

ATOMES ET MOLECULES – OPTIQUE ET LASERS – PLASMAS CHAUDS

Président

Jacques ROBERT

Membres de la section

Lamri ADOUI

Philippe BALCOU

Karine BEROFF-WOHRER

Philippe BOUYER

Denis DOUILLET

Philippe DUGOURD

Valentina EMILIANI

Philippe GHENDRIH

Pierre GILLIOT

Guillaume HERLEM

Thérèse HUET

Vincent LONG

Alexandre MATZKIN

Guy MILLOT

Martine RICHARD-VIARD

Isabelle ROBERT-PHILIP

Christophe SALOMON

Patricia SELLES

Jorge TREDICCE

1 - INTRODUCTION

La physique atomique et moléculaire et l'optique nous ont permis d'élaborer une image de notre monde simple et efficace. C'est dans ces disciplines que sont apparues les théories statistiques, l'électromagnétisme et la relativité et la mécanique quantique. Avec les lasers et les plasmas, son champ d'étude s'est ouvert sur la dynamique non linéaire et en a permis de belles illustrations. Ce domaine, où l'expérimentation peut rester à l'échelle humaine, est un espace de rupture, qui a toujours su tirer parti des innovations technologiques dont il a été souvent le moteur. C'est pour cela qu'il reste toujours et encore bien vivant et fascinant. Les maîtres mots qui résumeraient ce rapport de conjoncture sont « contrôle et cohérence ». C'est cette même vague qui a permis les progrès spectaculaires dans les domaines de la métrologie, de l'information quantique, des gaz quantiques, de la dynamique quantique des molécules et agrégats en laboratoire ou en milieu naturel. Elle a accompagné les avancées foisonnantes de la physique des lasers et de l'optique quantique, qui opèrent le lien entre les différentes échelles qui structurent ou déstructurent la matière et qui nous ont ouvert un nouveau regard sur le vivant. Si les nanosciences sont le creuset où se construisent nos instruments et notre communication futurs, l'énergie qu'il faudra bien y injecter sera issue des machines qui maîtriseront la fusion thermonucléaire.

2 - UN ETAT DES LIEUX

2.1 PROCESSUS FONDAMENTAUX EN PHYSIQUE QUANTIQUE PHYSIQUE ATOMIQUE, ATOMES FROIDS, GAZ QUANTIQUES METROLOGIE INFORMATION QUANTIQUE

La physique des atomes et molécules a subi des développements spectaculaires ces quatre dernières années, et tout laisse à penser que ces développements vont continuer à ouvrir de nouvelles thématiques au sein de cette discipline mais aussi, très souvent, à l'interface avec d'autres disciplines de la physique.

Ainsi, l'invention des peignes de fréquence à l'aide de lasers femtosecondes a ouvert la voie non seulement au développement des horloges optiques, avec une nouvelle génération de tests des lois fondamentales de la physique, mais bien au-delà, elle est en train de révolutionner la spectroscopie à transformée de Fourier, d'apporter des références exactes en astrophysique ou encore dans le domaine des impulsions cohérentes ultracourtes.

De même, dans le domaine des atomes ultrafroids, le régime des fortes corrélations quantiques atteint récemment (isolant de Mott, fermions fortement corrélés, gaz ultrafroids en dimensions réduites) ou encore l'observation de la localisation d'Anderson d'ondes de matière constituent un pont très fructueux avec la physique statistique, la physique de la matière condensée et la physique nucléaire. L'excellent contrôle qu'apporte la physique atomique sur ces gaz quantiques a permis d'apporter des réponses à des problèmes théoriques soulevés parfois depuis plus de 50 ans et non encore résolus. En parallèle, les progrès pour produire des molécules froides ont été spectaculaires, illustrant comment l'excellente connaissance des processus fondamentaux permet, dans un second temps, d'inventer de nouvelles méthodes pour produire des objets plus complexes qui seront, à leur tour, exploités en physique moléculaire.

L'étude des processus quantiques les plus fondamentaux comme la non-séparabilité en mécanique quantique ou l'intrication a conduit à de spectaculaires réalisations expérimentales, comme l'observation directe de photons individuels sans les détruire, à la génération d'états intriqués à grand nombre de particules, à la génération de photons uniques avec des applications concrètes en cryptographie quantique ou information quantique. Certes la réalisation d'un ordinateur quantique « utile » reste hors du cadre de ce rapport de conjoncture mais de nombreuses avancées majeures ont été réalisées dans ce domaine.

