

## **Conseil Scientifique de l'Institut de Physique Contribution au rapport de prospective du CNRS 2014**

### **Composition du Conseil scientifique au 9 novembre 2014 :**

Michèle ALBRECHT, Anne AMY-KLEIN, Lydéric BOCQUET, Isabelle BOUCHOULE, Philippe BRIET, Jean-Pascal BRISON, Marie-José CASANOVE (présidente), Cyril CHACON-CARRILLO, Dominique CHANDESRI, Annie COLIN (membre du bureau), Johann CORAUX, Olivier DULIEU (secrétaire scientifique), Karine DUMESNIL, Georges DURRY, Jean-Pierre GASPARD, Bernard GIL, Yvan LABAYE (membre du bureau), Gilles MONTAMBAUX, Frédéric NGUYEN VAN DAU, Eric PEREZ (membre du bureau), Serge REYNAUD, Pierre-Frédéric SIBEUD, Sandro STRINGARI.

### **- PREAMBULE -**

Le rapport présenté dans la suite de ce document s'inspire largement du rapport de prospective de l'Institut de Physique du CNRS, achevé en 2011 lors de la mandature du conseil scientifique (CS-INP) actuel (2011-2014). Les sections du Comité National de la Recherche Scientifique rattachées à l'INP (sections 2, 3, 4, 5 et 11) achevant leurs rapports de conjoncture à la fin de notre mandature, tirer le meilleur parti de leurs analyses pour dégager de nouvelles perspectives en Physique nous a paru en effet illusoire.

Le présent rapport se devait cependant d'intégrer une réflexion sur les perspectives offertes par les découvertes majeures récentes, telle celle du boson de Higgs (2012), et par l'ouverture de nouveaux champs de recherche. Cette mise à jour s'est également nourrie du travail effectué par le conseil au cours de 16 réunions, soit environ quatre par an, consacrées pour partie à des analyses en lien direct avec l'évolution du cadre de la recherche (évolution des structures, des appels à projets, des modes de financement, du recrutement par exemple), et pour partie à un questionnement sur la place de la Physique dans les « défis sociétaux majeurs », en commençant par l'Energie. Enfin, nous avons cherché à mieux faire valoir les liens essentiels entre les concepts de la Physique et ses applications. Il va de soi que les aspects prospectifs abordés dans ce rapport se fondent uniquement sur ce qui semble aujourd'hui particulièrement prometteur pour les prochaines années, sans viser une exhaustivité que nous ne pourrions approcher ni fermer la porte à tous les autres possibles. La recherche originale ne peut en effet, et fort heureusement, pas se planifier.

Du transistor au laser, du GPS à l'horloge atomique, des disques durs magnétiques aux supraconducteurs, les découvertes majeures démontrent la coexistence en physique de plusieurs dynamiques fortement couplées : la nécessité de l'exploration et de la compréhension profonde de mécanismes et processus fondamentaux sans préjuger de leurs applications, l'indispensable fertilisation issue des recherches aux interfaces thématiques, et la prise en compte incontournable des attentes et des demandes des acteurs de la société, de l'économie, de l'industrie.

Ainsi l'objectif premier du physicien demeure l'avancée du front des connaissances dans son domaine, dans le cadre d'allers-retours permanents entre expérimentation, formalisation, modélisation et simulation numérique. C'est sous cet angle que débute ce rapport.

La seconde partie du rapport identifie un certain nombre de recherches aux interfaces (notamment la physique du vivant) et d'enjeux sociétaux (notamment l'énergie) que le conseil a souhaité mettre en avant à l'issue de ses travaux.

Le développement instrumental, tant dans les laboratoires qu'au niveau de plates-formes locales mutualisées à divers degrés, ou au sein des très grands instruments de recherche (TGIR), occupe une place centrale dans la recherche en physique. Quelques réflexions autour de l'instrumentation innovante sont détaillées dans la troisième partie du rapport.

Enfin, en s'appuyant entre autres sur les recommandations formulées au cours de la mandature de ce conseil et des discussions qui y ont abouti, ce rapport se conclut par une mise en avant de l'évolution considérable que vit le monde de la recherche tant en ce qui concerne les structures d'organisation et les modes de financement, que pour l'emploi scientifique.

## **I - LES ENJEUX FONDAMENTAUX DE LA PHYSIQUE**

Cette partie décline un certain nombre d'enjeux fondamentaux qui se présentent actuellement aux physiciens, 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'INSU et l'IN2P3 qui regroupent deux autres champs de la Physique (la Physique des particules et l'Astrophysique), avec les physiciens de l'INSIS (Sciences de l'Ingénierie et des systèmes), les mathématiciens de l'INSMI ou encore avec les chimistes et physico-chimistes de l'INC.

