsidérer dans son ensemble la physique mésoscopique et les effets quantiques de transport. Expérimentalement, il est beaucoup plus facile d'étudier l'état stable du condensat de polariton que ses mouvements. Néanmoins la mesure spatio-temporelle de la propagation non-dissipative d'excitons-polaritons s'avère être une des lignes de recherches prospectives très prometteuses. Des fils polaritoniques unidimensionnels ont été réalisés avec succès et les premières études ont révélé la cohérence macroscopique spontanée d'excitons-polaritons. Le progrès rapide dans la croissance de structure et des méthodes expérimentales nous permet d'espérer que très bientôt la superfluidité de spin de polaritons sera expérimentalement observée et que l'on découvrira des nouveaux effets de transport de spin intéressants.

La matière « molle » désigne une matière ayant un très faible module de rigidité, et où les fluctuations thermiques se présentent comme des déformations à des

échelles quasi-macroscopiques. De façon plus globale, on pourrait définir la matière molle comme l'ensemble des problématiques qui s'intéressent aux formes complexes et à la structuration multiéchelle de la matière. Ce domaine regroupe des communautés s'intéressant à des questions très variées: depuis le cœur historique de la matière molle - macromolécules, colloïdes, polymères, cristaux liquides, gels, mouillage, adhésion et fonctionnalisation de surfaces, membranes -, en passant par les milieux divisés - milieux granulaires, mousses, émulsions et milieux désordonnés, transition de 'jamming' et rhéologie associée -, jusqu'au transport fluide aux micro- et nano- échelles. Elle se retrouve ainsi naturellement à l'interface entre plusieurs disciplines (physique, matériaux, chimie, ingénierie).

Si le développement de nouveaux matériaux reste au cœur de la matière molle, on note une forte orientation vers les matériaux fonctionnels 'architecturés', dont on contrôle les propriétés via les petites échelles, pour modifier leurs lois de comportement aux grandes échelles (matériaux composites nano-structurés, polymères semi-cristallins, ou la maîtrise des couplages structure-écoulement dans des fluides complexes). Dans le même esprit, une évolution marquante concerne le développement de matériaux stimulables, par des facteurs soit physico-chimiques (pH, salinité, température, lumière...), soit biologiques (gélification en présence d'une enzyme spécifique), ainsi que des matériaux actifs (colloïdes actifs, réseaux d'actine, agrégats cellulaires...). La matière molle apparaît désormais comme une composante importante du domaine des nanosciences et des nanotechnologies: greffage et autoassemblage de nanoparticules, structuration des copolymères sur les surfaces, adhésion dans les NEMS... Elle offre également des voies particulièrement prometteuses, peu exploitées en France, dans le domaine de la photonique.

La mécanique et rhéologie des milieux divisés - grains, verres, gels, émulsions, mousses - s'est beaucoup développée autour de la notion de « Soft Glassy Rheology » (SGR), motivée par les analogies mises en avant depuis une dizaine d'année avec les questions fondamentales de transition vitreuse, jamming et brisure d'ergodicité, maintenant étendues aux matériaux sous contrainte (plasticité, ...). Au delà de cette thématique spécifique, on voit tout l'intérêt à développer et encourager une recherche à l'interface entre les domaines de la physique et de l'ingénierie (mécanique, plasticité, rhéologie, ...), dont les savoirs faire et outils - théoriques et expérimentaux- sont très complémentaires. En particulier, une approche 'micro-macro', où l'analyse statistique rejoint les propriétés comportementales des matériaux, fournit une perspective particulièrement intéressante.

Autre évolution marquante, la microfluidique repose sur la réduction des échelles pour un contrôle idéal des conditions expérimentales, difficilement accessible à des échelles plus grandes, et a ouvert un champ nouveau pour l'étude fondamentale des systèmes de la matière molle (émulsions, interaction fluide-surface, transport interfacial, etc.). Un pas important a été franchi récemment avec l'apparition de la microfluidique digitale, utilisant des micro-gouttes comme volume élémentaire ouvrant des perspectives réellement innovantes pour l'encapsulation, la vectorisation, les micro-réacteurs chimiques, avec une distance très courte entre la recherche fondamentale et la valorisation. La microfluidique s'étend maintenant vers les échelles encore plus petites avec la nano-fluidique, in-

duite par la maîtrise toujours plus importante des outils de nanofabrication. L'exploration de nouveaux phénomènes (diodes fluidiques, suprafriction, translocation de molécules dans des nanopores, ...) et fonctionnalités (nanofiltration, conversion d'énergie, ...) a déjà débuté. La modélisation théorique de la matière molle bénéficie de nombreux développements théoriques et de modélisation, comme par exemple les techniques de type 'Lattice-Boltzmann', 'Dissipative Particle Dynamics', 'Soft Particle Hydrodynamics', etc.

Des progrès importants ont été réalisés dans les systèmes hors équilibre à travers l'élaboration de théorèmes reliant fluctuations et dissipation, qui ont fait émerger les fonctions de grande déviation comme un outil général prometteur. Il a été établi de nouvelles relations entre potentiels thermodynamiques d'équilibre et les fluctuations de quantités spécifiques à des processus irréversibles, aux implications intéressantes pour de petits systèmes. Ces nouveaux théorèmes sont particulièrement utilisés pour la matière molle et l'interface physique biologie, où ils permettent de déterminer le paysage d'énergie libre de molécules biologiques complexes.

Les systèmes conservatifs avec des interactions à longue portée conduisant à une énergie non-extensive posent problème quant à l'applicabilité de la mécanique statistique d'équilibre, par suite de l'inéquivalence des différents ensembles. Les systèmes dissipatifs soumis à un forçage extérieur doivent également être étudiés par d'autres méthodes. L'apparition d'états stationnaires, éventuellement en situation de coexistence, ainsi que des phénomènes de relaxation lente ont été mis en évidence dans ces différents systèmes.

Le désordre lié à la présence d'impuretés dans un système donné induit des effets parfois spectaculaires qui peuvent dominer son comportement d'ensemble, comme par exemple les phénomènes de métastabilité ou les avalanches. La compréhension de ces mécanismes a largement progressé grâce aux méthodes probabilistes combinées aux lois d'échelle. Il reste néanmoins, pour répondre à des questions difficiles relatives notamment aux transitions de phase, à mettre en œuvre des approches au-delà du champ moyen, basées sur la renormalisation fonctionnelle en théorie des champs.