Physique et processus quantiques, lois fondamentales

Mesures de précision

Les méthodes de spectroscopie modernes et le contrôle du mouvement des atomes et des molécules sont à l'origine d'avancées spectaculaires en termes de précision. L'échelle des énergies atomiques est gouvernée par la constante de Rydberg mesurée par spectroscopie laser sur l'atome d'hydrogène au niveau de 10-12; la constante de structure fine, qui caractérise la force de l'interaction électromagnétique, est désormais mesurée avec une incertitude de 4×10^{-9} avec des atomes froids ; les horloges qui pilotent le Temps Atomique International sont des fontaines à atomes froids dont la stabilité de fréquence atteint 10^{-16} après quelques jours de mesure et les horloges optiques sont en passe d'obtenir cette performance sur quelques dizaines de secondes. Une mesure récente du rayon de charge du proton sur l'hydrogène muonique a révélé un désaccord significatif avec des mesures antérieures et soulève d'intéressants problèmes d'interprétation ou révèle peut-être une nouvelle physique.

L'interféromètre optique du grand instrument franco-italien VIRGO atteint une sensibilité record qui ouvre la perspective fascinante de détecter les ondes gravitationnelles émises par les événements violents, qui se produisent au sein de l'univers, comme la fusion de deux trous noirs ou l'explosion d'une supernova. La détection directe des ondes gravitationnelles testera une prédiction centrale de la relativité générale. En astrophysique, elle ouvrira aussi une nouvelle fenêtre d'observation de l'univers qui viendra

compléter l'information fournie par l'analyse de la lumière recueillie par les télescopes.

Les peignes de fréquence des lasers femtoseconde apportent une révolution pour couvrir la gamme complète des fréquences optiques aux fréquences micro-ondes ; associés aux méthodes de transfert de temps par fibres optiques sur plusieurs centaines de kilomètres, ils permettent de rendre accessibles à tous les signaux des meilleures horloges . Ainsi, toute fréquence en dessous du PHz environ peut désormais être mesurée aujourd'hui avec au moins 16 chiffres significatifs.

Le domaine des senseurs inertiels par interférométrie atomique a subi une forte expansion avec, d'une part, des instruments opérationnels qui ont détecté les ondes sismiques de plusieurs tremblements de terre avec une très bonne résolution temporelle et, d'autre part, la construction de nouveaux instruments plus précis visant en particulier la mesure précise de forces à courte distance. L'exploitation du laser à atomes, l'analogie pour les ondes de matière du laser optique pour les ondes lumineuses, ouvre des perspectives intéressantes dans ces domaines.

Dans le cadre de la mission spatiale PHARAO/ACES supportée par le CNES et l'ESA, une horloge à atomes froids sera embarquée à bord de la station spatiale internationale entre 2013 et 2015. Cette mission permettra via des comparaisons d'horloges de très grande précision, des tests sur la stabilité des interactions fondamentales déterminant la position des niveaux d'énergie atomiques ou moléculaires (interaction forte, faible et électromagnétique, rapport des masses de l'électron et du proton). Finalement un enjeu majeur de la détermination précise des constantes fondamentales est la redéfinition prochaine du système international d'unités, dont les implications commerciales sont considérables à l'échelle mondiale.

Gaz quantiques

Les gaz d'atomes froids apparaissent désormais comme des objets très prometteurs pour simuler des systèmes plus complexes de matière condensée. Plusieurs voies ont subi des développements spectaculaires ces dernières années, la physique des gaz quantiques en dimension réduite, les gaz de Fermi en interaction forte, les gaz dipolaires et les mélanges, la localisation d'Anderson d'ondes de matière et le couplage d'un condensat de Bose-Einstein avec une cavité optique de haute finesse en sont quelques exemples.

Les gaz quantiques permettent d'aborder des situations de basse dimensionnalité, dont l'importance pratique est considérable : la supraconductivité à haute température, ou encore l'effet Hall quantique avec ses excitations « anyoniques », sont des phénomènes liés intrinsèquement à la physique à deux dimensions. Ainsi, la transition superfluide (Kosterlitz-Thouless) a été récemment mise en évidence dans des gaz d'atomes froids. Plusieurs projets sont à l'étude pour générer des champs de jauge artificiels sur ces gaz atomiques, qu'ils soient continus ou confinés de manière discrète sur les sites d'un réseau optique. Ceci permettra de simuler le magnétisme des gaz d'électrons, élément essentiel de la physique de la matière condensée.

Une seconde direction très active, aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental, concerne les gaz de Fermi avec interactions ajustables. L'équation d'état et le

diagramme de phase ont été établis pour des fermions avec interaction en ondes de force arbitraire, un problème soulevé dès les années 1980 et très difficile à traiter sur le plan théorique, à cause des fortes corrélations. Ce problème est universel, car il s'applique à tout système dont l'interaction est décrite par un potentiel de contact. Une telle équation d'état s'applique en effet aussi bien aux gaz ultrafroids qu'à la couche externe des étoiles à neutrons, bien que 24 ordres de grandeur en densité les séparent. Ainsi, plusieurs théories quantiques à N-corps ont pu être validées (ou invalidées !) par l'expérience.

