

SECTION 4

ATOMES ET MOLECULES- OPTIQUE ET LASERS - PLASMAS CHAUDS

Président

Serge Reynaud

Membres de la section

Christophe Blondel
Gilles Bourhis
Claude Camy-Peyret
Marc Douay
Xavier Garbet
Pierre Gilliot
Laurent Guillemot
Jean-Michel Hartmann
Sylvie Jacquemot
Pierre Labastie
Emily Lamour
Juan-Ariel Levenson
Brahim Lounis
Jean Oberlé
Hélène Perrin
Joël Plantard
Pascale Roubin-Morch
Robert Saint-Loup
Fernand Spiegelman
Christoph Westbrook

1 INTRODUCTION

La physique atomique et moléculaire est souvent identifiée à l'étude de systèmes simples et bien contrôlés, qui permettent à la fois des prédictions théoriques déduites directement des lois quantiques premières et des expériences de grande précision. Cette tradition, toujours bien vivante, s'accompagne aujourd'hui d'une ouverture de champs thématiques nouveaux, aussi bien dans les domaines relevant *stricto sensu* de la section qu'en interface avec des disciplines toujours plus nombreuses.

En ce qui concerne les tests des lois fondamentales, des progrès spectaculaires ont été obtenus dans le domaine de la métrologie temps-fréquence, avec des techniques issues de la physique des lasers ou des horloges à atomes froids. Ces progrès permettent aujourd'hui de concevoir de nouvelles expériences qui peuvent ouvrir des fenêtres sur les interactions fondamentales au-delà du modèle standard.

L'étude des mécanismes les plus subtils de la mécanique quantique, et même des éventuelles limites de celle-ci, ne cesse de prendre de l'ampleur. Des concepts nouveaux, qui pouvaient paraître académiques lors de leur naissance dans des domaines fondamentaux, engendrent aujourd'hui des idées d'applications qu'il était difficile d'imaginer. Le domaine de l'information quantique en fournit un exemple évident avec l'explosion d'idées nouvelles, comme la

*Nota bene*¹

¹ *Le travail de conjoncture et prospective, une des activités importantes de la section, a été marqué par de nombreux attermoissements, revirements et contretemps depuis le début de notre mandat de 4 ans. Dans ces conditions, ce travail n'a jamais pu faire l'objet d'une large discussion dans la communauté. Les labos, GDR, équipes souhaitant enrichir ce travail ou y réagir sont invités à envoyer leurs remarques au président de la section.*

cryptographie quantique ou le futuriste « ordinateur quantique », qui constituent le fruit de décennies de développement de méthodes de contrôle d'atomes ou d'interactions entre matière et rayonnement.

Le refroidissement des atomes par laser, développé pendant des années avec des motivations de « fondamentalistes », a ouvert la voie à une renaissance de la physique statistique quantique avec les condensats de Bose-Einstein atomiques. Ceux-ci sont beaucoup plus près d'un système statistique idéal que les exemples historiques de l'hélium superfluide et des supraconducteurs. Un autre exemple est fourni par les futurs « lasers à atomes » qui fourniront à leur tour de nouveaux moyens techniques.

L'étude des propriétés microscopiques des systèmes atomiques et moléculaires, de leurs interactions, est un des axes traditionnels de la section 04, qui garde lui aussi tout son intérêt fondamental tout en s'ouvrant vers des applications de plus en plus variées, vers l'environnement terrestre, vers d'autres environnements planétaires ou astrophysiques, vers la compréhension des mécanismes élémentaires de la réaction chimique.

Le développement de sources laser à impulsions ultra-brèves et la construction de la nouvelle source SOLEIL de rayonnement synchrotron de troisième génération ouvrent de nouvelles perspectives. A côté de la spectroscopie à haute résolution, se développe une spectroscopie résolue dans le temps qui peut sonder des espèces instables, excitées, ou encore des intermédiaires et des produits de réaction et qui a débouché sur une nouvelle approche, la femtochimie. Celle-ci vise non seulement à observer « en temps réel » la dynamique du système moléculaire, mais aussi à la contrôler de façon cohérente en exploitant les propriétés des impulsions ultracourtes.

Les interactions de systèmes moléculaires au sens large (molécules, agrégats, nano-objets de basse dimensionnalité...), avec leur environnement (support, solvant, matrice, cages,

films minces...) soulèvent de nouveaux problèmes fondamentaux et constituent un sujet d'étude important pour les applications. L'interaction d'ions multichargés avec des atomes, des molécules, des agrégats, des surfaces ou des solides conduit à une excitation intense de la matière qui permet d'aborder les mécanismes d'endommagement ou d'induire des réactions chimiques fortement endothermiques.

Les édifices atomiques et moléculaires étudiés sont de plus en plus complexes. Cette complexité s'étend aujourd'hui à la physico-chimie du vivant, depuis l'étude structurale et dynamique de systèmes moléculaires aussi complexes que polypeptides et brins d'ADN, jusqu'à l'échelle de la cellule en interaction avec son environnement. On voit ainsi apparaître des hybrides associant systèmes naturels et artificiels avec des propriétés physiques ou chimiques façonnées et dont les impacts tant fondamentaux que sociétaux font l'objet de nouveaux questionnements.

Ce cheminement d'avancées conceptuelles, méthodologiques ou instrumentales vers l'émergence d'un nouveau domaine est encore évident pour les nanosciences et nanotechnologies. Cette émergence s'inscrit dans la longue histoire de la physique quantique de systèmes micro et nanométriques dans laquelle la communauté de la section 04 a joué un rôle important, par exemple par l'étude détaillée de la physique des agrégats, en relation étroite avec les physiciens de la matière condensée et les chimistes.

Des progrès spectaculaires dans l'instrumentation (nouvelles microscopies, techniques de microfabrication...) et la compréhension du comportement quantique des nanosystèmes ont conduit à une croissance rapide des nanotechnologies. Il est désormais possible soit de structurer la matière à une échelle sub-micronique par des procédés de gravure (approche dite *top-down*), soit de procéder à une auto-organisation de la matière en partant des atomes ou des molécules eux-mêmes (approche dite *bottom-up*).

Une des caractéristiques essentielles de ces domaines est leur pluridisciplinarité, avec des collaborations fructueuses entre sciences physiques, chimiques, biologiques, ingénierie, sciences de l'information... Ces collaborations diffusent dans la quasi-totalité des champs thématiques couverts par la section 04, reliant entre eux des domaines qui étaient disjoints, allant notamment de la photonique à l'information quantique, de l'électronique moléculaire à la physique des agrégats, de la physique des solides à l'imagerie biomédicale, de l'étude des forces de Casimir aux propriétés des micro- ou nano-systèmes mécaniques.