Les méthodes introduites pour étudier les comportements des verres ont trouvé des champs d'applications a priori inattendus, dans des problèmes relatifs à d'autres disciplines, où le concept de frustration joue également un rôle capital. On peut ainsi mettre en avant la remarquable application de la physique des verres de spin à l'optimisation combinatoire en théorie de l'information, qui ouvre la voie à d'autres exploitations prometteuses.

Les théories conformes bidimensionnelles ont permis d'analyser une large classe de phénomènes critiques en physique statistique et en matière condensée. Plus récemment la notion d'invariance conforme a également été appliquée avec succès à des systèmes désordonnés ou turbulents, et elle offre des perspectives intéressantes pour la compréhension de phénomènes hors-équilibre, comme le vieillissement dans les verres. D'autres applications prometteuses concernant la percolation ou le processus SLE restent à approfondir. Les progrès envisagés passeront par une combinaison de méthodes issues de la physique non-linéaire et de la théorie des probabilités en

mathématiques.

La turbulence, notamment en magnétohydrodynamique, connaît un fort regain d'intérêt depuis que l'effet dynamo de génération spontanée d'un champ magnétique a été reproduit en laboratoire dans un écoulement forcé. Le rôle de la nature turbulente de l'écoulement dans ce mécanisme reste à élucider, tout comme d'autres questions difficiles de magnétohydrodynamique ayant trait à l'apparition de mouvements globaux ou à l'auto-confinement. Une activité intéressante s'est développée autour des problématiques de la couche limite ou de la turbulence d'ondes. Les plasmas sont le siège d'instabilités variées et de nombreux phénomènes d'auto-organisation. Il y apparaît des couplages complexes entre le champ électromagnétique et les courants de matière.

II - LA PHYSIQUE : UNE FORTE PRESENCE AUX INTERFACES

S'il est clair que les différentes sections de l'INP interagissent fortement entre elles tant sur les sujets d'étude que sur la mise en œuvre d'une instrumentation innovante (voir plus loin dans le rapport), la physique au CNRS se doit d'irriguer plus largement la communauté scientifique au travers d'interfaces très perméables, à même de faciliter la diffusion des connaissances depuis ou vers notre Institut. La forte interaction avec d'autres Instituts sur les problématiques qui constituent notre « cœur » de métier a été plusieurs fois évoquée dans la première partie de ce rapport. Comme on peut aisément s'en rendre compte, plusieurs interfaces sont difficiles à circonscrire, tant les interactions sont multiples, comme par exemple avec l'INC ou l'INSIS. Nous avons donc choisi de mettre ici en avant des thématiques qui se déploient essentiellement au sein d'interfaces, le plus souvent multiples.

Autour des mathématiques

Il n'y a pas de thématique en sciences physiques qui échappe au questionnement théorique. Au sein de l'INP, la physique théorique s'articule sur deux grands volets : d'une part l'élaboration de nouvelles lois universelles régissant les interactions fondamentales, et d'autre part le développement de méthodes générales permettant de comprendre et de prédire des phénomènes complexes. La physique théorique couverte par la section 02 représente le point naturel d'entrée de l'apport de la physique mathématique-et à ce titre représente une interface-, et elle est largement présente au sein des autres sections en se déclinant vers la modélisation et la simulation numérique. Dans tous les cas, les mathématiques jouent évidemment un rôle important. Ainsi les échanges entre théoriciens et mathématiciens induisent un enrichissement mutuel des deux disciplines. Si l'interface avec les mathématiques est naturelle et doit être consolidée (il faut donc s'assurer que la séparation des deux disciplines en deux instituts différents ne l'affaiblisse pas), elle revêt souvent à l'INP un caractère encore plus largement pluridisciplinaire. L'analyse mathématique des équations différentielles et des équations aux dérivées partielles (EDP) tient une place importante dans différents domaines de la physique. Il existe une activité fructueuse autour des systèmes dyna-

miques différentiables avec des applications en géophysique et en mécanique céleste. Pour les EDP, des résultats très intéressants ont été obtenus en relativité générale concernant la dynamique des trous noirs, ou en physique des plasmas sur l'amortissement de Landau. Cependant des questions fondamentales restent ouvertes, par exemple sur l'existence et la nature des singularités dans les équations de Euler et de Navier-Stokes.

L'étude des processus stochastiques intervient non seulement dans différentes branches de la physique, mais aussi dans bien d'autres disciplines comme l'économie ou la biologie. Si cette étude a permis de comprendre nombre de comportements, il reste encore à élucider de nombreuses questions d'un grand intérêt pratique et conceptuel, comme la description de la persistance ou la statistique des valeurs extrêmes en physique statistique. Aussi, la compréhension de la dynamique des marchés financiers ou des molécules complexes dans une cellule, passe par la prise en compte d'effets induits par les corrélations et les hétérogénéités. Enfin, le processus SLE (Schramm-Loewner Evolution) d'évolution de courbes dans un plan, qui via l'invariance conforme permet de décrire rigoureusement des interfaces critiques bidimensionnelles, pourrait avoir des implications pour la gravité bidimensionnelle, qu'il faudra explorer.

La théorie des matrices aléatoires s'est révélée adaptée à la description des propriétés statistiques des spectres énergétiques de nombreux systèmes quantiques « chaotiques » depuis la physique nucléaire et atomique jusqu'à la physique des hautes énergies en passant par la matière condensée et la physique statistique. Des progrès ont été réalisés dans la compréhension de l'universalité des comportements prédits par cette théorie. Il a été obtenu des résultats importants sur les statistiques des extrêmes pour différents ensembles de matrices, avec des implications pertinentes pour des systèmes gouvernés par de grandes fluctuations, comme c'est le cas en physique statistique loin de l'équilibre.

Autour des particules

La contribution de l'INP à la physique des particules a été en grande part évoquée dans les enjeux fondamentaux. Nous soulignerons ici plus particulièrement les efforts mis en commun avec différents instituts et plus particulièrement l'IN2P3 sur de nouveaux grands instruments. Comme mentionné dans les enjeux fondamentaux, deux d'entre eux sont en cours de construction, le laser petawatt PETAL et le laser de haute puissance APOLLON, tous deux devant être opérationnels d'ici 5 ans. On attend des progrès importants dans plusieurs domaines comme les sources secondaires des particules relativistes (électrons et ions) et des rayonnements (X et gamma), la physique nucléaire, et la physique des hautes densités d'énergie. Ils permettront la réalisation d'expériences originales en électrodynamique non-linéaire, la modélisation en laboratoire des conditions à l'œuvre au cœur des étoiles, l'exploration des états à la frontière entre l'état solide, liquide ou plasma, avec des applications prometteuses en médecine et dans des processus industriels.