Grâce à un nouveau type de cavité optique fibrée de finesse $F > 100000$ directement couplée à un micro-circuit à atomes, pour la première fois des expériences d'électrodynamique quantique en cavité avec des condensats de Bose-Einstein (CBE) ont pu être réalisées. La situation physique est nouvelle, car, à la fois le couplage atome-photon et le mouvement atomique se trouvent dans un régime quantique. Ces résultats ont stimulé le développement d'une nouvelle optomécanique en cavité avec des CBE.

Le domaine des gaz quantiques est également un domaine où le couplage théorie-expérience est très fructueux. Plusieurs avancées théoriques importantes ont été réalisées dans ce cadre, comme la solution du problème de 3 fermions en interaction dans un piège harmonique, le comportement d'un gaz de polarons fermioniques, la comparaison directe entre expériences et simulations quantiques par la méthode de champ moyen dynamique pour le problème de la transition métal isolant de Mott, la proposition d'un système nouveau pour la localisation d'ondes de matière par un potentiel désordonné, les propriétés des gaz dipolaires, etc....

On le voit, les gaz atomiques froids permettent d'aborder des problèmes difficiles, comme les transitions de phase quantique, induites par le désordre (localisation d'Anderson) ou bien par les interactions entre particules (localisation de Mott) ; ils provoquent ainsi un renouvellement complet de cette thématique de recherche.

Une nouvelle voie d'études très prometteuse se branche aujourd'hui sur les gaz quantiques : celle des molécules ultrafroides, qui est en développement très rapide depuis quelques années (cf. infra)... Elle ouvre un nouveau domaine pour la chimie, avec la possibilité d'un contrôle sans précédent sur les paramètres des échantillons.

Information quantique

Si les concepts de l'information quantique sont nés il y a près de trente ans, ce domaine connaît un regain d'intérêt depuis une quinzaine d'années avec les premiers algorithmes exploitant le parallélisme massif offert par les systèmes quantiques. À l'interface entre la mécanique quantique et le traitement de l'information, l'information quantique peut se diviser en deux pans : le traitement de l'information quantique qui est le pendant classique du traitement de l'information classique, et les communications quantiques, pendant quantique des communications classiques.

Distribuer des clés secrètes

On peut qualifier de dispositif de communication quantique tout système qui exploite le principe d'incertitude ou l'intrication quantique, pour échanger des clés secrètes de cryptage. Plusieurs protocoles (à variables discrètes, continues ou recourant à des états leurres) ont été proposés et expérimentalement mis en œuvre ces dix dernières années. À ce jour, dans toutes les expériences de distribution quantique de clé, l'information est codée sur des états quantiques de la lumière, même si d'autres schémas recourant à des atomes ou des ions sont explorés. Ces expériences de cryptographie quantique sont devenues des expériences de routine en laboratoire aujourd'hui. Cependant, de nombreuses difficultés à la fois expérimentales et conceptuelles freinent encore aujourd'hui le déploiement de tels systèmes d'échange de clé secrète, sur de longues distances et avec des taux de génération de clés élevées. Un défi majeur actuel est de répondre à ces enjeux.

D'un point de vue théorique, les travaux portent aujourd'hui sur l'efficacité et la sécurité de l'échange. À titre d'exemple, on peut mentionner les recherches visant à étendre les preuves de sécurité lorsque la clé échangée est de taille finie. D'un point de vue expérimental, que ce soit pour des communications par fibre optique ou bien en espace libre, par exemple vers des satellites, les efforts se portent notamment aujourd'hui sur l'ingénierie de détecteurs à plus faible bruit et plus rapides, sur l'amélioration des sources d'états quantiques de la lumière... Pour étendre les distances d'échange de clé et implémenter des réseaux quantiques, le développement des pendants classiques des relais et répéteurs, se poursuit. Les relais quantiques exploitent la téléportation quantique et le transfert d'intrication. Ceci suppose le recours de sources efficaces d'états intriqués de la lumière et de pouvoir réaliser des expériences de transfert d'intrication sur de longues distances et en espace libre. Quant à l'implémentation de répéteurs quantiques, elle requiert de disposer de mémoires quantiques, dispositifs capables de stocker un état quantique et de le restituer à la demande.