De manière générale, les interfaces de la section 04 sont variées, développées pour certaines depuis longtemps, et elles font preuve d'une grande fertilité. Les relations avec la chimie ou la physique de l'atmosphère sont anciennes, elles continuent à produire des résultats scientifiques fondamentaux tout en favorisant la diffusion de techniques expérimentales innovantes qui ont été développées d'un côté ou de l'autre de l'interface ou dans le cadre de ces collaborations.

Ainsi, le contrôle optimal par façonnage d'impulsions permet d'orienter la photoréactivité et la dynamique réactionnelle de petits systèmes moléculaires. Cette technique est utile à l'interface avec la chimie, mais possède un caractère plus général, puisqu'elle peut également opérer pour le contrôle de systèmes nanométriques, biologiques, et qu'elle s'applique également pour optimiser la génération d'harmoniques attoseconde.

La frontière avec l'astrophysique reste également très importante à un moment où les grands programmes observationnels internationaux engendrent une demande de plus en plus pressante en données spectroscopiques et dynamiques. Un nouveau domaine concerne la structure, la formation et la réactivité de molécules, d'agrégats ou de grains présents dans les milieux interstellaires ou planétaires. L'étude

de ces processus en laboratoire est une contribution importante de la section 04.

Les activités de théorie, de modélisation, de simulation jouent un rôle essentiel dans la plupart des domaines de la section 04. Elles se déroulent le plus souvent dans des relations de « proximité » immédiate entre théorie et expériences, qui permettent une confrontation continue entre le monde physique réel et ses représentations théoriques ou numériques.

Les technologies de l'optique continuent à jouer un rôle essentiel dans l'évolution des méthodes instrumentales utilisées dans la section. Le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles sources de lumière permet de produire du rayonnement et des faisceaux de particules chargées avec des caractéristiques jusque là inaccessibles. Cette évolution des « frontières de l'optique » se fait en particulier de manière spectaculaire vers les très courtes durées d'impulsion et les très fortes puissances crête avec une moisson impressionnante de résultats techniques et scientifiques.

Les dispositifs optiques sont aujourd'hui mis en œuvre de manière de plus en plus efficace et diversifiée, que ce soit au niveau de la taille, de la précision, de la qualité ou de la facilité d'utilisation. Le contrôle des processus permet de dominer ou de tirer parti des fluctuations quantiques, de l'auto-organisation spontanée des faisceaux et de réaliser des composants optiques performants grâce à la multifonctionnalisation. L'optique non-linéaire joue dans ces évolutions un rôle très actif.

La maîtrise de la fusion thermonucléaire est une étape indispensable avant la conception de réacteurs, qui constitue l'une des clés des problèmes énergétiques du 21^{ème} siècle. Deux grandes voies sont explorées, le confinement magnétique et le confinement inertiel. Les études se déroulent à la fois sur de grandes machines et, en parallèle, sur des expériences en laboratoire qui permettent à coût moindre la mise au point de

diagnostics ou l'exploration de nouveaux concepts.

Les principaux efforts concernant la fusion magnétique portent sur les interactions plasma-paroi, le transport turbulent et la dynamique des instabilités, par exemple celles dues aux particules suprathermiques. Parmi les nombreux défis scientifiques à relever dans la filière inertielle, on peut citer la stabilité de la propagation des faisceaux laser, la maîtrise des instabilités hydrodynamiques, le nouveau concept d'allumeur rapide et l'augmentation de la cadence de tir. Les deux filières présentent aussi de nombreux verrous technologiques, liés en particulier à la tenue au flux des matériaux.

La décision de construire ITER à Cadarache et la volonté du CEA-DAM d'ouvrir le Laser MégaJoule (LMJ) ont des implications profondes, tant sur l'organisation de la communauté académique que sur l'évolution de ses thématiques de recherche. Les investissements considérables dans ces domaines imposent au CNRS de prendre en compte l'importance de la maîtrise de la fusion pour le développement de nouvelles sources d'énergie.

2 UN ETAT DES LIEUX

L'état des lieux ci-dessous présente un bref survol des activités de la section 04, regroupé en quelques grands domaines. Cet état des lieux se concentre pour l'essentiel sur les problématiques scientifiques, les avancées récentes, et quelques perspectives à plus ou moins long terme. Il ne prétend pas être exhaustif...

PHYSIQUE ET PROCESSUS QUANTIQUES, LOIS FONDAMENTALES

Atomes et précision ultime

L'extrême précision héritée de la tradition de la spectroscopie moderne est un des traits caractéristiques de la physique atomique. La

constante de Rydberg R_∞ , qui se déduit de la spectroscopie de l'atome d'hydrogène et fixe l'échelle des énergies atomiques, est aujourd'hui mesurée avec 12 chiffres significatifs. Le temps est mesuré par les horloges atomiques avec une précision relative meilleure que 10^{-15} sur un jour. Les laboratoires du CNRS jouent un rôle de premier plan pour l'obtention de ces performances, en relation avec quelques autres laboratoires dans le monde. En l'espèce c'est une unité mixte CNRS-Observatoire de Paris qui possède aujourd'hui les horloges atomiques les plus précises du monde.

Cette précision fait de la physique atomique un pivot de la mesure des constantes de la physique et de la réalisation des étalons fondamentaux, la seconde, le mètre, peut-être bientôt le kilogramme. Elle permet aux méthodes atomiques de révéler et de mesurer des effets de physique variés, en relativité générale, physique nucléaire, électrodynamique quantique. Elle offre une voie d'accès prometteuse à la nouvelle physique attendue au-delà du modèle standard, par exemple par les tests dits de « variation des constantes fondamentales » ou par les mesures de force à courte distance.

Les applications pratiques de ces performances sont déjà dans le grand public, avec par exemple les systèmes de positionnement de type GNSS (systèmes satellitaires de navigation globale) qui n'existeraient pas sans les horloges atomiques, et qui sont intrinsèquement relativistes.

Les progrès réalisés récemment en physique atomique proviennent souvent de percées technologiques. Les avancées dans la technologie des lasers ont amené d'énormes progrès dans la métrologie et, surtout, la révolution des peignes de fréquences permet maintenant de comparer directement fréquences optiques et micro-ondes. Ceci rend possible dans un avenir proche la réalisation de la seconde par rapport à une raie atomique du domaine optique avec une précision de l'ordre de 10^{-17} .