On s'intéresse également aux particules de l'Univers. Différentes observations récentes, concernant le fond, les grandes structures ou les supernovae de type Ia, ont

Conseil Scientifique de l'Institut de Physique mis en évidence la présence de matière noire et d'énergie noire d'origines pour l'instant inconnues. Une bonne exploitation de ces données nécessite d'affiner le modèle cosmologique standard basé sur la relativité générale, en intégrant, au moins phénoménologiquement les contributions de ces entités à l'évolution de l'Univers. Il est également important de développer les méthodes d'analyse des signaux venant du cosmos et pouvant éclairer, directement ou indirectement, l'identité de la matière noire, comme les rayons cosmiques de très haute énergie produits par des phénomènes explosifs par exemple. Enfin, et de manière plus fondamentale, il faudra aller bien au-delà du modèle standard des particules.

Autour du vivant

La matière molle, par les échelles de module élastique, de distance et d'énergie qu'elle implique, a entraîné, vers la fin des années quatre-vingt-dix, une partie importante de sa communauté vers la matière vivante dont plusieurs des caractéristiques physiques sont proches.

Cette interface poursuit son approfondissement, rythmé par l'émergence de nouvelles techniques utiles à la compréhension des mécanismes à l'œuvre en biologie. Traquer la façon dont les lois physiques et chimiques qui gouvernent les échanges moléculaires et les mécanismes élémentaires encadrent et contraignent la stabilité structurale et fonctionnelle du vivant est maintenant un enjeu qui motive de nombreux physiciens. Le rôle de ces derniers peut ainsi être vu sous plusieurs facettes, qui peuvent être l'invention de nouveaux outils, l'apport d'une vision différente des systèmes biologiques, ou encore l'initiation d'une nouvelle physique inspirée par la biologie. Les physiciens peuvent aussi avoir des apports plus conceptuels où par exemple la physique non linéaire et la physique statistique contribuent à éclairer la complexité du vivant.

Les nanosciences ont été beaucoup inspirées par les développements d'expériences de micromanipulation sur molécules individuelles, puis sur leurs assemblages, dans lesquels la notion de temps est liée au passage de barrières d'énergie. L'interaction entre cellules et le comportement de tissus posent bien d'autres questions à une échelle différente. La microfluidique permet de capturer des cellules tumorales circulantes au moyen de structures, telles que des colonnes magnétiques, fonctionnalisées par les ligands appropriés. Les techniques à deux pipettes permettent de mesurer les forces de séparation entre deux cellules en contact. Ces techniques sont trop peu exploitées en regard de leur capacité à donner accès à des signalisations, par exemple en détectant les interactions croisées au cours desquelles l'activation d'une protéine va déclencher l'entrée en action de protéines d'une autre espèce, rendant ce processus « programmable ». L'ensemble de ces techniques expérimentales est encore appelé à se développer pour comprendre les mécanismes élémentaires variés à l'œuvre dans le vivant. L'effet des contraintes mécaniques dans un ensemble de cellules peut être décrit en termes de mousse, ou en termes de goutte visco-élastique. Les effets mécaniques de la croissance des tissus, similaires à un confinement, peuvent être pris en compte en introduisant la croissance dans la théorie de l'élasticité, ce qui permet de décrire l'apparition de singularités et l'évolution de structures à l'échelle

de l'organisme (embryogenèse, angiogenèse, croissance des tumeurs). Les possibilités grandissantes de comparaison directes des modèles aux données expérimentales devraient permettre une extension considérable de ce domaine de recherche. Il y a lieu de continuer à développer les combinaisons de techniques qui peuvent appréhender toutes les échelles molécule-organite-cellule-tissu pour décoder les mécanismes tels que la motilité, l'adhésion, la division, le transport intra-cellulaire, la mécano-transduction, l'expression génétique. Ces mécanismes offrent au physicien un panel de phénomènes qui sont autant de sources d'inspiration pour de nouvelles problématiques: morphogenèse dans les milieux élastiques confinés, physique statistique hors d'équilibre, physique de la matière active, comportement collectif de moteurs moléculaires. Alors que les techniques de diagnostic par spectroscopie ou diffusion optique se sont développées depuis maintenant plus de vingt ans, ces dernières années ont vu émerger un nouveau domaine transdisciplinaire, la biophotonique, en très forte expansion. Les méthodes de détection optiques ont le grand avantage d'être non-invasives et de donner accès aux propriétés spectroscopiques et/ou dynamiques (mesures résolues en temps) des objets étudiés, ultimement jusqu'à l'objet nanométrique individuel tout en renseignant sur les conditions environnementales des objets étudiés. Ce domaine se développe tant au niveau des approches physiques employées que des questions biologiques abordées. Parmi les techniques d'analyse les plus prometteuses, on trouve la spectroscopie multidimensionnelle et la microscopie optique non linéaire, avec notamment le développement des modes de contrastes cohérents et du façonnage spatial ou temporel de l'excitation optique. Les avancées récentes ouvrent la voie à de nouveaux champs d'investigation comme l'observation tridimensionnelle dynamique de la morphogenèse embryonnaire ou des remodelages tissulaires, dans une approche d'imagerie in toto. Enfin, les techniques d'études optiques en transillumination ont vu émerger une nouvelle application, la neurophotonique. L'utilisation de ces méthodes optiques avancées, combinées à l'utilisation de molécules optogénétiques, est sur le point de devenir un outil efficace pour explorer une large gamme de mécanismes cérébraux allant jusqu'à l'étude du comportement d'animaux éveillés et permettant dans un avenir proche une imagerie fonctionnelle tout-optique du cerveau.

A côté de ce domaine de recherche, un autre domaine se développe, la biologie des systèmes, qui ne s'intéresse pas aux interactions précises entre deux types de molécules, mais plutôt aux réseaux d'interactions biochimiques et aux multiples boucles de régulation à toutes les échelles du vivant. Leur étude est souvent proche de celle des systèmes complexes par les formalismes utilisés. Les réseaux en biologie sont nombreux et comptent parmi eux les réseaux de neurones, les réseaux génétiques et biochimiques, les réseaux de transcription et ceux réglant le métabolisme.