Interfaces et mémoires

Le développement de telles mémoires quantiques et interfaces entre les vecteurs de l'information quantique (états quantiques de la lumière) et les systèmes de stockage ou traitement de l'information (atomes, ions, systèmes solides...), est un autre axe majeur de recherche qui constitue un véritable challenge. Le support du bit quantique d'information peut être une vapeur atomique ou un nuage d'ions piégés ou bien encore des ions terre rare en matrice solide. Ce support doit présenter conjointement un très bon couplage avec la lumière (pour les phases de transfert – écriture ou lecture) ainsi qu'un temps de cohérence très long (pour le stockage). Des expériences de mémoires quantiques ont déjà été mises en œuvre, dans lesquelles les supports physiques étaient par exemple des vapeurs atomiques ou des ions contenus dans une maille cristalline solide. Les grands enjeux seront d'accroître la capacité de stockage de telles mémoires par la réalisation de mémoires multimodes, d'améliorer la restitution et

la fidélité de stockage ainsi que de développer des techniques de corrections d'erreurs pour de longs temps de stockage.

Réaliser des opérations de logique quantique

Le traitement de l'information quantique est exploré depuis une quinzaine d'années. De nombreuses expériences s'efforcent de mettre en œuvre les algorithmes proposés qui exploitent le principe de superposition ou encore l'intrication. De nombreux supports physiques sont à l'étude pour réaliser des opérations de logiques quantiques : ions piégés, molécules, atomes neutres, électrodynamique quantique en cavité, circuits supraconducteurs, nano-émetteurs solides (boîtes quantiques semiconductrices, centres colorés dans le diamant...), spin d'impuretés dans des matrices solides, photons... Si certains sont plus matures que d'autres, aucun cependant ne remplit l'ensemble des pré-requis nécessaires pour mettre en œuvre de façon complètement satisfaisante les opérations de traitement de l'information quantique. Il convient donc encore aujourd'hui d'explorer et améliorer les potentialités de ces systèmes ainsi que de réaliser sur la plupart de ces supports, des premières opérations à deux ou plusieurs bits quantiques. Au-delà de l'ingénierie de dispositifs réalisant des algorithmes quantiques à quelques bits voire quelques dizaines de bits quantiques, il convient d'étendre le domaine possible du traitement de l'information quantique, par le développement de nouvelles architectures, nouveaux algorithmes et codes correcteurs d'erreurs, par le développement de nouvelles interfaces ou par l'étude des potentialités des qubits topologiques par exemple. Les travaux théoriques plus fondamentaux seront tout aussi nécessaires. On peut citer ici pour exemple la théorie de la décohérence et de l'intrication, notamment multi-particules.

2.2 MOLECULES, BIOMOLECULES ET AGREGAT : EN PHASE DILUEE, EN SURFACE, EN PHASE CONDENSEE : STRUCTURE ET DYNAMIQUE FRAGMENTATION ET AGREGATION APPLICATIONS A LA PHYSICOCHIMIE, A L'ENVIRONNEMENT ET L'ASTROPHYSIQUE

Molécules, ions, agrégats en phase gazeuse

La dynamique de petits systèmes de taille finie, étudiée par une large palette de modes d'excitation (photons, électrons, ions), constitue un cas modèle d'interaction fondamentale de N-corps en interaction coulombienne. Un intérêt particulier est porté à quantifier le rôle des corrélations électroniques et à étudier les processus de dissociation au sens large (émission électronique, production de fragments et leur couplage)

dans les atomes, ions et molécules. Des travaux très nombreux ont été menés sur des tout petits systèmes (H_2 , N_2 , molécules triatomiques) permettant des investigations expérimentales et théoriques approfondies. Le développement de techniques de détection donnant accès aux corrélations vectorielles entre les particules émises a permis d'imager la dissociation moléculaire et d'analyser les mécanismes complexes de compétition entre relaxation électronique et dissociation. L'étude de l'émission électronique depuis une cible multicentrique est désormais accessible directement dans le référentiel de la molécule. Des figures d'interférence spectaculaires dans l'émission électronique à partir de H_2 ont été obtenues dans des expériences de collision avec des ions multichargés. L'exploration de la compétition entre dissociation partielle et totale atomisation, entre fragmentation directe et séquentielle ou encore la dynamique de dissociation d'espèces multi-chargées s'est poursuivie sur les molécules plus complexes.