Une deuxième technologie-clé est aujourd'hui le refroidissement d'atomes par laser. Comme c'est souvent le mouvement des atomes qui limite la précision des expériences spectroscopiques, le gel du mouvement, dans les nuages d'atomes refroidis, est un ingrédient essentiel pour la réalisation des horloges atomiques actuelles et futures. L'interférométrie atomique, et l'émergence du laser à atomes (analogue, pour les ondes de matière, du laser dans le domaine optique) offrent des perspectives renouvelées dans le domaine des mesures de précision et des senseurs inertiels.

Si les techniques de base du refroidissement atomique, développées au cours des années 1980, sont désormais des outils standard pour la spectroscopie et la métrologie, le refroidissement d'atomes n'en continue pas moins de progresser. C'est ainsi que, grâce à de multiples innovations, on peut désormais fabriquer des condensats de Bose-Einstein ou des gaz dégénérés de fermions. Ces nouveaux objets ouvrent un très large champ d'investigation en physique quantique et statistique et font l'objet d'une concurrence acharnée au niveau international. Les unités du CNRS s'y sont distinguées par un rôle de premier plan dans l'observation des effets de la rotation dans les condensats, et des changements de régime dans les gaz de fermions dégénérés ainsi que par l'obtention du premier condensat d'atomes d'hélium excités, qui offre des possibilités extraordinaires d'études statistiques en raison de l'efficacité de détection de ces atomes.

Ce domaine constitue une nouvelle frontière entre la physique atomique et la physique de la matière condensée. Si l'article fondateur d'Einstein en 1924 a permis de prédire la condensation d'un gaz de bosons sans interactions, la physique d'un gaz dégénéré s'est avérée bien plus riche à cause des interactions non négligeables entre atomes. Le comportement d'un gaz à dimensionnalité réduite (1D ou 2D) en présence d'interactions implique des fortes corrélations entre atomes et des diagrammes de

phase non triviaux. La physique d'un gaz de fermions semble encore plus riche car dans certaines conditions, on observe l'appariement de Cooper et une phase superfluide dite BCS, comme en supraconductivité.

Optique quantique et traitement quantique de l'information

La course à la haute précision, en particulier pour la détection interférométrique des ondes gravitationnelles, a suscité des études approfondies sur la manipulation des états quantiques de la lumière. La relation d'incertitude de Heisenberg impose des contraintes sur le produit des fluctuations de deux observables complémentaires, mais elle laisse la liberté d'affiner certaines grandeurs individuelles. C'est ainsi que des équipes de la section 04 ont réussi à réduire le bruit de mesure optique.

La manipulation des degrés de liberté quantiques de la lumière a aussi débouché sur de nouveaux concepts, pour la transmission de l'information avec un niveau de sécurité inaccessible aux méthodes classiques. Si l'on arrive à émettre et contrôler des photons un par un, l'impossibilité fondamentale de « cloner » un objet quantique constitue une protection idéale contre les tentatives d'espionnage. C'est ce qu'on appelle la « cryptographie quantique ».

Depuis une dizaine d'années on sait qu'un ordinateur manipulant des « bits quantiques » serait capable d'exécuter certains algorithmes numériques de façon beaucoup plus efficace qu'un ordinateur traditionnel. Cette propriété découle de la richesse supplémentaire qu'offre la continuité des superpositions possibles d'états quantiques, alors qu'un système classique n'utilise qu'un codage binaire, à base de valeurs 0 ou 1, évoluant séquentiellement. Ce domaine à l'interface entre la physique quantique et les sciences de l'information et de la communication, vise aussi l'adaptation des concepts de la théorie de l'information au comportement quantique des

nano-objets pour de nouvelles applications en sciences de l'information.

Ce domaine de l'information quantique est un des développements récents qui a amené de nouveaux chercheurs à s'intéresser aux nanosciences. Le domaine du traitement de l'information tire une grande partie de sa puissance des avancées remarquables et continues de la miniaturisation des composants. Il semble que cette dynamique fonctionnera sur l'information quantique. Ainsi, la miniaturisation des dispositifs quantiques jouera un grand rôle dans le proche avenir.

Des sources à photons uniques et indiscernables basées sur des filots quantiques en microcavité ou cristal photonique, les émetteurs de photons jumeaux utilisant des matériaux micro ou nano-structurés périodiquement et les puces à atomes sont des exemples où ce travail, en cours, commence à donner des résultats remarquables. Ces travaux impliquent une forte collaboration avec les laboratoires de nano-fabrication ainsi qu'avec la communauté des semi-conducteurs qui est, elle aussi, en train de chercher à mettre en oeuvre la manipulation fine des systèmes au niveau quantique.

Physique quantique fondamentale

La construction d'un « ordinateur quantique » pose la question de la capacité à maintenir, pendant le temps du calcul, ce qui fait la richesse des états quantiques, c'est-à-dire leur capacité de former des superpositions d'états. Cette capacité avait naturellement frappé les fondateurs de la physique quantique, au point de susciter l'image célèbre du « chat de Schrödinger », susceptible de se retrouver dans une superposition d'un état de chat vivant et d'un état de chat mort. Une des grandes questions de la physique du 20^{ème} siècle a été de trouver des explications au fait que si les superpositions sont observées tous les jours dans les systèmes microscopiques, elles semblent être exclues pour les objets macroscopiques.

Une voie de recherche expérimentale a donc été d'explorer les tailles intermédiaires, et de fabriquer des « chatons » quantiques de plus en plus gros. La cohérence, qui porte la superposition, est absorbée par l'environnement du système, et ce d'autant plus vite que le système est plus gros : c'est ce qu'on appelle la « décohérence ». Le contrôle de ce phénomène et si possible la restauration de la cohérence sont des sujets de réflexion essentiels pour la physique fondamentale et pour le futur fonctionnement des ordinateurs quantiques.

L'origine de la décohérence peut être l'existence de fluctuations thermiques ou quantiques dont la maîtrise est souvent un objectif essentiel. Elle peut aussi être due à des mécanismes fondamentaux inévitables, par exemple la diffusion des ondes gravitationnelles présentes dans notre environnement galactique qui dominent pour les objets macroscopiques mais que les interféromètres à atomes ou à molécules sont encore loin de tester. Elle pourrait à terme être une voie d'accès expérimentale à la nouvelle physique attendue au delà du modèle standard des interactions fondamentales, puisque celle-ci produirait des fluctuations spécifiques.