### **La physique des interactions fondamentales :**

Avec la découverte du boson de Higgs par le Large Hadron Collider (LHC) du CERN en juillet 2012, la longue histoire du Modèle Standard des particules élémentaires a connu une apothéose. Le champ de Higgs, qui donne leur masse aux particules élémentaires, a laissé d'infimes traces dans les détecteurs ATLAS et CMS du LHC. Cette confirmation extraordinaire a valu à François Englert et Peter Higgs, deux des inventeurs de ce mécanisme, le prix Nobel de Physique en 2013.

Cette apothéose est aussi le début d'une nouvelle ère. Bien sûr, il faudra d'abord confirmer que la particule découverte est bien le boson de Higgs du Modèle Standard. Cela va demander une coopération rapprochée sur de nombreuses années entre phénoménologues de l'INP et expérimentateurs de l'IN2P3. Mais au-delà de la nature du boson de Higgs, notre modèle des interactions fondamentales actuel, aussi élégant soit-il, ne répond pas, ou que très partiellement, à de nombreuses questions auxquelles nous sommes confrontés.

Il y a d'abord les problèmes dits de la hiérarchie : par exemple, la masse mesurée pour le boson de Higgs permet au Modèle Standard d'être cohérent mathématiquement jusqu'à l'échelle de Planck ; or il devient très difficile dans un tel scénario d'expliquer comment la masse du Higgs est protégée des corrections quantiques à cette échelle d'énergie très élevée. La supersymétrie et les dimensions supplémentaires apportent des éléments potentiels de réponses ; mais le fait que le LHC n'ait pas trouvé les traces attendues rend encore plus important le travail des phénoménologues de l'INP, tant dans l'orientation des recherches expérimentales que dans la construction de modèles qui sont cohérents avec les nouvelles contraintes expérimentales.

Ensuite, les observations astronomiques et cosmologiques montrent qu'environ 95% de l'énergie présente dans l'univers provient de formes qui ne sont pas décrites par le Modèle Standard, énergie noire et matière noire dont la nature nous échappe encore. De plus, le mécanisme de Higgs du Modèle Standard prédit une densité d'énergie dans le vide qui est des dizaines d'ordres de grandeur supérieurs à la densité d'énergie sombre mesurée, ces dernières années, en cosmologie observationnelle. Des éléments de réponse proviendront d'un échange d'idées, de concepts et de résultats proposés par des physiciens des interactions fondamentales de l'INP, des expérimentateurs de l'IN2P3 au LHC et des physiciens, des astronomes et des cosmologues de l'IN2P3 et de l'INSU théoriciens ou travaillant sur des expériences d'astroparticules ou de cosmologie.

Nous sommes aussi confrontés au fait que le Modèle Standard ne peut expliquer l'excès de la matière sur l'antimatière dans l'univers. La violation de la symétrie CP produite par le Modèle Standard n'est pas suffisante pour induire cet excès. De même la transition de phase électrofaible prédite par le Modèle Standard lors des premiers instants de l'univers n'est pas suffisamment violente. Ces problèmes pourraient être en partie résolus dès que sera développé et vérifié expérimentalement une théorie de la masse des neutrinos qui viendrait s'ajouter au Modèle Standard actuel. Ce travail demande naturellement une collaboration rapprochée entre des théoriciens élaborant des modèles de physique au-delà du Modèle Standard et des expérimentateurs en physique des neutrinos.

Le développement d'expériences de haute précision en physique des particules réalisées à des énergies plus basses ouvre la voie vers l'exploration de certains aspects du Modèle Standard, tels celui qui décrit de façon relativement arbitraire la masse et le mélange des saveurs de quarks, ou ceux qui prédisent des phénomènes très rares et/ou mesurés avec une précision très élevée. Ici aussi, l'interaction entre théoriciens de la force forte et électrofaible, constructeurs de modèles de physique nouvelle et expérimentateurs doivent travailler ensemble pour proposer des observables

particulièrement sensibles à de nouvelles particules ou interactions et pour confronter les prédictions du Modèle Standard aux mesures. Ces travaux s'articulent autour d'expériences en cours ou prévues telles que LHCb et NA62 au CERN, KTOP au J-PARC japonais ou les nouvelles expériences du Fermilab et de J-PARC qui proposent de mesurer le moment magnétique anomal du muon avec une précision accrue d'un facteur quatre. Outre le travail de proposition d'observables, de prédictions d'observations par calculs analytiques ou d'interprétation de mesures surprenantes, nombre de ces problèmes demandent également une modélisation précise de l'interaction forte à basses énergies. Vu la nature hautement non linéaire de l'interaction forte à ces énergies, l'approche la plus prometteuse est celle des simulations numériques de chromodynamique quantique (QCD) sur réseaux mises en place sur les supercalculateurs du GENCI en France. Cette approche a connu des progrès importants ces dernières années, en faisant maintenant un instrument de précision qui s'applique à un éventail croissant de phénomènes importants.