Le développement des sources laser courtes et ultra-courtes a permis des avancées au niveau de la compréhension de la dynamique de relaxation au sein des édifices moléculaires excités. Les techniques pompe-sonde ont tracé le suivi de nouvelles classes d'états (états se dissociant par paires d'ions par exemple) et mis à jour les mécanismes de relaxation dans de nouvelles classes de molécules (cycles fermés par liaisons hydrogènes, molécules bi-stables...). 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. Dans ce dernier domaine, et plus particulièrement dans le domaine des impulsions attosecondes (as), les progrès ont été considérables, à l'interface de la physique moléculaire et de l'optique non-linéaire. Les avancées récentes se réfèrent notamment à la génération d'harmoniques élevées (HHG) à partir de molécules alignées permettant un contrôle des impulsions attosecondes, à la tomographie des orbitales moléculaires et à la dynamique électronique à l'échelle attoseconde dans les molécules. L'utilisation de sources attoseconde ouvre ainsi la voie à un champ encore totalement inexploré, celui de l'ère post Born-Oppenheimer.

Des expériences de photoionisation en couche interne effectuées auprès du centre de rayonnement synchrotron BESSY à Berlin (Allemagne) permettent d'étudier le dichroïsme circulaire ou d'observer des effets non dipolaires de l'interaction photon-molécule. L'étude de la relaxation des molécules excitées en couche interne représente un centre d'intérêt majeur pour les expériences de type « pompe-sonde » utilisant la combinaison entre le rayonnement synchrotron et un laser optique. La haute résolution spectrale et la forte intensité du laser sont utilisées dans ce type d'expérience pour sonder les fragments d'un processus de photodissociation induit par un rayonnement XUV. Le but principal de ces expériences est de fournir une meilleure compréhension du couplage entre le mouvement des noyaux et des électrons, ainsi que de préciser son influence sur le processus de fragmentation.

Les agrégats continuent à être étudiés pour leurs propriétés intrinsèques (variabilité des propriétés avec la composition et la taille, effets liés au confinement). Des avancées importantes ont été obtenues ces quatre dernières années, notamment en ce qui concerne leur propriétés thermodynamiques (températures de fusion, nouvelles techniques de calorimétrie), l'étude du processus d'agrégation au niveau moléculaire, l'étude des voies de relaxation et l'apport des expériences aux modèles statistiques, la fragmentation des agrégats multi-chargés (partage de l'énergie, dynamique moléculaire quantique), l'étude des systèmes solvatés et à très grand nombre de degrés de liberté (multi-dimensionnels), les propriétés optiques, magnétiques et de transport (dépendant du spin) dans les nanostructures. Les agrégats métalliques, de gaz rare ou d'eau, sont également utilisés comme supports réactionnels modèles et des études sur des systèmes hydrides agrégats / biomolécules sont en train d'émerger. Il s'agit dans ce dernier cas d'utiliser l'agrégat comme marqueur optique et de comprendre l'éventuelle influence de l'agrégat sur les propriétés structurelles de la biomolécule.

Molécules et chimie froides

Le refroidissement, le piégeage et le contrôle des molécules froides connaissent des progrès importants. La formation de molécules dans des gaz atomiques dégénérés par association magnétique a été réalisée par plusieurs équipes, la stabilité et les états moléculaires obtenus étant mieux contrôlés. Les méthodes basées sur la photo-association d'atomes froids ont également connu une variété et une sophistication croissantes : par exemple un montage combinant la photo-association avec un pompage optique permet de former des molécules froides dans un niveau vibrationnel choisi (y compris dans le niveau d'énergie le plus bas). Les méthodes de refroidissement direct de molécules, basées sur l'utilisation de champs électrique ou magnétique ou par des collisions avec un gaz tampon refroidi, sont beaucoup plus générales dans leurs applications mais ne permettent pas encore de descendre sous le millikelvin. La variété de ces méthodes directes, fruit d'un développement instrumental conséquent, permet de traiter différents types de molécules (neutres, polaires, paramagnétiques...) y compris des polyatomiques.

Les développements et les calculs théoriques, qui ont été cruciaux pour déterminer les paramètres propices à l'obtention de molécules froides par magnéto ou photo-association d'atomes alcalins ne peuvent par nature être aussi précis lorsqu'il s'agit d'étudier le refroidissement de molécules plus complexes ou lorsque des interactions à plusieurs corps doivent être prises en compte. C'est pourquoi des efforts importants visent à obtenir des simulations numériques réalistes afin de préparer le terrain expérimental.

Les molécules froides obtenues permettront de nombreuses applications, dont certaines sont en cours de réalisation. Les gaz dégénérés de molécules ont des propriétés différentes des gaz atomiques, avec des effets collectifs pouvant être exploités dans des réactions chimiques. La spectroscopie des molécules froides atteindra une résolution inégalée : le contrôle hautement sélectif des états moléculaires permet une « chimie froide » basée sur le contrôle précis des réactions, alors que la haute

résolution laisse déjà entrevoir des possibilités de tester les lois fondamentales, comme le rapport des masses du proton et de l'électron.