Physique atomique

Comprendre les spectres atomiques, c'est comprendre le mouvement d'un nombre souvent élevé d'électrons autour d'un cœur attractif. Cela reste un défi, le problème « à trois corps » n'étant déjà pas exactement soluble. On n'a convenablement exploré qu'une minorité des milliers de spectres possibles que fournissent les 92 atomes de la classification périodique, les éléments radioactifs de $Z > 92$ suffisamment stables pour engendrer des spectres atomiques et tous les ions atomiques qui s'en déduisent.

Or, pour les diagnostics en astrophysique ou en physique des plasmas, l'identification des spectres, leur utilisation pour la mesure des températures locales, restent des outils essentiels. Des unités CNRS fournissent une part importante des contributions aux bases de données sur les

spectres atomiques. Les ions négatifs atomiques sont un terrain d'élection pour le test des modèles de corrélation des mouvements électroniques ou la réalisation de certaines expériences de mécanique quantique fondamentale. L'étude des atomes exotiques, dans lesquels les ingrédients habituels, électron et proton, ont été remplacés par d'autres particules élémentaires, est également un point fort d'équipes CNRS travaillant dans des collaborations internationales.

MOLECULES, AGREGATS ET IONS, COLLISIONS ET SURFACES

Le domaine de la physique moléculaire (spectroscopie, réactivité moléculaire, processus fondamentaux) a une longue tradition. Il fait face depuis quelques années à des évolutions qui ont profondément renouvelé son paysage et considérablement augmenté la complexité des objets étudiés - molécules complexes, peptides, brins d'ADN, agrégats, nanoparticules, grains - ainsi que la nature des processus élémentaires accessibles - excitation vibrationnelle et électronique, fragmentation, réactivité, relaxation. Cette évolution a suscité l'émergence de nouvelles problématiques : couplage des divers degrés de liberté, rôle de la taille, de la dimensionnalité, du confinement et de l'environnement sur la dynamique et la relaxation de l'énergie.

Plus récemment, le contrôle cohérent des processus à l'échelle moléculaire a ouvert des perspectives prometteuses. C'est aussi le cas d'un nouveau domaine en plein développement, celui des molécules froides. Les applications nourrissent aussi des interfaces importantes avec les nanosciences, les sciences de l'environnement, l'astrochimie, ou la biologie. La communauté de physique moléculaire a assuré ce développement grâce aux progrès rapides des techniques expérimentales et des méthodes de modélisation.

Systèmes moléculaires et nanoparticules en phase gazeuse

L'investigation des mécanismes élémentaires intervenant dans les collisions, la réactivité ou les processus photo-induits connaît des développements sans cesse renouvelés : nouvelles sources, nouvelles techniques de sélection et de contrôle, analyse de plus en plus complète des processus combinant techniques laser et collisionnelles, analyse en coïncidence d'évènements multiples, piégeage...

La disponibilité de sources laser d'impulsions toujours plus brèves permet désormais la résolution temporelle, qui donne accès au suivi détaillé de processus dynamiques inaccessibles jusqu'ici, tels que la dynamique interne, la relaxation liée aux interactions entre molécules ou atomes, les collisions réactives, et qu'il s'agit d'analyser et de comprendre.

Au-delà de la mesure, les sources femtoseconde sont également un outil permettant la manipulation à l'échelle moléculaire : c'est le domaine du « contrôle cohérent », dans lequel les impulsions peuvent être utilisées pour préparer le système afin d'en stimuler l'évolution dans une direction choisie. C'est là un vaste champ de recherche puisque, pour favoriser une réaction donnée, il faut optimiser la forme spectrale et temporelle des impulsions.

Les agrégats continuent à être étudiés pour leurs propriétés intrinsèques (variabilité des propriétés avec la composition et la taille, effets liés au confinement). Ils sont des prototypes de systèmes complexes et des précurseurs pour étudier les effets d'environnement (nano-solvatation, nano-catalyse). Ils trouvent des applications importantes en astrochimie et physico-chimie environnementale, ainsi qu'en nanosciences, par leurs analogies avec certains systèmes nanostructurés, les boîtes quantiques et les systèmes à dimensionnalité réduite.

Un autre enjeu en spectroscopie moléculaire se situe à l'interface avec les sciences de l'environnement et l'astrophysique. Plusieurs programmes futurs d'observations spatiales, résultant des efforts considérables des agences spatiales nationales ou internationales, vont fournir des données d'une quantité et d'une qualité inégalées pour ce qui concerne les émissions de rayonnement atmosphériques et astrophysiques. C'est le cas, par exemple, des missions HERSCHEL - satellite observant des objets froids de l'astrophysique aux grandes longueurs d'onde - et IASI - spectromètre pour la détermination des profils verticaux de la température et des constituants dans l'atmosphère de la Terre. Le traitement des spectres devra fournir des informations dont la qualité répondra aux exigences de précision toujours croissantes nécessaires pour les interprétations en aval : chimie atmosphérique et pollution, effet de serre, formation des planètes, composition du milieu interstellaire, exobiologie...

Les études de molécules d'intérêt biologique connaissent également un essor remarquable. Les enjeux recouvrent la connaissance de leur structure et de leur réactivité, l'analyse des dommages d'irradiation, l'étude de l'influence de la solvataion, essentielle pour rendre compte du comportement in vivo, la mise au point de molécules biomimétiques. La grande taille de ces systèmes et leur multiplicité conformationnelle est un défi, tant du point de vue expérimental que de celui de la modélisation. Des communautés voisines ont acquis un très haut niveau de compétence en spectrométrie de masse permettant notamment le développement de la protéomique et les progrès associés en biochimie. Devant la complexité des échantillons étudiés, il s'agit aujourd'hui d'aller au-delà de la simple analyse en masse et de développer une analyse se rapprochant de la fonction même de ces biomolécules : caractérisation structurale, réactivité, propriétés des complexes moléculaires faiblement liés et des assemblages supramoléculaires.