Ces calculs en QCD sur réseau permettent de plus en plus de retracer à partir des principes premiers l'évolution des particules élémentaires vers des particules composites. D'abord avec tout ce qui concerne la physique hadronique, tels que le spin, le contenu en quarks et gluons ou même le rayon électromagnétique du proton, dont l'incohérence de la très belle mesure dans l'hydrogène muonique, avec les mesures précédentes, reste encore inexplicée. Mais également avec l'assemblage de protons et de neutrons en des noyaux, pour l'instant très simples, mais dont la complexité ira croissante avec l'apport de nouvelles idées sur la façon de traiter ces systèmes, dont la combinatoire est factorielle et le signal sur bruit exponentiellement supprimé. Cela est d'autant plus important en vue de l'observation des propriétés inattendues de noyaux exotiques riches en protons ou en neutrons. Ce genre de travail, en lien avec l'étude de modèles effectifs en termes de hadrons, 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 complexité de l'interaction forte se rencontre également dans les collisions d'ions lourds à haute énergie, où l'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 en QCD sur réseau, et d'outils analytiques sophistiqués de la théorie quantique des champs à température finie.

Une autre question à laquelle le Modèle Standard n'apporte aucune réponse est la quantification de la gravitation et sa possible unification avec les autres interactions. 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. De surcroît, la géométrie non commutative établit des liens profonds et prometteurs entre des structures mathématiques découvertes récemment et la physique quantique, qui pourraient ouvrir la voie à une quantification de la gravitation. En particulier, via l'hypothèse de Riemann et la théorie des champs, elle fournit une interprétation dite «Galoisienne motivique» du modèle standard relié à la gravitation, mais également du groupe de renormalisation.

D'autre part, 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.

On doit noter également le renouveau remarquable des expériences qui testent la théorie de la gravitation. Deux missions spatiales phares dans ce domaine, toutes les deux avec un *PI* français, sont MICROSCOPE et ACES qui seront lancées fin 2016. Le projet MICROSCOPE (Micro Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) utilisera des accéléromètres ultrasensibles pour pousser la précision du test du principe d'équivalence, c'est-à-dire de l'universalité

de la chute libre, à un niveau de sensibilité extrême ( $10^{-15}$ ), où pourrait apparaître des effets nouveaux, au-delà du modèle standard, dus à l'existence de nouvelles interactions prévues par la plupart des modèles d'unification des interactions fondamentales. Le projet ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) emportera dans l'espace des horloges à atomes froids, avec des performances nettement améliorées pour des applications en physique fondamentale et métrologie, conduisant en particulier à une mesure du décalage gravitationnel des fréquences (effet redshift d'Einstein) dans le champ de la Terre avec une précision inégalée ( $10^{-6}$ ). Ces deux missions apporteront des informations essentielles en ce qui concerne la validité de la relativité générale. Ces informations, cruciales pour la physique fondamentale, sont aussi étroitement liées aux grandes questions des sciences de l'Univers aux échelles cosmiques et galactiques. Finalement, l'observation des ondes gravitationnelles, traquées dans de grandes expériences comme le projet VIRGO, constituera à la fois une nouvelle ouverture pour l'observation de notre univers et un test capital pour la relativité générale.

**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. Du point de vue expérimental, les atomes et molécules froids constituent un domaine proche de l'expérimentation numérique, où des situations modèles peuvent être étudiées en variant différents paramètres (état interne, interactions interparticule...) 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 microcavité) 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 nanomécaniques), qui permettront 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 nanomachines...). 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 ultrarapide, 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'onde, 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 d'attosecondes, 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.

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 nanostructures 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 que 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.

*Les matériaux.* La synthèse de familles de matériaux nouveaux à fortes corrélations électroniques et la découverte de nouvelles phases ont mis à jour toute une problématique qui vise tant les matériaux massifs que ceux de dimension réduite. La recherche sur les 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 MgB<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, 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 dans la compréhension de nouveaux états supraconducteurs (voir par exemple ce qu'a apporté la découverte de MgB<sub>2</sub> 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 térahertz grâce aux circuits

supraconducteurs à base de jonctions Josephson, ou d'émetteurs térahertz grâce aux jonctions Josephson intrinsèques dans les cristaux massifs de cuprates (BiSCCO).