Interface avec l'astrophysique et l'environnement

La physique moléculaire joue un rôle majeur dans les milieux astrophysiques. Plus de 150 molécules, dont certaines assez complexes (≤ 13 atomes), ont été découvertes et déjà été identifiées dans le milieu interstellaire (MIS) et circumstellaire. De nombreux chercheurs de la section 04 sont impliqués dans des études structurales de ces molécules complexes, se trouvant dans leur état fondamental ou dans des états électroniques ou vibrationnels excités. Ces études, associées aux progrès en instrumentation au niveau de la détection, permettent de découvrir environ cinq nouvelles espèces par an tels les anions moléculaires identifiés en 2006. La dynamique de relaxation des espèces excitées, les processus de collision et de réactivité, et d'une manière générale l'étude des processus physico-chimiques prenant place dans des environnements très divers (température, état d'ionisation, rayonnements), constituent un autre pôle d'étude très fort de la section 04. Outre la chimie en phase gaz, il est désormais prouvé que la chimie sur les grains est capitale pour rendre compte de l'évolution des espèces. L'étude de cette chimie hétérogène sur surfaces froides est en plein essor, expérimentalement et théoriquement. L'astrophysique de laboratoire est aussi un domaine très actif. L'idée consiste à reproduire, à des facteurs d'échelle spatial et/ou temporel près, des objets astrophysiques que l'on souhaite étudier. Les zones de formation de suies, certains processus physico-chimiques sont ainsi étudiés en laboratoire ainsi que, à l'interface avec la physique des plasmas, les chocs radiatifs et les jets stellaires.

La modélisation des milieux et de leur évolution est basée sur la connaissance des données de physique atomique et moléculaire. Outre leur participation à la mise au point de bases de données fiables, les chercheurs s'impliquent de plus en plus dans cette modélisation, souvent en collaboration avec des équipes de l'INSU. Une avancée très récente se réfère à la prise en compte et à la propagation des erreurs dans les modèles ainsi qu'à la recherche des réactions-clés, aussi bien dans les modèles du MIS que dans les modèles des atmosphères planétaires. Les observations et le développement de nouveaux instruments dédiés, activités menées essentiellement au sein de l'INSU pour l'astrophysique, n'en demeurent pas moins un puissant moteur pour les recherches menées dans les autres instituts. La préparation du lancement de HERSCHEL, effectué avec succès en mai 2009, a en effet généré de nombreuses études de spectroscopie et de dynamique, notamment pour les molécules organiques complexes, les HAP, H₂O et leurs agrégats.

L'étude des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère terrestre reçoit une attention soutenue. L'impact sociétal majeur de la pollution atmosphérique a permis de financer des programmes scientifiques d'envergure, en particulier des missions satellitaires avec des instruments embarqués couvrant la gamme spectrale de l'UV-visible et de l'IR thermique. Les laboratoires de la section 04 contribuent

à la conception et au développement de spectromètres embarqués et à l'exploitation des données. Cette dernière activité nécessite aussi une importante contribution de la communauté spectroscopique, afin d'alimenter les bases de données. Les instrumentations de laboratoire continuent à se développer (notamment avec une sensibilité accrue, en mettant en œuvre les techniques lasers récentes – CRDS, CEAS, peignes de fréquences). Les atmosphères des planètes géantes font également l'objet de nombreuses études. En particulier les spectres infrarouges et UV/Vis de l'atmosphère de Titan, obtenus par la mission CASSINI, ont permis de caractériser cette atmosphère depuis les hautes altitudes jusqu'au sol. Des expériences de cinétique chimique à basses températures, de photo-dissociation permettent de produire des données nécessaires à la modélisation de ce type d'atmosphère. Cette thématique génère aussi des études qui vont de la spectroscopie haute résolution de molécules simples et de ses isotopes, comme le méthane ou l'éthylène, à la structure vibrationnelle d'agrégats carbonés. Dans ce dernier cas, les approches expérimentales utilisées en laboratoire, permettent aussi de contribuer à l'étude de phénomènes de combustion, par exemple via la caractérisation de suies.

Pour toutes ces études d'intérêt astrophysique et atmosphérique, il convient de noter l'utilisation grandissante du synchrotron SOLEIL (TGIR), en particulier les lignes de lumière AILES pour l'IR/THz et DESIRS pour l'UV.

Interface avec la biologie

Les progrès en physique moléculaire, nanoscience, optique, microscopie ... ouvrent l'accès à l'analyse et la compréhension des systèmes biologiques à l'échelle moléculaire. Ils permettent ainsi d'aborder de nouveaux problèmes et de préciser les mécanismes qui interviennent dans le fonctionnement de la cellule vivante. De très nombreux chercheurs de la section 04 travaillent à cette interface. On a assisté ces quatre dernières années à une évolution des thématiques de l'étude de systèmes modèles vers l'étude de biomolécules ou édifices moléculaires fonctionnels.