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. Les neurosciences computationnelles sont sans doute le domaine de la biologie où la nécessité d'une approche théorique se fait le plus cruellement sentir. C'est aussi un domaine où les contributions des physiciens théoriciens sont

essentiels depuis plus d'une vingtaine d'années, avec de nombreux centres mondialement reconnus de neurosciences computationnelles dirigés par des physiciens théoriciens. Une tendance qui ne fera que s'amplifier est le développement de projets en collaboration avec des équipes d'expérimentateurs, en neurosciences et en psychophysique qui seront une source de nouvelles interactions et d'enseignements interdisciplinaires.

La modélisation de réseaux génétiques faite au moyen d'algorithmes d'évolution sur ordinateur est appelée à avoir un essor considérable dans la mesure où elle a le potentiel pour décrire de nombreux comportements biologiques. C'est au travers de ces réseaux que pourront s'analyser de nombreux phénomènes biologiques tels que la différenciation cellulaire, les rythmes circadiens, ou encore que l'on peut comprendre les variations ou le bruit dans l'expression génétique.

Les techniques mentionnées plus haut offrent de nouvelles manières d'interroger la cellule. D'autres devront être développées car elles élargiront l'accès à des paramètres dynamiques jusque là inaccessibles, et à leur quantification. Elles seront développées dans des équipes pluridisciplinaires associant des compétences en biologie, physique expérimentale et théorique, voire en mathématiques et théorie de l'information, qui peuvent répondre à ces défis intellectuels. Il serait néanmoins contre-productif qu'un représentant d'un domaine soit seul et isolé au sein d'une équipe. En regard des échelles spatiales variées qui sont celles de la molécule, de la cellule et des tissus, la gamme d'échelles temporelles impliquées dans le vivant est très étendue puisqu'elle va depuis les temps de passage de barrières d'énergie à l'échelle de la molécule (pouvant être aussi courts que 10⁻¹⁰-10⁻⁹ sec) jusqu'aux temps caractéristiques des cycles cellulaires (quelques heures). La cellule est le niveau clé d'où doivent sortir les nouvelles grilles de lecture du vivant. Le biologiste de demain veut construire une théorie de la morphogénèse à l'échelle cellulaire et étudier l'évolution des fonctions cellulaires robustes, remarquablement conservées et capables d'adaptation. Le physicien, en collaboration avec biologistes et chimistes, pourra y contribuer en s'intéressant aux interactions à l'échelle de la molécule, de l'organite, ou de la cellule. Ils le réaliseront en associant plusieurs volets (i) les développements instrumentaux et conceptuels aux échelles nanoscopiques et microscopiques pour décoder les mécanismes élémentaires, (ii) l'analyse des boucles de régulation et autres réseaux biochimiques pour explorer les mécanismes complexes à une échelle plus globale, (iii) la mécanique, l'élasticité et la croissance pour comprendre la morphogénèse.

III - LA PHYSIQUE ET L'INSTRUMENTATION INNOVANTE

L'étude de la matière sous toutes ses formes d'organisation, gaz, liquide, solides cristallisés ou amorphes, couches minces, en allant jusqu'aux plasmas et aux molécules isolées, requiert des caractérisations poussées. Les défis à relever ont des implications tant du point de vue de l'avancée des connaissances que des développements technologiques, et concernent aussi bien le cœur de la discipline que l'activité aux interfaces avec d'autres disciplines (chimie, biologie, sciences de la terre et de

l'univers). Ce besoin d'outils performants conduit à des développements instrumentaux très divers, des outils de laboratoire aux équipements mutualisés (centrales de nanotechnologies, microscopes électroniques, RMN, sources d'irradiation) et aux grands instruments.

L'organisation en réseaux de plateformes tend de plus en plus à être structurée aux différentes échelles, régionale, nationale et européenne. Les plateformes, qui permettent le développement d'instruments de pointe parfois coûteux, sont généralement ouvertes à la communauté scientifique via des appels à projets et comités de programme adaptés au type d'instrument mutualisé. L'organisation à l'échelle européenne, via les réseaux de type I3, permet une dynamique d'échanges et de développements complémentaires très efficace.

En matière de Très Grandes Infrastructures de Recherche pour la communauté des physiciens qui nous intéresse ici, la France occupe actuellement une bonne place en Europe par le nombre de TGE européens qu'elle accueille et co-finance sur son sol (ESRF, ILL) ou dans un autre pays (VIRGO, X-FEL, PETAL) par les équipements nationaux intégrés à des réseaux européens de collaboration. Deux nouveaux grands instruments, le laser petawatt PETAL et le laser de haute puissance APOLLON devraient être opérationnels d'ici 5 ans.

Pour la diffusion neutronique, la décision de construire l'European Spallation Source' (ESS) est maintenant prise, les premières équipes pour la conception de la source et des instruments sont en place, la communauté scientifique est consultée pour la définition des premiers objectifs scientifiques. Le projet sera développé à Lund (Suède) avec une mise en service à l'horizon 2020. Il est important de maintenir une communauté française active autour de cette technique. Le Laboratoire Léon Brillouin et l'Institut Laue Langevin restent des fournisseurs de neutrons très performants. L'ILL a concrétisé son programme de jouvence qui a abouti à des gains significatifs sur le flux et la détection, permettant par exemple d'étudier des échantillons plus petits et des cinétiques plus rapides. Le LLB est une source de neutrons qui a le plus faible coût par publication. Il assure par ailleurs le rôle indispensable de formation des utilisateurs français. Le développement continu des instruments autorise de plus en plus des études de systèmes biologiques, les études en conditions extrêmes ont récemment bénéficié de la mise au point de « presses gros volumes ». On notera aussi celles s'appuyant sur des caractéristiques particulières des neutrons comme la variation de contraste par substitution isotopique ou à la diffusion inélastique.

SOLEIL, construit à Saclay, fournit aujourd'hui du rayonnement synchrotron aux utilisateurs sur 17 des 24 lignes de lumière qui seront ouvertes d'ici fin 2012. Le choix des lignes de lumière assure le caractère pluridisciplinaire de ce centre de recherche et garantit une interaction fructueuse entre les diverses communautés de chercheurs. Parmi les points forts actuels de Soleil, citons la résolution spectrale et la forte brillance pour la détection d'éléments en trace, la polarisation (linéaire et circulaire) de la lumière pour l'étude du magnétisme, de nano-structures en particulier, la focalisation pour les systèmes de petite taille ou confinés en conditions extrêmes, la cohérence pour la dynamique des systèmes désordonnés, les fluctuations, etc. L'imagerie y sera développée dans toute la gamme des

Conseil Scientifique de l'Institut de Physique

longueurs d'onde, depuis l'infra rouge jusqu'aux rayons X durs.