Dans l'ensemble de ces enjeux, les exigences sont fortes (systèmes plus complexes, domaine spectral étendu, précision accrue) et ne pourront être satisfaites que par l'élaboration de nouvelles approches toujours plus performantes, profitant de la croissance constante des moyens de calcul et des progrès expérimentaux. Sur le plan expérimental, la communauté est sollicitée pour le développement d'outils de détection, résolus temporellement, spectralement ou spatialement (combinant le plus souvent plusieurs de ces caractéristiques) toujours plus précis et sensibles (voire embarquables), et d'outils d'excitation toujours plus performants, en résolution temporelle ou en brillance notamment. Elle est donc fortement impliquée dans l'utilisation de nouvelles sources, en particulier la source de rayonnement synchrotron SOLEIL, et les pôles fournisseurs de sources pulsées, notamment ultracourtes.

Molécules et chimie froides

La physique des atomes froids ou ultrafroids s'étend aujourd'hui aux molécules, systèmes offrant des situations plus riches avec plus de degrés de liberté, un caractère polaire prononcé et ouvrant à terme la voie à une chimie contrôlée. La photochimie froide met en oeuvre des réactions résonnantes entre espèces froides, assistées par un rayonnement à une fréquence adaptée, ou éventuellement amenées à résonance. Des succès ont été obtenus avec la formation de molécules froides par photoassociation d'atomes froids ou en utilisant une résonance de Feshbach, le refroidissement sympathique avec un gaz tampon refroidi suivi du piégeage magnétique de molécules, le ralentissement de molécules polaires d'un jet supersonique à l'aide de gradients de champs électriques dépendant du temps et l'obtention d'un condensat de molécules produit par association.

Malgré ces réalisations, l'état de l'art reste encore très éloigné de celui des atomes froids. Seules les méthodes partant d'atomes froids permettent actuellement d'atteindre le domaine de température sub-millikelvin. Un des enjeux du

domaine reste le développement de nouvelles méthodes pour obtenir des échantillons froids et denses de molécules dans leur niveau fondamental ou sur un seul niveau de rotation-vibration. Piéger ces molécules, les refroidir par évaporation ou par collisions avec des atomes ultrafroids constituent des étapes indispensables. Parmi les objectifs, citons par exemple l'obtention du seuil de dégénérescence quantique pour des molécules polaires ou la possibilité de tests fondamentaux sur des systèmes moléculaires.

Interaction avec des surfaces

L'étude d'édifices atomiques (molécules, agrégats) en interaction avec des surfaces de solides ou adsorbés sur celles-ci, prend une importance croissante, en particulier dans le contexte des nanosciences. On cherche actuellement à caractériser, influencer ou contrôler les évolutions dynamiques qui impliquent souvent des états excités transitoires. Différentes approches sont utilisées telles que l'impact d'atomes, d'ions ou d'électrons, la photo-excitation, les expériences pompe-sonde dans le domaine femtoseconde, la spectroscopie et la manipulation avec sonde locale (STM, AFM, SNOM).

On s'intéresse aussi aux adsorbats en tant qu'objets uniques et aux modifications induites par la surface (dissociation moléculaire, apparition de nouveaux degrés de liberté, modifications de structure) qui ont des implications directes sur la réactivité et constituent des mécanismes précurseurs en catalyse. La surface elle-même peut être déterminante dans l'apparition d'édifices nanométriques, comme dans toutes les études de croissance qui combinent des couples support/dépôt. Leur situation en surface permet de mettre ces édifices nanométriques sous observation par les nouveaux outils de sonde locale et ainsi de les caractériser à l'échelle atomique. La compréhension de comportements typiquement quantiques émergeant à cette échelle nanométrique, est un enjeu important pour le

contrôle puis la fonctionnalisation de ces nanostructures. Avec la possibilité de les manipuler mécaniquement ou électroniquement, la perspective d'une nouvelle « chimie sous pointe » apparaît.

Une autre voie importante d'exploration concerne les études et manipulations de grosses molécules synthétisées, organiques, biomimétiques, biologiques, déposées en surface, sur des semi-conducteurs à grand gap ou des surfaces fonctionnalisées. On aborde alors la thématique des machines moléculaires que l'on veut manipuler localement par des « pico commutateurs » induisant des modifications de conformation ou de structure électronique, dans la perspective de les intégrer dans des systèmes fonctionnalisés plus complexes. Si les nano-objets adressables individuellement posent des défis particulièrement intéressants, les propriétés d'ensemble (morphologie, organisation, transport vibrationnel et électronique, magnétisme, propriétés optiques) dans les systèmes de basse dimensionnalité, et l'étude des réseaux supramoléculaires ou à base d'agrégats, constituent également des défis à relever.

Excitations intenses par faisceaux d'ions

L'interaction d'ions multichargés avec des atomes, des molécules simples, des agrégats, des surfaces ou des solides conduit à une excitation intense de la matière qui résulte de la très forte perturbation qu'elle subit au cours de ces interactions. Cette excitation conduit pendant l'interaction à l'émission d'électrons, de lumière jusque dans le domaine X, d'atomes et d'ions secondaires (voire de petits agrégats chargés ou non). Elle induit, par ailleurs, des modifications de la matière, qui sont spécifiques du type de perturbation appliquée et du matériau étudié. L'étude de petits systèmes conduit à une connaissance fondamentale des processus élémentaires tels que l'excitation, l'ionisation, l'échange de charge ou encore à l'observation de

phénomènes plus spécifiques tels que les effets d'interférences dans des molécules simples.

L'étude des collisions ions-agrégats permet de sonder la situation intermédiaire entre l'atome et la surface ou le solide. Toute une nouvelle série d'effets liés à la spécificité des agrégats métalliques ou isolants reste à explorer. Les collisions avec des surfaces ont mis en évidence la formation de nano-défauts. La problématique de cet aspect de l'interaction ion-matière est de faire le lien entre les processus élémentaires de dépôt d'énergie qui se déroulent sur une échelle de temps de 0,01 à 100 femtosecondes, la dynamique de pulvérisation allant de 0,1 à 10 picosecondes et la formation de ces nano-défauts à la surface pour laquelle l'observation se fait sur des temps plus longs. La physique des collisions est étroitement liée aux nanosciences, aux études menées sur la matière sous champ laser intense et ultracourt ainsi qu'à la métrologie. L'excitation peut aussi engendrer l'émission de particules fortement énergétiques dans des états exotiques très difficilement accessibles par d'autres méthodes.