Les études de molécules d'intérêt biologique en phase gazeuse connaissent un essor remarquable. Avec une approche de type « bottom-up », 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 solvatation, essentielle pour rendre compte du comportement in vivo, la mise au point de molécules biomimétiques. Des progrès notables ont été obtenus concernant la fragmentation de ces espèces en appliquant les techniques les plus avancées (multi-coïncidences entre fragments par exemple). Les couplages spectrométrie de masse et spectroscopie optique se sont fortement développés dans les domaines infra-rouge, visible et UV et ont été étendus à l'UV lointain. Sont également apparus des couplages avec des faisceaux d'ions et la mobilité ionique, cette dernière technique permettant l'étude des changements conformationnels. Ceci a permis ces quatre dernières années, grâce aussi au développement des outils théoriques, la caractérisation de systèmes biologiques en phase gazeuse de plus en plus complexes (protéines, complexes peptide-ligand, complexes moléculaires faiblement liés...) ouvrant ainsi la voie à l'étude de

systèmes fonctionnels totalement isolés.

2.3 COLLISIONS ATOMIQUES ET MOLECULAIRES, PROCESSUS REACTIONNELS, INTERACTIONS AVEC DES SURFACES

Surfaces

L'essor des thématiques surfaces s'est poursuivi et amplifié ces dernières années. Les sujets d'étude concernent les propriétés intrinsèques de surface, les propriétés des adsorbats déposés sur surface (atomes, molécules, agrégats) et le contrôle du dépôt pour nanostructurer et fonctionnaliser les surfaces, la réactivité spontanée ou provoquée, les propriétés catalytiques des nanoparticules déposées, les processus d'auto-assemblage, la manipulation des molécules individuelles par excitation électronique localisée... Par rapport aux études menées dans les autres sections, celles menées au sein de la section 04 ont comme particularité d'utiliser largement les collisions avec des ions, électrons, atomes comme sondes de la surface et de s'intéresser au rôle environnant de la surface sur les propriétés des systèmes moléculaires.

Ces études bénéficient d'outils variés toujours en évolution : sondes optiques, faisceaux d'ions, électrons, atomes (nouvelle technique de caractérisation de surfaces par impact d'atomes rapides à incidence rasante), diffraction par neutrons et rayons X, sondes locales en champ proche (STM, AFM), techniques pompe-sonde avec des impulsions femto-seconde... La technique de génération de fréquence somme (SFG) avec des impulsions femtoseconde permet de sonder sélectivement l'interaction molécule-surface ou molécule-nanoparticule aux temps courts. La manipulation de molécules individuelles par STM et AFM est désormais couplée avec des impulsions laser pour l'étude de nouveaux processus contrôlés (par exemple dissociation d'une molécule unique). Des techniques couplées visant à sonder à la fois les propriétés électroniques et vibrationnelles de monocouches déposées sur substrat, dans le contexte de la fonctionnalisation des SAM's (métallisation), sont également mises en œuvre.

Des résultats nouveaux ont été obtenus en ce qui concerne la nanostructuration de surface par réactivité provoquée, la chimie dans les glaces par impact d'électrons, le contrôle des molécules individuelles (nano-machines moléculaires) et la perspective d'une nouvelle « chimie sous pointe », la compréhension des mécanismes de dépôt d'agrégats et le rôle de la surface dans l'auto-organisation et la synthèse de nouveaux édifices, les propriétés des agrégats déposés, la fonctionnalisation des surfaces pour de nombreuses applications (nanocatalyse, capteurs chimiques et biochimiques, membranes, substrats pour culture cellulaire, dispositifs pour l'électronique)....

Une activité théorique dynamique est menée en parallèle. Des résultats inédits ont été obtenus concernant la dynamique électronique au sein de nano-objets (nanofils, corrals) déposés en surface qui ouvrent des perspectives nouvelles en électronique moléculaire. Les études sur les formations de molécules sur surfaces, et d'une manière générale l'étude des interfaces gaz-solide dans le contexte

de l'astrophysique sont très actives. C'est aussi le cas des études liées à la fusion, telles que l'interaction plasma-surface. Les traitements théoriques de la surface, de ses adsorbats et incluant souvent la sonde de champ proche, sont menées au plus près des études expérimentales.