A Grenoble, l'ESRF réalise un programme de jouvence ambitieux, mettant l'accent sur le développement de cinq axes de recherche : les nanosciences et nanotechnologies avec les lignes longues pour une focalisation extrême, les mesures dynamiques (diffraction résolue en temps, mesures pompe-sonde), les matériaux sous conditions extrêmes, l'étude de la matière molle et des systèmes biologiques (structure et fonction), et enfin l'imagerie dans le domaine des rayons X-durs.

La mise en service des lasers à électrons libre dans le domaine des rayons X durs (énergies de 8 à 20 keV), est une véritable révolution : le faisceau produit aura une cohérence transverse de l'ordre du mm et une brillance 10 ordres de grandeur supérieure à ce qui est obtenu dans les synchrotrons de troisième génération (type SOLEIL ou ESRF). La durée des impulsions de lumière sera de 10 à 100 fs, avec un nombre de photons permettant de réaliser des expériences avec une seule impulsion. Il y a actuellement trois projets dans le monde qui visent à produire de tels faisceaux X : Stanford (USA), Spring 8 (Japon) et Hambourg (X-FEL Européen). Stanford a produit le premier faisceau laser X dur en 2009 et les premières expériences en 2010, Spring 8 devrait démarrer en 2011 et Hambourg en 2014. Parmi les domaines d'application qui nous intéressent, on peut citer : imagerie par diffraction de molécule ou de nano-objet unique, mesures de phénomènes ultra-rapides entre 10 fs et quelques ps (couplage électron-phonon, réaction photo-induites et transfert électroniques, états intermédiaires...), mesure de forme et champ de contraintes de nano-objets enterrés, dynamique 'lentes' (transitions ordre-désordre, phénomènes diffusifs, phasons dans les cristaux aperiodiques...) de la microseconde à la seconde, visualisation de propagation d'ondes de choc, propagation de phonons.

Les champs magnétiques intenses représentent un outil puissant dont disposent les scientifiques pour l'étude, la modification et le contrôle de l'état de la matière. En France, le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, LNCMI, a été créé en 2009 par la fusion du Laboratoire National des Champs Magnétiques Pulsés (Toulouse) avec le Laboratoire des Champs Magnétiques Intenses (Grenoble). Ce nouveau laboratoire représente un pôle fort de l'activité européenne du domaine. Les différents centres européens coordonnent leur activité dans le cadre du réseau européen EuroMagNET

Les équipements du LNCMI sont ouverts à une large communauté d'utilisateurs, en physique, chimie et sciences appliquées. Le LNCMI est porteur d'un projet de laboratoire européen multi-sites European Magnetic Field Laboratory (EMFL) en fédérant les ressources, et en optimisant les développements, les projets et l'utilisation des quatre grandes installations européennes des champs intenses : LNCMI Grenoble/Toulouse, HLD Dresde et HFML Nîmègue. Un projet d'envergure, dans le cadre européen, est l'installation entre l'ILL et l'ESRF d'un laboratoire de champs magnétiques intenses permettant d'effectuer sur site des mesures de rayonnement X et de neutrons (coopération ILL-ESRF-LNCMI). La combinaison de ces différents outils ouvrirait une nouvelle fenêtre pour comprendre le comportement de la matière sous fort champ magnétique.

Un enjeu important pour le futur est de minimiser le cou-

rant électrique nécessaire à l'obtention de forts champs dans un volume donné. Ceci est crucial, d'une part pour réduire le coût de fonctionnement, d'autre part pour étendre l'utilisation de forts champs magnétiques à d'autres disciplines, comme par exemple la chimie (RMN en très fort champ) ou la géophysique (champs élevés dans de gros volumes).

IV - LA PHYSIQUE : DES ENJEUX SOCIETAUX MAJEURS

Energie

Avec la raréfaction prévue des sources d'énergie fossile, l'approvisionnement en énergie est un des grands défis actuels de notre société, dont la solution reste à trouver. Quelle que soient les solutions, la physique jouera un rôle important dans ces défis. Que ce soit dans le nucléaire, qui restera présent encore pendant un certain temps au niveau des centrales, de leur démantèlement ou des centres d'incinération ; que ce soit dans le domaine du photovoltaïque ; que ce soit dans le domaine de l'éolien ou encore au plan de la production et du stockage, la physique sera convoquée.

Avec la construction du tokamak international ITER et du Laser Mega-Joules (LMJ) sur son territoire, la France est appelée à devenir dans la prochaine décennie un centre de référence mondiale en matière de sciences de la fusion thermonucléaire dans deux domaines clés. Du côté de la fusion magnétique, ITER servira à étudier la possibilité de confiner le plasma en combustion et la pertinence de cette technologie comme source d'énergie. Il faudra clairement pour ce faire un développement de nouveaux matériaux de haute résistance aux flux de neutrons et de rayonnement, ce que représente un grand défi scientifique et technique. La fusion par confinement inertiel connaîtra également des progrès importants avec la mise en opération du laser américain NIF et la dernière phase de la construction du laser LMJ, où la démonstration de la production de l'énergie de la fusion, avec un gain supérieur à celui du NIF, est attendue pour 2012. De nouveaux schémas d'allumage permettant de diminuer l'énergie d'ignition et augmenter le gain sont en cours de développement. Le projet européen HiPER, dont le but est de démontrer les capacités de la fusion inertielle pour la production de l'énergie, se développe progressivement en construisant la collaboration à l'échelle européenne. Le couplage du laser petawatt PETAL avec le LMJ sera une étape déterminante dans ce projet.

A côté de ce grand projet, les développements les plus importants pour les physiciens se situent au niveau des recherches sur les matériaux innovants pour le stockage, la conversion et le transport de l'énergie (voir partie I).