Analyser la structure microscopique (micro- ou nanostructure) pour comprendre ou ajuster les propriétés macroscopiques d'un matériau est depuis longtemps une démarche générale en science des matériaux, domaine qui couvre l'ensemble des matériaux élaborés par l'homme et est à l'intersection de plusieurs champs scientifiques que sont la chimie (INC), la physique du solide (INP) et les sciences pour l'ingénieur (INSIS). Cette analyse s'applique autant aux propriétés mécaniques (domaine d'origine) qu'aux propriétés magnétiques, optiques ou électriques. Les avancées en instrumentation et l'apport d'une approche combinée expérience/modélisation devraient conduire à des évolutions marquantes dans la corrélation entre organisation structurale et propriétés macroscopiques, à une échelle de plus en plus locale. L'étude des matériaux à vocation industrielle (aéronautique, nucléaire, éolien, solaire ...), souvent très loin des matériaux modèles, bénéficie également des avancées considérables dans les techniques de modélisation. Celles-ci sont mieux à même de prendre en compte des structures et phénomènes complexes telles que les instabilités plastiques locales dues à des avalanches de dislocations où plusieurs échelles entrent en jeu (structure atomique, défauts, taille du grain, etc...). Le développement des études *in situ* et *in operando* offre également la possibilité d'étudier de manière fine l'influence de cette structuration multiéchelle sur les propriétés physiques pour un matériau en cours d'usage.

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 d'associer de façon très contrôlée des matériaux différents (métal-oxyde, métal-semiconducteur, oxyde-oxyde...) dans une même structure suscite aux interfaces ainsi créées une compétition entre différents phénomènes, susceptible d'engendrer de nouvelles phases quantiques et d'ouvrir vers de nouvelles applications. Lame de fond en magnétisme dont on ne voit que le début, la mise en évidence de nouvelles phases magnétiques chirales générées par une interaction appelée Dzyaloshinskii-Moriya (DM) dans des matériaux ou nanostructures présentant à la fois une absence de symétrie d'inversion et un fort couplage spin-orbite, s'annonce particulièrement féconde. Les phases caractérisées par l'existence de réseaux de skyrmions magnétiques ('nouveaux' objets magnétiques qui sont des solitons topologiques) sont particulièrement importantes pour le stockage magnétique à très haute densité. En effet, les skyrmions ont une taille qui constitue la limite ultime de miniaturisation pour de l'information stockée dans des structures magnétiques, tout en se déplaçant facilement sous l'effet du transfert de spin, avec une relative insensibilité aux défauts.

Les nanostructures et les matériaux à l'échelle nanométrique occupent bien entendu une place très importante, du fait de leurs propriétés, souvent exceptionnelles, liées à des effets de taille et d'un fort potentiel applicatif. 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 favoriser la multifonctionnalité (magnétisme, optique, biocompatibilité...), dans les semiconducteurs 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 nanoémetteurs 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.

L'étude des matériaux bidimensionnels (2D), d'épaisseur atomique ou de quelques plans atomiques, s'est fortement diversifiée depuis les premiers travaux consacrés au graphène en 2004-2005. D'autres matériaux 2D, comme les dichalcogénures de métaux de transition, le nitrure de bore, le silicène, la silice, le phosphore noir, ou les systèmes nanoporeux pour ne citer que quelques exemples, sont actuellement étudiés. La nature de ces matériaux et leur qualité actuelle en font des

plateformes naturelles pour manipuler de façon optimale les propriétés, et pour en induire de nouvelles, soit par diverses stimulations (p. ex. électrostatiques, radiofréquences, optiques, mécaniques), soit par mise en contact avec d'autres types de matériaux, dans des structures hybrides. Les phénomènes émergeant aux interfaces, horizontales et verticales, entre deux matériaux 2D empilés constituent un champ d'exploration particulièrement riche, comme l'illustre par exemple l'étude de l'influence de superpotentiels à l'interface. De nouveaux types de couplage entre quasi-particules sont attendus – et explorés – aux interfaces entre matériaux 2D avec et sans bande interdite, et entre matériaux 2D et isolants topologiques. La richesse des effets physiques qu'ils hébergent et leur fort potentiel fonctionnel suscitent un effort considérable de contrôle de leur synthèse et de leur structure. Ces efforts visent notamment à s'abstraire bientôt des méthodes de préparation artisanales par exfoliation mécanique (au ruban adhésif) de matériaux massifs, qui fixent aujourd'hui encore une référence de qualité des échantillons. En science des matériaux, cet effort mobilise l'arsenal des méthodes de sciences des surfaces (microscopies à champ proche et électroniques, diffraction et spectroscopies sur installations synchrotron) et de microscopie électronique en transmission. Les approches in situ d'étude de la structure pendant la croissance, permettent des avancées rapides. Des concepts de croissance nouveaux se développent, notamment concernant l'hétéroépitaxie hybride à 2D aux interfaces entre matériaux 2D et substrats, l'hétéroépitaxie 1D aux interfaces horizontales entre matériaux 2D différents. Les potentialités des méthodes bottom-up, notamment en termes de structuration contrôlée aux échelles les plus petites, commencent à être explorées.