Dynamique moléculaire

La dynamique des systèmes moléculaires constitue un domaine où la simulation est essentielle à la compréhension, en raison de la grande variabilité et de la complexité croissante des objets. Les enjeux en sont multiples. En dehors de la précision nécessaire du calcul des surfaces de potentiel par exemple pour la spectroscopie et en particulier dans le cas des molécules froides, les efforts actuels portent sur les calculs (*ab initio* ou non) de dynamique moléculaire, la description des états vibrationnellement et électroniquement excités, le couplage électron-structure et les processus non-adiabatiques, les simulations aux temps longs, les phénomènes multi-échelles, le couplage avec l'environnement ou les champs extérieurs.

Ceci implique des développements théoriques, méthodologiques et algorithmiques. Des progrès sont par exemple en cours sur la

description du comportement thermodynamique des systèmes fins, le développement de méthodes statistiques appropriées pour la nucléation et la fragmentation, la dynamique de systèmes hétérogènes, les manifestations quantiques de la transition microscopique-mésoscopique-macroscopique.

COMPRENDRE ET MAITRISER LES PROCESSUS OPTIQUES

La compréhension et la maîtrise des processus optiques constituent un véritable sésame vers l'essaimage de l'optique dans d'autres domaines de la physique, dans la chimie, la biologie, les sciences de l'informatique et de la communication. Les paragraphes qui suivent résument une partie des études et recherches dans ce domaine en mettant l'accent sur les aspects pluridisciplinaires. On peut y constater la place croissante des problématiques pouvant être regroupées sous la thématique nanosciences, qui contribuent fortement à développer la pluridisciplinarité.

Matériaux pour l'optique et sources laser

La maîtrise des techniques et des processus de fabrication des matériaux permet de dominer et de tirer parti des propriétés de la lumière dans tous les milieux (homogènes, microstructurés, à bande interdite photonique, avec pertes ou gain, vivant). Les matériaux servant de sources laser continuent d'être fortement étudiés. Le développement des sources basées sur des milieux amplificateurs solides formés de cristaux d'oxydes minéraux a permis notamment la conception de dispositifs émettant des impulsions ultracourtes (picosecondes et femtosecondes).

En parallèle, les techniques de génération paramétriques, basées sur des matériaux à forte sensibilité aux non-linéarités du deuxième ordre, ont permis de couvrir tout le spectre visible du proche UV au proche IR. Ces progrès devraient être étendus à d'autres gammes de longueur

d'onde dans l'ultraviolet et l'infrarouge. Un des enjeux actuels pour les sources paramétriques est la miniaturisation, avec en particulier des stratégies prometteuses utilisant des matériaux micro et nanostructurés. Plus généralement, la miniaturisation des dispositifs émissifs est également un enjeu essentiel, en parallèle à la conception de sources de lumière à semi-conducteurs dans le domaine bleu-UV du spectre et à l'élaboration de sources à base de silicium qui ont l'avantage de s'insérer directement sur des puces électroniques.

Le développement de matériaux à propriétés non-linéaires du deuxième et du troisième ordre reste important en termes d'applications. Enfin, un véritable défi s'ouvre pour la maîtrise de matériaux à bandes interdites ou méta-diélectriques permettant de couvrir des zones extrêmes du spectre, d'augmenter l'efficacité de conversion ou génération de lumière et d'obtenir des micro ou nanosources efficaces, notamment basées sur des émetteurs uniques.

Processus physiques et optique non-linéaire

Les techniques de l'optique non-linéaire forment maintenant le cœur de nombreuses études dans des domaines très divers.

Les solitons optiques restent un sujet très étudié. Par exemple, des solitons spatiaux ont été prédits et observés dans la section transverse des faisceaux de lumière émise par des dispositifs optiques tels les oscillateurs paramétriques, les lasers, et les microrésonateurs à semi-conducteurs. Ces solitons optiques permettant une localisation de l'énergie, et ils se présentent comme des candidats prometteurs pour des applications de stockage de l'information. Cependant une des limitations fondamentales reste leur trop grande taille spatiale. Cette limitation majeure peut être levée dans des résonateurs où l'indice de réfraction du milieu est négatif (métamatériaux). La dynamique non

linéaire des résonateurs passifs et actifs injectés ou couplés, de complexité élevée, constitue un domaine d'une grande richesse. Ceci est vrai tout d'abord par le nombre de processus non-linéaires qui peuvent s'y dérouler. La relation que la dynamique non-linéaire optique établit avec les processus dynamiques se produisant notamment en chimie et en biologie et la compréhension qu'elle permet éventuellement de développer de ces processus complexes contribue également à l'intérêt croissant du domaine.

La spectroscopie femtoseconde, qui utilise des sources émettant des impulsions ultracourtes, constitue un outil majeur en pleine évolution. Le degré de sophistication des expériences ne cesse de croître y compris par le biais d'une ingénierie en amplitude et phase des impulsions ultracourtes. Le couplage de la communauté de l'optique non-linéaire avec les physiciens du solide, les chimistes et les biologistes, est dans ce domaine particulièrement évident. Un exemple peut être trouvé dans le domaine des semi-conducteurs qui est fortement marqué par l'électronique de spin, où l'information est portée non plus seulement par la charge, mais aussi par le spin de l'électron. Les méthodes optiques, qui permettent l'excitation d'électrons polarisés, y sont au cœur des mesures de dynamique de spin.

Dans les matériaux métalliques, ces méthodes de spectroscopie ultrarapide ont permis l'étude des premières étapes des relaxations électroniques, alors que dans les cristaux photoniques elles permettent une compréhension accrue et une utilisation des modes lents de la lumière.

Le femtomagnétisme est enfin un domaine nouveau, en pleine évolution, dont les résultats récents sur les dynamiques de désaimantation et de précession de moments magnétiques sur des temps courts sont très prometteurs.

La photonique et la nanophotonique

La photonique, science et technologie de la génération, de la manipulation, de la transmission et de la détection de la lumière, a un très large champ d'applications, par exemple pour les lasers, l'optoélectronique, l'imagerie, le traitement de l'information, les communications optiques, la santé, l'environnement... L'optique traditionnelle et la photonique vivent actuellement une révolution qui résulte de la convergence de nombreux travaux issus de la physique atomique, de l'optique quantique, de la physique des semi-conducteurs et du développement de l'optique guidée ou de champ proche.

L'apparition des cristaux photoniques, des fibres micro-structurées et de dispositifs de nano-plasmonique conduit à la réalisation de guides sub-longueurs d'onde, de nouveaux types de microcavités résonantes, de métamatériaux tels que les milieux à indice négatif ou super-réfractifs. Cette réduction de taille à des échelles sub-longueurs d'onde avec obtention de très forts facteurs de surtension, renouvelle l'optique non-linéaire en lui permettant d'accéder à des efficacités accrues ou à des situations inédites.