Information, communications

Il est maintenant indiscutable que la conception de fibres optiques et d'éléments photoniques actifs en aval immédiat des laboratoires de physique, et souvent aux interfaces avec d'autres s'intéressant aux technologies

de l'information, a conduit d'abord avec Bitnet puis avec Internet à l'une des plus remarquables des ruptures technologiques. Des fibres optiques serpentent maintenant à travers continents et océans transportant des téraoctets de signaux par seconde et produisant une connectivité humaine indicible. La demande de capacité d'échanges continue à grandir à un débit ahurissant, doublant environ tous les deux ans et la technologie Internet optique (qui tous calculs faits consomme environ 4 % de l'énergie mondiale) actuelle atteint ses capacités limites. La solution pour aller plus loin réside d'une part dans le codage d'informations en utilisant le spin et la polarisation, ce qui permettra de surmonter les goulots d'étranglement existants, et d'autre part dans l'emploi de composants optiques de nouvelles générations.

La communication quantique est également en plein essor. On peut qualifier de dispositif de communication quantique tout système qui exploite le principe d'incertitude ou l'intrication quantique, pour échanger des clés secrètes de cryptage. Plusieurs protocoles (à variables discrètes, continues ou recourant à des états leurs) ont été proposés et expérimentalement mis en œuvre ces dix dernières années. À ce jour, dans toutes les expériences de distribution quantique de clé, l'information est codée sur des états quantiques de la lumière, même si d'autres schémas recourant à des atomes ou des ions sont explorés. Ces expériences de cryptographie quantique sont devenues des expériences de routine en laboratoire. Cependant, de nombreuses difficultés à la fois expérimentales et conceptuelles freinent encore le déploiement de tels systèmes d'échange de clé secrète, sur de longues distances et avec des taux de génération de clés élevées. Un défi majeur actuel est de répondre à ces enjeux. D'un point de vue théorique, les travaux portent aujourd'hui sur l'efficacité et la sécurité de l'échange. À titre d'exemple, on peut mentionner les recherches visant à étendre les preuves de sécurité lorsque la clé échangée est de taille finie. D'un point de vue expérimental, que ce soit pour des communications par fibre optique ou bien en espace libre, par exemple vers des satellites, les efforts se portent notamment aujourd'hui sur l'ingénierie de détecteurs à plus faible bruit et plus rapides, sur l'amélioration des sources d'états quantiques de la lumière... Pour étendre les distances d'échange de clé et implémenter des réseaux quantiques, le développement des pendants classiques des relais et répéteurs, se poursuit. Les relais quantiques exploitent la téléportation quantique et le transfert d'intrication. Ceci suppose le recours de sources efficaces d'états intriqués de la lumière et de pouvoir réaliser des expériences de transfert d'intrication sur de longues distances et en espace libre. Quant à l'implémentation de répéteurs quantiques, elle requiert de disposer de mémoires quantiques, dispositifs capables de stocker un état quantique et de le restituer à la demande.

Champs technologiques émergents

Les dispositifs mettant à profit le transfert de spin (STT) sont maintenant en plein développement. On assiste par exemple à l'émergence des STT-MRAM qui devraient permettre de gagner en densité de stockage tout en réduisant le coût énergétique. Un objectif majeur demeure la réduction du courant critique, ce qui passe par le développement de nouveaux matériaux et/ou l'utilisation

de propriétés spécifiques, par exemple l'anisotropie magnétique perpendiculaire.

Un domaine prometteur est aussi celui des oscillateurs à transfert de spin (Spin Transfer Oscillators ou STO) qui permettent de générer des hyperfréquences dans les domaines du GHz, fréquence intéressante pour le domaine des télécoms. L'oscillation de l'aimantation est maintenue par transfert de spin et celle de la tension par effet magnéto-résistif. La fréquence peut être ajustée en changeant le courant. Les enjeux majeurs sont maintenant d'augmenter la puissance et de réduire la largeur de raie. L'utilisation de jonctions tunnel magnétiques est une voie intéressante pour augmenter la polarisation et la puissance. Les recherches s'orientent par ailleurs vers l'utilisation du mouvement de vortex magnétiques (induit par STT) qui induit une variation périodique de l'aimantation, de la résistance et de l'émission micro-onde. On obtient ainsi une raie beaucoup plus fine et la synchronisation des rotations de vortex permet d'augmenter la puissance et de réduire la largeur de raie (0.7 μ W et 0.1 MHz).

Les développements autour de l'électronique de spin s'étendent aujourd'hui à de nouveaux systèmes et matériaux. On assiste à l'expansion de l'« oxytronique », qui cherche à mettre à profit les propriétés remarquables des oxydes, seuls ou en architectures hybrides. Ainsi, dans l'objectif du contrôle de l'aimantation par un champ électrique, la croissance de systèmes qui associent ferroélectrique et ferromagnétique tend à palier le manque de multiferroïques intrinsèques. On vise à établir un couplage entre ordres ferromagnétiques et ferroélectriques médié par les contraintes.

Le problème de l'adaptation d'impédance pour utiliser les semi-conducteurs en spintronique n'est toujours pas résolu et l'intérêt pour les semi-conducteurs magnétiques a quelque peu faibli. En revanche, les matériaux carbonés s'avèrent très prometteurs puisque les électrons y possèdent à la fois une grande vitesse et un long temps de vie du spin dû au faible couplage spin-orbite. Il existe aujourd'hui dans ce domaine un vrai espoir de développer des portes logiques dont l'état de conductance dépend des états passant et non passant.

La « polaritonique » rassemble un programme de recherches aux frontières entre l'optique des semi-conducteurs et le transport quantique, impliquant la mésoscopique et la physique statistique. Le transport des quasi-particules résultant de l'interaction lumière matière qui portent un spin entier et sont régies par une statistique bosonique semble être également une alternative de valeur à l'électronique de spin traditionnelle et pourrait permettre de réaliser des percées spectaculaires en termes de débits et en termes d'efficacité des lignes de communication optiques de demain.

La caloritronique est également une thématique en émergence. Elle s'intéresse aux flux de charge et de chaleur dans les matériaux polarisés en spin. La dépendance en spin des phénomènes thermoélectriques a été récemment mise en évidence pour l'effet Seebeck, avec l'observation d'un courant de spin généré dans un métal ferromagnétique par un gradient de température. La caloritronique est ainsi une voie nouvelle pour générer des purs courants de spin, d'intérêt pour le développement potentiel d'une logique au-delà des CMOS actuels. Par ailleurs, le renversement d'aimantation due à ce courant de spin (effet de couple de spin) constituerait un nouveau mode de mani-

Conseil Scientifique de l'Institut de Physique
pulation de l'aimantation, par gradient de température.