*Concepts, outils.* 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 systèmes de basse dimensionnalité évoqués plus haut 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 mais aussi susciter des perspectives applicatives.

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 microcavités à supraconducteurs. De tels systèmes pourraient être utilisés pour l'information quantique. Il faut noter la place des non-linéarités dans tous ces phénomènes, qui se généralise non seulement en matière condensée mais aussi en optique.



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 (c.-à-d. les excitons-polaritons) nécessitent 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.

#### *Des applications*

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 relèvent aussi des enjeux sociétaux.

Un domaine prometteur est celui des oscillateurs à transfert de spin (*Spin Transfer Oscillators* ou *STO*) qui permettent de générer des hyperfréquences dans les domaines des radiofréquences, intéressant en particulier pour le domaine des télécommunications. La précession de l'aimantation est maintenue par transfert de spin et se traduit par une oscillation de la tension via un effet magnétorésistif. La fréquence peut être ajustée en changeant le courant. Des progrès importants ont été récemment obtenus et ont permis 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 Spin Transfer Torque) 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. Les meilleurs dispositifs actuels commencent à atteindre les performances nécessaires pour une utilisation pratique.

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 ferroélectricité et ferromagnétisme tend à pallier le manque de multiferroïques intrinsèques. Une des pistes prometteuses 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 est maintenant bien compris sur le plan théorique mais des difficultés subsistent pour identifier et fabriquer des systèmes matériaux permettant d'observer simultanément de bonnes conditions d'injection et de détection de spin. 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 spins) constituerait un nouveau mode de manipulation 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 et/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 enjeu important est de pouvoir maîtriser des isolants ferromagnétiques au sein desquels ces ondes de spin puissent se propager avec des pertes faibles.

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 et dépend de son « histoire électrique ». Ce type de nanocomposant est donc susceptible de se comporter comme une synapse électronique. Une application potentielle est le développement d'architectures de calcul neuromorphiques dotées d'une capacité d'apprentissage non supervisée. La recherche actuelle s'oriente vers la conception et la compréhension de divers types d'architectures neuromorphiques (réseaux de neurones, logique probabiliste exploitant le comportement stochastique des nanocomposants ...)

**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 plusieurs ordres de grandeur au-dessus de ses constituants. 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 nanostructurés, 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 ou déclenchables (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... Ces matériaux mous, actifs, déclenchables, complexes et connectés évoluent progressivement vers la possibilité de réaliser des systèmes souples dotés d'un grand nombre de fonctions. La matière molle offre également des voies particulièrement prometteuses, peu exploitées

en France, dans le domaine de la photonique, des métamatériaux optiques et acoustiques et de l'énergie. Dans ce cadre, les nouvelles techniques de micro fabrication telles l'impression sur surface souple, l'impression 3D de fluides complexes couplée à des procédés sol gel offrent des perspectives intéressantes dans le domaine de l'électronique et de l'ingénierie tissulaire. Ce point sera renforcé si des innovations permettent d'améliorer la résolution spatiale de ces procédés.

Autre évolution marquante, la microfluidique repose sur la réduction des échelles pour un contrôle idéal des conditions expérimentales (écoulement, champ de concentrations et de température), 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, réversibilité des écoulements, etc.). Un pas important a été franchi avec l'apparition de la microfluidique digitale, utilisant des microgouttes comme volume élémentaire ouvrant des perspectives réellement innovantes pour l'encapsulation, la vectorisation, les microréacteurs chimiques, les tests haut débit sur les catalyseurs, les antibiotiques, les biocides, avec une distance très courte entre la recherche fondamentale et la valorisation. La microfluidique devient une technique de choix pour l'étude des phénomènes biologiques, de la culture cellulaire et de l'ingénierie tissulaire. Les applications de cette technologie sont très vastes et de nombreuses caractéristiques des dispositifs restent valides au niveau millimétrique. La millifluidique et la centifluidique ouvrent des perspectives intéressantes dans le domaine du génie chimique. Elles pourraient permettre le passage de la production batch à la production continue dans le monde industriel assurant ainsi une production moins coûteuse, utilisant moins de solvant, plus durable. L'excellente maîtrise des conditions d'écoulements trouve aussi des applications novatrices dans le domaine de l'énergie (fuel-cell, redox flow cell) et de la désalinisation.