L'imagerie et l'analyse optique, disciplines traditionnelles, ont également connu une révolution avec l'optique de champ proche qui permet désormais de faire des images optiques avec une résolution de 20 nanomètres ou bien de faire un spectre Raman de quelques nanotubes de carbone ou encore d'analyser en régime femtoseconde le comportement des états d'énergie et du magnétisme de nanoparticules ou de molécules uniques.

L'ensemble de ces progrès, qui a débuté il y a une vingtaine d'années, a connu depuis 5 ans une convergence de développements divers qui a conduit à l'apparition de ce que l'on appelle la nano-photonique. Nanothermie cohérente, forces de Casimir et nano-systèmes électromécaniques, nanogénérateurs non-linéaires, constituent quelques exemples actuels de cette convergence

qui est loin d'avoir exprimé toutes ses potentialités dans un domaine fondamental dont les applications potentielles se multiplient.

La plasmonique

Outre son intérêt pour la compréhension des processus physiques mis en jeu dans la résolution des microscopes optiques à champ proche, le contrôle de la propagation des ondes plasmon-polariton de surface conduit au développement d'une nouvelle optique miniaturisée appelée plasmonique. Son avantage principal réside dans le fait que les mêmes circuits peuvent transporter des charges électriques et des champs électromagnétiques aux fréquences infrarouges et visibles, ouvrant ainsi la perspective d'intégration de composants optiques activés électriquement.

Les propriétés des plasmons de surface sont également invoquées dans le développement de nouvelles méthodes de stockage optique d'informations numérisées, de dispositifs optiques superfocalisants, ou de nouvelles générations de nanocapteurs mettant en jeu une nano-optique moléculaire.

L'étude des systèmes quantiques nanométriques nécessite une forte synergie entre expérimentateurs et théoriciens. La complexité des systèmes à traiter impose souvent la mise en œuvre de techniques complémentaires. La description des systèmes moléculaires de taille nanométrique requiert le couplage d'approches *ab initio*, de propagation de paquets d'onde, de fonctionnelle de la densité et des simulations du type Monte-Carlo ou de dynamique moléculaire.

L'électronique moléculaire

La nanoélectronique moléculaire cherche à comprendre la physique des assemblages moléculaires et à développer les compléments et alternatives des technologies de l'information classiques, en mettant en œuvre des nano-objets tels que molécules, nanoparticules, nanotubes, nanofils, agrégats... Le développement de fonctions complexes grâce à cette

nanoélectronique passe par la compréhension et l'utilisation des propriétés quantiques des nano-objets, la mise au point de technologies de manipulation collectives (auto-assemblage) et la mise au point de technologies d'interfaçage entre les nano-objets et le monde macroscopique. L'étude de la cohérence et du contrôle quantiques dans de tels nano-objets constitue un des enjeux majeurs de notre discipline. Les nanomachines moléculaires sont des défis cognitifs porteurs de nombreuses applications.

La biophotonique

Le développement d'approches expérimentales innovantes est à la base d'avancées importantes dans la compréhension des fonctions biologiques et de leurs exploitations à des fins médicales, thérapeutiques et préventives. Dans ce contexte, l'application des techniques d'optique et de spectroscopie moléculaire a conduit à l'émergence de la biophotonique. Ce domaine bénéficie d'une forte expansion engendrée par les progrès instrumentaux spectaculaires réalisés ces dernières années (impulsions laser ultrabrèves, détecteurs matriciels ultrasensibles), et le développement de techniques d'imageries avancées (linéaire et non-linéaire, cohérentes et incohérentes, en champ propagatif ou évanescent, éventuellement exaltées par des nanostructures ou des résonances).

La nanobiophotonique est un champ multidisciplinaire qui émerge à l'interface des nanosciences, de la photonique et de la biologie. Les progrès de l'optique n'ont cessé de rythmer et d'accompagner ceux des sciences de la vie, depuis l'invention du microscope. Plusieurs avancées révolutionnaires ont résulté de l'avènement des lasers, et de la nanophotonique. L'enjeu est la compréhension des mécanismes cellulaires et de leurs dysfonctionnements. L'accès à l'échelle submicronique, qui est celle des compartiments de la cellule et du noyau, et l'élucidation de leur spécialisation fonctionnelle conditionnent cet objectif.

Le marquage de macromolécules, la nanomanipulation par rayonnement optique, la microchirurgie par impulsions brèves, les biocomposants aux échelles microniques et nanométriques, constituent des enjeux majeurs aussi bien pour l'avancement des connaissances que pour l'avènement de nouvelles applications.

Lasers à ultrahaute intensité et plasmas

L'avènement de la technique d'amplification à dérive de fréquence (ou CPA) a révolutionné l'étude de l'interaction laser-matière en ouvrant des domaines de densité d'énergie inaccessibles sur des installations conventionnelles. Les intensités sur cible alors atteintes permettent d'aborder le régime relativiste et de nombreuses applications utilisant la brièveté de l'impulsion et sa forte puissance ont vu le jour. Parmi celles-ci, citons la production de sources de particules (électrons, ions, neutrons) énergétiques et de rayonnement (X , γ ...) sub-picoseconde qui permettent de résoudre la dynamique des atomes à l'échelle de leur vibration dans le champ intense.

La possibilité qu'offre cette « optique non-linéaire relativiste » de produire des impulsions attosecondes et des champs électriques extrêmes, de l'ordre du champ critique de Schwinger, va de plus repousser les limites de la connaissance en permettant d'étudier voire de contrôler le mouvement des électrons dans les atomes et d'accéder à des régimes inédits ultra-relativistes dans lesquels le proton lui-même devient relativiste.

La nouvelle physique induite par cette technologie de pointe, largement inexplorée, attire de nouvelles équipes de chercheurs. Elle possède une grande variété d'enjeux à fort impact, parmi lesquels on peut citer à titre d'exemples : la démonstration de nouvelles générations de sources X-UV et X, brèves, cohérentes ou incohérentes ; la démonstration de l'accélération contrôlée d'électrons jusqu'au GeV

et de faisceaux intenses d'ions mono-énergétiques jusqu'à quelques centaines de MeV ; le développement de lignes de lumière et celui d'applications hors du champ traditionnel de la physique des plasmas chauds (médecine et biologie, physique du solide...); le développement d'optiques X et X-UV et de techniques diagnostic associées ; l'étude, théorique et expérimentale, de la matière dense et chaude créée par irradiation ionique.