La magnonique s'appuie sur des matériaux magnétiques nanostructurés, modulés de manière périodique. L'idée est de pouvoir contrôler les ondes de spin pour les exploiter par exemple dans le développement de circuits logiques. Les circuits magnoniques utilisent les ondes de spin (via leur amplitude ou phase) se propageant dans des guides d'onde magnétiques pour stocker et transmettre de l'information sans courant électrique, ce qui laisse présager la possibilité de traiter le signal en parallèle par canaux séparés (différentes fréquences), un atout majeur par rapport à la logique CMOS.

Bien entendu, l'idée de développer une électronique qui pourrait imiter le fonctionnement du cerveau (électronique neuromorphique) fait partie des rêves toujours présents. Un premier pas important a été réalisé avec la mise au point du premier « memristor » en 2008 : il s'agit d'un composant qui se comporte à chaque instant comme une résistance ordinaire. Cependant, sa « résistance » $M(q)$ évolue avec le temps, elle dépend de l'histoire du courant. Dans un certain sens, un memristor est une résistance variable qui, par la valeur de sa résistance, reflète sa propre histoire. Ce type de composant permet de garder l'information en cas de coupure d'alimentation, d'où une grande fiabilité, associée à un gain de temps et d'énergie.

Par ailleurs, une application potentielle est le développement de systèmes qui « se souviennent » et associent des événements de manière analogue au cerveau humain : donc des systèmes capables d'apprendre par expérience. La recherche future va sans aucun doute se tourner vers la conception et la compréhension de différents types de systèmes memristifs.

V - RECOMMANDATIONS

Avant de clore ce rapport, nous souhaitons mettre l'accent, sous forme de recommandations, sur différents éléments qui nous paraissent indispensables à la réalisation des travaux énoncés en prospective.

Recommandations sur les outils

La place de la modélisation et de la simulation numériques n'a cessé de croître ces dernières années et il est clair que cela va continuer tant elle est devenue indispensable à l'interprétation comme à la prédiction de la plupart des phénomènes physiques ou encore à la description atomique de certains objets d'étude. Il est donc essentiel de continuer à soutenir le développement non seulement des codes de calcul, mais également des moyens de calcul numérique puissants.

Un grand centre de calcul intensif pour la recherche publique comme GENCI réunit aujourd'hui des centres figurant en bonne place dans le top500 (CINES à la 27ème place, IDRIS à la 55ème par exemple). Clairement la taille des grands centres a littéralement explosé ces dernières années et même si la France maintient quelques centres publics dans le top100, ce rang ne reflète pas sa place dans la recherche internationale et l'effort mérite donc d'être encore plus soutenu. Un progrès important dans le paysage du calcul est le renforcement des capacités des centres régionaux qui absorbent une large part des calculs de simulation.

Les TGE, par l'importance des investissements requis pour atteindre le meilleur niveau mondial sont planifiés sur des échelles de temps longues (5 ans, voire 10 ans), tant au niveau des activités de recherche, que du financement et du support technique et humain. Il est donc important que le CNRS, qui les finance en partie, prévoie ses lignes budgétaires en conséquence, en fonction de ses engagements pris (intergouvernementaux dans le cas des TGE Européens).

En outre, la France doit se positionner, aussi bien aux plans scientifique que financier, au sujet des sources du futur : laser à électrons libres (X-FEL, avec un gain de 8-10 ordres de grandeur sur le flux et l'accès à l'analyse femtoseconde) et ESS (European Spallation Source). La position de la France est actuellement en retrait par rapport à d'autres pays européens de taille comparable.

L'instrumentation de pointe est particulièrement importante pour accéder aux différentes échelles de structure et caractériser les propriétés. Les mesures in-situ en temps réel sont souvent la seule possibilité de comprendre le lien entre la synthèse, les différentes grandeurs cinétiques et la microstructure. Il y a donc un besoin évident pour des infrastructures lourdes comme les lignes de neutrons et synchrotrons.

La maîtrise des voies de synthèse est souvent la clef d'une réussite industrielle mais aussi dans certains domaines plus fondamentaux ou la qualité du matériau étudié conditionne les découvertes. Il est clair que pour garder une recherche performante il faut disposer d'équipements permettant de maîtriser et explorer diverses voies de synthèse aussi bien chimiques que physiques. Étant donné l'investissement engendré, beaucoup de laboratoires risquent d'être contraints à utiliser les méthodes à leur disposition. Or l'exploration de nouvelles voies de synthèse est souvent source de richesse pour la découverte. L'essor récent des nanomatériaux a probablement contribué à la raréfaction de compétences dans le domaine de synthèse de matériaux volumiques qui peuvent être plus lourds en termes d'infrastructure. Le risque est donc que la synthèse de matériaux volumiques se contente d'améliorer les matériaux existants avec une application déjà connue. Il faudra veiller à garder un certain nombre de projets exploratoires sur des nouveaux matériaux et maintenir une diversification au niveau des méthodes de synthèse.

Il est aussi important que la synthèse, qui requiert beaucoup d'inventivité et de soin soit reconnue davantage que comme une activité de service.

Recommandations sur le maintien ou le développement de compétences spécifiques

Il ne faut pas sous-estimer l'apport de l'instrumentation à l'échelle d'un laboratoire. La richesse de ces développements instrumentaux, dont une originalité est d'être répandue dans tous les laboratoires, même hors TGE, est sans aucun doute liée à la construction de laboratoires autour de moyens techniques mutualisés forts. Maintenir cette « tradition », dans l'évolution actuelle du paysage de la recherche, est donc un défi majeur : la perdre nous priverait d'un avantage compétitif stratégique, et risquerait aussi de limiter la valorisation de ces développements instrumentaux au-delà des équipes qui les ont initiées. On

peut aussi détecter de nouvelles sources de développements fructueux. Par exemple, il y a un potentiel très fort de développements en instrumentation issu des collaborations entre l'instrumentation physique et la synthèse.