La microfluidique reste une échelle dans laquelle un liquide est traité comme un milieu continu. Les physiciens abordent maintenant des échelles encore plus petites avec la nanofluidique, induite par la maîtrise toujours plus importante des outils de nanofabrication et dans laquelle le liquide n'est plus un milieu continu ce qui donne lieu à une physique différente. L'exploration de nouveaux phénomènes (diodes fluidiques, suprafriction, translocation de molécules dans des nanopores ...) et fonctionnalités (nanofiltration, conversion d'énergie ...) a déjà débuté. L'association nanofluidique et états électroniques des interfaces reste largement inexplorée. La modélisation théorique de la matière molle bénéficie de nombreux développements théoriques et de modélisation, 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, 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'autoconfinement. 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 - INTERFACES ET ENJEUX SOCIETAUX**

Nous soulignerons dans cette partie la richesse de l'interface de la physique vers le vivant qui s'étend aujourd'hui, bien au-delà de la seule Matière molle, à de nombreux domaines de la physique. Nous abordons également les travaux du groupe de travail sur l'interface Physique-Mathématique, mis en place au cours de cette mandature. Enfin, nous présentons un bilan de la réflexion entreprise sur la recherche en physique dans le défi énergétique.

### **La physique autour du vivant**

Cette interface presque devenue une discipline en soi se centre aujourd'hui sur des enjeux larges : biologie synthétique, fonctionnement des machineries moléculaires, organelles, cellules, tissus. Traquer la façon dont les lois physiques et chimiques qui gouvernent les échanges moléculaires et les mécanismes élémentaires encadrent et contraignent la stabilité 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 « déclenchable ». 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 viscoélastique. 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. Comprendre l'orchestration de cascades d'événements moléculaires liés à une fonction précise dans laquelle le moindre faux pas entraîne des pathologies lourdes reste aujourd'hui un défi scientifique majeur. 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 de la motilité, l'adhésion, la division, le transport intracellulaire, la mécanotransduction, l'expression génétique. Ces processus 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. Leur compréhension offre la perspective d'applications dans lesquelles, en mimant ces processus par la biologie synthétique, on pourrait délivrer des médicaments ou réaliser d'autres actions à un endroit précis de la cellule.

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 coté 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 est certainement parmi les plus grandes questions scientifiques du 21<sup>ème</sup> 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 essentielles 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 pourra reprogrammer une cellule ou 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.

### **Interface avec les mathématiques**

L'interaction mathématique-physique a joué un rôle fondamental dans l'évolution des deux disciplines. Il est donc important de garder et renforcer cette richesse. Les CSI concernés ont conduit en 2013-2014 une étude auprès des laboratoires et équipes évoluant à cette interface. Cette étude a montré que les interfaces impliquent quasiment tous les champs de la physique : mécanique statistique, hydrodynamique, systèmes intégrables, le champ large de ce qu'on appelle les systèmes complexes, milieux désordonnés, le traitement du signal, les interactions fondamentales, la matière condensée, l'information et le calcul quantique, la matière molle. Si les recouvrements thématiques sont potentiellement très forts, les différences de culture et de langage demandent toutefois un investissement fort pour les surmonter.

### **La physique dans le défi énergétique**

Le CSI-INP a accueilli plusieurs intervenants sur la récupération optimisée du pétrole, sur l'extraction de gaz de schistes ou encore sur les matériaux photovoltaïques, avec le souci d'échanger avec des acteurs à l'interface recherche/industrie. Ce qui suit reflète essentiellement les réflexions amenées par ces interventions et est très loin de couvrir l'ensemble de ce vaste domaine, dans lequel des groupements de recherche (GDR-CNRS) impliquant nombre de physiciens sont extrêmement actifs (en particulier pour la conversion de l'énergie : matériaux thermoélectriques, photovoltaïques...).

Avec la raréfaction prévue des sources d'énergie fossile, l'approvisionnement en énergie est un des grands défis de notre société, dont la solution reste à trouver.

Quelles que soient les solutions, la physique jouera un rôle important dans ces défis. Tout d'abord il faudra revisiter les technologies matures (le nucléaire, le photovoltaïque, l'éolien) améliorer et proposer des alternatives aux techniques de fracturation pour l'industrie pétrolière, les gaz de schistes. Ces sujets d'actualités concernent de nombreux thèmes de la physique : fluides supercritiques, milieu poreux, microfluidique et nanofluidique, mouillage, mécanique de la fracture.

L'exploitation des énergies fossiles pose ainsi de vrais problèmes à un niveau fondamental : les propriétés rhéologiques, les transitions de phase et l'hydrodynamique des fluides complexes en milieu confiné, en particulier le transport non-Darcéen, questions pour la plupart communes à la récupération assistée du pétrole et à l'exploitation des gaz de schistes. Pour ce qui est des gaz de schistes, l'exploitation pose également de vrais problèmes d'environnement et en particulier celui du traitement de l'eau.