A plus long terme, il est possible d'envisager par exemple la création de paires électron-positron et l'étude en laboratoire de systèmes subissant les accélérations extrêmes produites par des impulsions attosecondes efficaces...

PLASMAS CHAUDS : VERS LA PRODUCTION D'ÉNERGIE PAR FUSION CONTRÔLÉE

Le contrôle de la fusion thermonucléaire constitue l'une des clés d'un grand défi scientifique de ce siècle, celui d'un avenir énergétique à la fois pérenne et sûr. Deux filières sont aujourd'hui explorées : le confinement magnétique (tokamak) et le confinement inertiel (laser), et deux Très Grands Equipements (ITER et le LMJ) sont actuellement en construction sur le sol français.

En relation avec le CEA, le CNRS contribue activement, et ce depuis plus d'une trentaine d'années, à la recherche amont nécessaire au succès de ces projets. Il a pour cela développé des programmes d'accompagnement qui recouvrent notamment l'exploitation d'un parc d'installations de taille plus modeste, moins coûteuses, plus polyvalentes et plus souples, donc mieux adaptées aux besoins de formation, à l'expérimentation « par parties » et à l'innovation ; la théorie et la modélisation ; des études connexes en particulier sur les matériaux et la physique atomique...

La conception de diagnostics pertinents, si possible non intrusifs, d'analyse des plasmas de

fusion constitue un enjeu important. Ils peuvent reposer sur la mise en œuvre de sources secondaires, comme par exemple les diagnostics micro-ondes développés sur Tore Supra pour des mesures de fluctuations ou les récents développements autour des applications interférométriques des faisceaux « laser X » ou de protons créés par laser, ou sur des techniques spectroscopiques. La physique atomique (émissivités et opacités, profils de raies) des plasmas chauds fortement rayonnants ou fortement couplés joue alors pour ces dernières un rôle déterminant.

Filière magnétique

Les plasmas d'ITER seront sensiblement différents des plasmas produits dans la génération actuelle de tokamaks. Cette évolution aura un fort impact sur les sujets traditionnellement traités (interaction plasma-paroi et plasmas de bord, magnétohydrodynamique, turbulence et transport associé, diagnostics non intrusifs) dans les unités mixtes CNRS/Universités.

Une différence essentielle tient au chauffage du plasma par les particules issues des réactions de fusion. En conséquence, l'étude des propriétés de confinement et de stabilité d'un plasma en régime de combustion constituera un axe majeur de recherche du programme scientifique d'ITER.

Par ailleurs, le plasma doit être initialement chauffé, notamment avec des ondes radiofréquence, afin d'atteindre les conditions de production de réactions de fusion. Les questions du couplage de la puissance par des antennes et de l'interaction entre les ondes RF et le plasma sont donc essentielles. Enfin, la limite en flux thermique admissible des éléments de première paroi, ainsi que les contraintes d'érosion et de contrôle des particules, imposent de réaliser des plasmas denses et rayonnants dont la physico-chimie est complexe.

Les principaux enjeux en physique des plasmas magnétisés sont multiples :

- l'étude des instabilités magnétohydrodynamiques en régime non linéaire et de l'impact d'une population de particules énergétiques sur leur croissance ; le développement de méthodes de contrôle ;

- la théorie, la modélisation (en particulier les simulations cinétiques dans le cœur du plasma ou fluides dans les régions périphériques collisionnelles) et l'étude expérimentale du transport turbulent dans des régimes de température élevée ;

- la compréhension de la propagation d'ondes radiofréquence et de leur dépôt de puissance dans un plasma en régime de combustion (traitement correct de l'interaction antennes-plasma, ...)

- l'analyse du comportement des éléments de première paroi sous irradiation (érosion, rétention du tritium, tenue des matériaux... pour des flux intenses de particules chargées et de neutrons).

Filière inertielle

Le schéma classique de fusion par attaque directe fait intervenir des mécanismes physiques (instabilités paramétriques et hydrodynamiques, conduction thermique, combustion ...) très variés, relativement bien maîtrisés mais à échelle réduite compte tenu des énergies laser disponibles aujourd'hui (au mieux une trentaine de kJ, soit seulement 15% de l'énergie nécessaire pour atteindre l'ignition). Une extrapolation fiable devra s'appuyer sur :

- la conception de codes multidimensionnels de simulation de l'implosion et de la combustion en attaque directe, ce qui suppose un accès à des grands calculateurs ;

- la mise en œuvre d'un programme d'expérimentation par parties tirant au mieux profit des installations laser accessibles par la communauté française et du savoir-faire existant notamment dans le domaine de l'interaction

laser-plasma - absorption aux courtes longueurs d'onde, saturation des instabilités paramétriques - et de l'hydrodynamique - équations d'état par laser, transport électronique anormal ;

- l'étude et le développement de techniques de contrôle des principales instabilités : lissage optique ou « plasma », mise en forme des impulsions laser, dessins de cibles innovants ;

- le développement d'une technologie « cibles » (incluant la maîtrise de la cryogénie) peu coûteuse.

Le schéma alternatif d'allumage rapide, récemment suggéré, bien que prometteur, n'a pas pu être validé et un certain nombre de points durs n'ont pour l'instant été abordés que de manière globale, sans réelle compréhension des mécanismes sous-jacents. L'enjeu principal sera donc, dans les prochaines années, de les lever. Cela concerne l'étude du transport collimaté des électrons dans un milieu comprimé, dense et chaud, celle du chauffage induit par le dépôt d'énergie de particules rapides et le développement d'une chaîne cohérente d'outils numériques. Des premières expériences intégrées ont permis d'acquiescer des résultats encourageants mais il reste à obtenir une validation du concept à une échelle pertinente, sur des installations laser couplant impulsion de forte énergie (kJ, ns) et impulsion de forte puissance (kJ, PW). Elle permettra d'asseoir le dimensionnement d'une installation Européenne de démonstration (projet HiPER).

Compte tenu des investissements considérables consentis par la société française, le CNRS doit prendre en compte l'importance de la maîtrise de la fusion thermonucléaire contrôlée dans la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergie et s'engager dans un programme national pluriannuel, en participant activement aux programmes scientifiques qui seront conduits dès la prochaine décennie sur les TGE et en développant des programmes d'accompagnement.