Pour ce qui est des matériaux, et en particulier ceux à forte corrélations électroniques, un aspect important de la recherche concerne la qualité des cristaux obtenus : la plupart des mesures fines vont nécessiter des cristaux parfois de « grande taille (neutrons), très purs et exempts de défauts. La compétitivité internationale se jouera alors non plus sur la découverte en elle-même du nouveau système, mais sur leur capacité de synthèse « optimale ». Ce travail d'optimisation doit généralement être fait par des ingénieurs ou physiciens proches des expériences qui motivent le besoin, et beaucoup de travail reste encore à faire pour que les physiciens, en France, acquièrent cette culture de double compétence en « cristallogénèse-mesure physique », très répandue par exemple au Japon, le leader mondial dans ce domaine.

Recommandations pour l'amélioration des échanges entre disciplines, concepts ou méthodes.

Il faut veiller à favoriser les échanges (et le volet de formation permanente associé) aux interfaces internes à la physique théorique, mais aussi avec le reste de la physique (du fait par exemple de la croissance prometteuse de l'interface entre matière condensée et physique atomique). Et bien sûr également sur un plan pluridisciplinaire, avec la chimie (calculs ab initio, dynamique ultrarapide, qubits moléculaires, science des matériaux ...), les sciences de l'ingénieur (modélisation multi-échelles), les sciences du vivant et les sciences de l'univers (par exemple sur les recherches sur le climat).

Vu la complexité des aspects numériques et logiciels et de gestion de l'environnement informatique, une aide (de niveau ingénieur) aux plans des réseaux et logiciels est indispensable.

Il convient également d'encourager tout ce qui peut aider à des liens entre les théoriciens de la matière condensée car, au-delà de l'appartenance à des sous-thématiques distinctes, il y a des concepts, modèles et outils qui sont partagés. Une formule de type GDR « Théorie de la Matière Condensée » pourrait être discutée, structure fédérative pouvant le cas échéant être centrée sur une structure pérenne, à l'instar de l'ICTP de Trieste (et ce en complément de l'IHP, qui fait quelques ouvertures thématiques vers ce domaine, mais ne peut couvrir tous les besoins d'interaction.

Autour des matériaux, il existe actuellement plusieurs réseaux structurants, comme les GDR, sur des matériaux spécifiques. Il serait probablement également fructueux d'organiser une plateforme d'échange entre les différentes disciplines de la science des matériaux pour faire remonter les besoins communs en caractérisation/modélisation et favoriser les interactions.

L'interaction constante entre les différents acteurs (physique et physico chimie, mécanique, science des matériaux, nanotechnologies) est absolument nécessaire au développement des recherches en matière molle. Cette

interaction est malheureusement peu favorisée par la structure en UMR/instituts, et il conviendrait de soutenir activement les initiatives en termes de structures (fédérations, GDR, Labex) ou de recrutements (postes co-affichés entre instituts) qui permettent de surmonter les barrières entre communautés et de favoriser le développement de cette interdisciplinarité

Enfin, il paraît souhaitable de renforcer l'interaction entre théorie et expérience. La forme que prend cette interaction est un peu différente suivant les sous-disciplines. Ainsi, en physique des hautes énergies, elle est organisée autour des grands instruments (comme le LHC) avec des collaborations construites sur de longues durées. En physique plus légère comme la matière condensée, quand bien même une part croissante de l'activité expérimentale se tourne vers des installations de grande échelle (synchrotron, neutrons ...), l'activité expérimentale se déploie dans des équipes de plus petite taille. La façon optimale de déployer l'activité théorique requiert alors de réussir à « tenir les deux bouts » : favoriser les contacts théorie-expérience d'une part, mais favoriser également les échanges entre les théoriciens, tant il est vrai que transferts méthodologiques et conceptuels sont fréquents. Il suffit de voir la part croissante des théories des champs en matière condensée, les fertilisations croisées des approches par renormalisation, ou bien encore le partage des théories sur les transitions de phases et les défauts, depuis la cosmologie jusqu'à la matière molle. Au sein d'un même laboratoire, deux écueils sont probablement à éviter, en tout cas lorsqu'ils sont mal gérés, le théoricien seul (ou avec une très petite équipe de non-permanents), isolé ou noyé dans un groupe expérimental de grande taille, et à l'opposé le groupe de théoriciens de très grosse taille et devenu autosuffisant. Entre expérience et théorie, la place de la simulation (ou expérimentation) numérique continue régulièrement de croître. Ce sont là trois méthodes complémentaires dans leurs principes et leurs pratiques, qui s'enrichissent mutuellement.

Recommandations sur les moyens humains de la recherche

Le renforcement des effectifs des ingénieurs et techniciens doit être un objectif dans notre institut car il est l'une des principales raisons de notre haute technicité en instrumentation scientifique, préalable indispensable à de bons résultats en recherche. Faire le choix de l'augmentation des contrats précaires et du non renouvellement des postes pérennes entraîne une perte massive des savoir-faire et compétences au sein de nos laboratoires. Cela représente une baisse d'efficacité et un coût trop élevé déjà visibles dans nos structures.

L'objectif du ratio 1 IT pour 1 chercheur, quoique louable, ne doit pas conduire à une diminution des postes de chercheurs, préjudiciable à la recherche. Déjà, le manque de poste de jeunes chercheurs amène des laboratoires à utiliser des postes d'ingénieurs attribuées par leurs autres tutelles pour leurs candidats malheureux et les chercheurs effectuent des tâches normalement dédiées aux IT dont le rôle créatif est en baisse constante.

Enfin, l'audit RGPP mené au sein du CNRS inquiète fortement les communautés scientifiques, techniques et administratives de l'INP. La bonne marche des laboratoires risque d'être affectée par une baisse de la qualité des services des administrations centrales. Par ailleurs la diversité des contrats aujourd'hui attribués aux équipes par différentes instances extérieures au CNRS a multiplié les besoins en gestion du fait de l'hétérogénéité et la complexité des dossiers. Nous tenons également à réaffirmer que l'informatique ne peut pas se limiter à la bureautique, à la gestion des réseaux et au calcul scientifique. L'informatique est omniprésente dans nos montages expérimentaux sans lesquels aucune recherche en physique ne peut être faite. Elle nécessite un savoir-faire spécifique qui ne peut être externalisé.

Une reconnaissance du savoir faire et des compétences des différents métiers de la recherche est indispensable pour continuer de motiver et stabiliser les IT dont la recherche a besoin, en particulier dans les services communs, peu ou mal soutenus par la recherche sur projet qui finance essentiellement des équipes. A cet égard, la présence d'élus C dans les comités d'évaluation AERES serait sans doute un pas significatif vers une meilleure reconnaissance de leur rôle.