Pour avancer dans la thématique difficile de l'énergie, des études en rupture sont aussi nécessaires et la place de la recherche académique en physique doit être majeure dans ce domaine. Les nouvelles pistes autour de l'énergie bleue qui convertit la pression osmotique de l'eau de mer en électricité illustrent parfaitement ce point. Ces techniques mettent à profit la nanofluidique, le transport de liquide près de surfaces chargées. Elles devront s'appuyer sur un développement de nouveaux matériaux dont les composés seront guidés par des études à l'échelle nanométrique. Une approche similaire doit être conduite au niveau du stockage de l'énergie. En s'appuyant sur les

nouveaux matériaux d'intercalation du sodium, du lithium issus de la chimie et de la physique du solide, sur le développement d'électrodes de surface gigantesque (super condensateur), sur des couplages inédits avec la fluide, le monde du vivant, les physiciens sont en passe de réaliser des progrès importants.

A un niveau plus amont se pose la question de la conversion de l'énergie sous toutes ses formes, conversion énergie osmotique, énergie électrique ; conversion énergie thermique/ énergie électrique, conversion énergie mécanique/énergie électrique. Le marché des cellules photovoltaïques, technologie prometteuse pour produire de l'électricité sans contribuer au réchauffement climatique est actuellement dominé à plus 85 % par la technologie à base de silicium. Plusieurs pistes alternatives et innovantes susceptibles d'actions de valorisation à grandes plus-values économiques demandent à être explorées. Ce sont s'agissant de celles qui passent par la compréhension intime des mécanismes régissant le couplage lumière-matière dans des structures à architectures avancées:

- les photopiles hors équilibres conçues à base de systèmes plasmoniques,
- les absorbeurs de photons visibles et d'émission secondaire de cascades de photons infrarouges détectés en utilisant des semi-conducteurs de la famille des composés IV-VI tels PbS ou du PbSe.

D'autre part et du point de vue de la science des matériaux, la croissance de solutions solides de type kesterites  $\text{CuZnSn(S,Se)}$  faisant appel à des éléments abondants doit être considérée comme piste alternative à la filière d'absorbeurs de lumière à base de  $\text{CuInGa(S,Se)}$ . Il s'agit en l'occurrence de mesurer en aval de la croissance de telles solutions solides, leurs propriétés physiques avant de les intégrer au sein d'architectures de composants aux performances inédites.

La physique statistique hors équilibre doit être aux premières loges pour aider au développement de nouveaux concepts, de nouveaux matériaux (matériaux thermoélectriques, piézo-électriques, électrostrictifs). La matière molle, la science des polymères doivent permettre à terme de réaliser ces matériaux faisant ainsi le pari d'une électronique organique, imprimable, flexible.

La thématique énergie concerne aussi tous les procédés industriels actuels et leur intensification. De façon à proposer des procédés durables, plus sûrs, le passage de la production batch à la production continue semble une voie pertinente. Dans ce cadre, les hydrodynamiciens devraient avoir des solutions à proposer. De même l'amélioration des procédés de la catalyse passe par des modélisations physiques, des simulations numériques et des études de mécanique quantique. En s'inspirant de la photosynthèse, la photocatalyse de l'eau (l'utilisation de la lumière pour baisser les barrières d'énergie) peut conduire à la production d'hydrogène comme carburant. La catalyse enzymatique devrait trouver un appui au niveau des techniques haut débit.

### **III -LA PHYSIQUE ET L'INSTRUMENTATION INNOVANTE**

L'étude de la matière sous toutes ses formes d'organisation, gaz, liquide, solide cristallisé ou amorphe, 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 s'instaure de plus en plus aux différentes échelles, régionale, nationale et européenne. Les plateformes, qui permettent le développement d'instruments de pointe coûteux, sont ouvertes à la communauté scientifique via des appels à projets et des comités de programme adaptés au type d'instrument mutualisé. L'organisation à l'échelle européenne, via les réseaux de type I3 (Integrated Infrastructure Initiative), 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 excellente 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, ESS) par les équipements nationaux intégrés à des réseaux européens de collaboration.

Pour la **diffusion neutronique**, le Laboratoire Léon Brillouin (LLB) et l'Institut Laue Langevin (ILL) sont des sources continues de neutrons très performantes. Le grand projet d'une source à spallation européenne (European Spallation Source (ESS)) est porté par un grand nombre de pays européens (17 dont la France), réunis pour construire la source de neutrons la plus puissante du monde. Cette installation, à haut flux de neutrons, sera construite près de la ville de Lund en Suède. Contrairement aux sources pulsées existant aujourd'hui, l'ESS aura des impulsions longues (2.86 ms), avantageuses pour les grandes longueurs d'onde (neutrons avec des énergies de l'ordre du meV), et donc pour de nombreuses techniques neutroniques, telle la diffusion aux petits angles, intéressant une communauté de scientifique très large, en particulier pour l'étude de la matière molle.

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. La mise en service d'ESS n'est pas envisagée avant 2020 et, de ce fait, il est important de maintenir une communauté française active autour de cette technique.

L'ILL a concrétisé la première phase de son programme de jouvence Millenium 1 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. La seconde phase, Millenium 2, est en cours d'instruction.

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 constant de ses 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. Le LLB est le coordinateur de la contribution instrumentale française à l'ESS.

SOLEIL, construit à Saclay, fournit aujourd'hui du **rayonnement synchrotron, principalement des rayons X**, aux utilisateurs des 24 lignes de lumière. Leur choix 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 longueurs d'onde, depuis l'infrarouge 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. Enfin, l'ESRF et SOLEIL ont une politique très active de communication vers différents publics.

La mise en service des **lasers à électrons libres 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 probablement 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 réalisées sont extrêmement prometteuses, Spring 8 vient de démarrer et Hambourg fonctionnera en 2015. Parmi les domaines d'application qui nous intéressent, on peut citer : imagerie par diffraction de très petit cristal ou de nano-objet unique, mesures de phénomènes ultrarapides entre 10 fs et quelques ps (couplage électron-phonon, réaction photo-induite et transferts électroniques, états intermédiaires...), mesure de forme et champ de contraintes de nano-objets enterrés, dynamiques '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.

## **V- BILAN DES REFLEXIONS ENGAGEES SUR LES STRUCTURES DE RECHERCHE**

-Le conseil a reçu les porteurs de projets EQUIPEX retenus par l'ANR (principalement lors des premiers appels-2011-2012) et impliquant directement l'INP (CILEX et PETAL+ sur les lasers ultrarapides, LASUP sur les champs magnétiques intenses, TEMPOS et MIMETIS sur la microscopie électronique, IPGG sur la microfluidique et ses applications, REFIMEVE+ pour la transmission de standard de fréquence et la métrologie.

Outre les remarques émises dans la recommandation sur le grand Emprunt (voir ci-après), le CSI s'est montré particulièrement préoccupé de l'absence de provisionnement en crédits de fonctionnement pour certains EQUIPEX, ainsi que du problème du personnel requis pour faire fonctionner ces appareillages, dans une période de non-renouvellement de nombreux postes techniques.

Les financements sur projets et autres initiatives d'excellence ont suscité de nombreuses interrogations sur le financement « de base » des unités de recherche (UMR, UPR). Il était aisé de mettre en regard les 15M€ pour le FEI des laboratoires de l'INP, et les 20M€ obtenus par exemple pour un seul EQUIPEX.

Le problème du financement des laboratoires a ainsi été évoqué à maintes reprises au cours de cette mandature, un accent particulier étant porté sur la nécessaire contribution des différents contrats obtenus par des équipes ou des individus au soutien de base de leur laboratoire.

Ces discussions ont fait nettement ressortir l'importance d'une meilleure prise en compte des coûts de fonctionnement dans les contrats, par exemple par une définition et prise en compte des coûts complets. On peut aujourd'hui espérer que les efforts faits au CNRS dans cette direction aboutiront prochainement.

Au-delà des questions de financement, le CSI-INP s'associe pleinement aux recommandations faites par le groupe de travail à l'interface MATHS-PHYSIQUE, pour les étendre à tous les domaines nous concernant :

- Favoriser les petites structures, GDR, PEPS, qui créent des occasions de rencontres informelles et ont un excellent rapport efficacité / coût : Les GDR sont le lieu idéal pour la nucléation et le développement de nouvelles collaborations
- Encourager les ouvertures aux interfaces, y compris au niveau des masters et des écoles doctorales. Faire en sorte que travailler à l'interface entre disciplines ne soit pas pénalisant pour la carrière.

Nous rappelons enfin ci-dessous les recommandations qui ont été émises plus formellement lors de notre mandature. Ces recommandations, ainsi que celles de tous les autres CSI, peuvent se trouver sur le site du Comité National de la Recherche Scientifique (CoNRS), à l'adresse :

<http://www.cnrs.fr/comitenational/csi/recommand.htm>

-Recommandation concernant le grand emprunt (30 juin 2011)

-Recommandation sur la RGPP (30 juin 2011)

-Recommandation au sujet d'une nouvelle procédure de recrutement des chercheurs CNRS (29 septembre 2011)

- Recommandation : Redonner un niveau acceptable au soutien de base de nos laboratoires (15 mai 2012)
- Recommandation sur la programmation de l'ANR (2 décembre 2013)
- Recommandation sur l'emploi scientifique (19 mai 2014)

5 janvier 2015