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 nonadiabatiques, 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. En particulier le besoin de combiner des théories différentes (approches mixtes ou hybrides) apparaît nécessaire dans nombre de situations (systèmes hétérogènes, sites actifs, relaxations à des temps très variables etc...) et connaît un essor très important actuellement. Avec l'étude de gros systèmes, l'étude de systèmes solvatés, certaines méthodes théoriques utilisées en matière condensée apparaissent de plus en plus pertinentes et les liens entre les deux communautés sont clairement en train de se renforcer.

2.4 CONTROLER LES PROCESSUS OPTIQUES POUR LES FONCTIONNALISER

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. Cette discipline scientifique connaît un essor considérable et diffuse très largement dans tous les domaines de l'activité humaine et joue de facto un rôle sociétal majeur. Elle est étroitement liée à d'autres domaines importants, tels que l'électronique, la mécanique, les sciences de l'information et de la communication, la chimie, les sciences du vivant et maintenant à l'environnement.

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 principaux champs d'investigation portent sur les télécommunications optiques, le traitement tout optique de l'information, les nouvelles sources lasers et nouveaux matériaux, la nano-optique, les applications militaires et spatiales et la biophotonique. Les travaux de recherche s'appuient sur des études fondamentales dédiées à des phénomènes non-linéaires et ou quantiques originaux, notamment dans le domaine de l'optique guidée et de la

nano-optique.

Dans le secteur des communications optiques, si la fibre reste le moyen de transport de l'information privilégié, les dispositifs d'extrémités demeurent très souvent électroniques et le tout-optique est l'un des principaux enjeux des recherches actuelles et futures. Ainsi de gros efforts sont déployés visant au développement de fonctions optiques avancées et de micro- et nanodispositifs photoniques innovants, à base de nouveaux matériaux facilitant l'intégration.

Les paragraphes suivants ne dressent pas un panorama exhaustif des études dans ce domaine tellement elles sont nombreuses et variées, mais met plutôt l'accent sur quelques problématiques importantes en terme de pluridisciplinarité et d'applications. On peut y constater la place importante de la nano-optique et celle croissante de l'optique dans les sciences du vivant.

Lasers, optique dans les solides et matériaux pour l'optique

Les challenges laser actuels sont multiples, sources de plus en plus puissantes, rapides, compactes (nanolasers), agiles en longueurs d'ondes, à très faible bruit ou à très haute cadence. Ainsi la course à la plus haute puissance est en route avec le développement de laser 10 PW (projet national ILE) et à plus long terme ELI (100 PW), le projet SOLEIL, le laser Megajoule. En 2009, des lasers produisant jusqu'à 1 PW avec typiquement des durées d'impulsions de 100 fs et des énergies de 10 J sont disponibles pour les utilisateurs. Le développement de sources lasers délivrant des impulsions de plus en plus courtes est un secteur également en pleine effervescence ouvrant la voie à de nouveaux domaines de recherches où des processus électroniques ultra rapides peuvent être sondés avec une résolution temporelle attoseconde (1 as = 10⁻¹⁸ s). Cette échelle de temps est caractéristique des transitions électroniques entre états d'un atome ou d'une molécule en interaction avec un champ extérieur. Une telle résolution temporelle est devenue accessible grâce à la mise au point de nouvelles sources pulsées de rayonnement XUV, basées sur l'émission de rayonnement harmonique par un système quantique soumis à une impulsion pompe d'un laser IR. Une des très excitantes retombées attendues est, in fine, de pouvoir imager en temps réel l'évolution d'une fonction d'onde moléculaire au cours d'une transformation chimique, en atteignant une cadence de prise de vues supérieure à 10¹⁵ images/s. De l'autre côté, des systèmes beaucoup plus compacts sont développés. Ils sont moins énergétiques, mais de plus haute cadence (jusqu'au kHz) et avec des propriétés de faisceaux uniques : stabilisation en phase, durée de quelques cycles optiques (quelques fs), mise en forme temporelle et spatiale.

La réalisation de lasers Raman entièrement fibrés ou de lasers à fibres à base d'ions métalliques ou terres rares pour la conversion de longueur d'onde est un enjeu important qui vise à réaliser des sources lasers pour diverses applications (télécommunications, biomédicales, etc.). Ces recherches ont vu l'émergence de nouvelles activités expérimentales : élaboration et caractérisation de fibres optiques en verre de chalcogénures et développement de micro et nano résonateurs à fibres optiques étirées.

Un fort investissement a été consacré à la mise en place de moyens d'élaboration de fibres à cristal photonique. Les efforts actuels portent sur le développement d'une méthode originale permettant le dopage de verres réalisés par OVD ou MCVD par des ions terres rares ou des ions métalliques.

Parallèlement à ces solutions fibrées, des solutions basées sur des cristaux massifs, particulièrement adaptés aux fonctionnements très énergétiques suscitent toujours un grand intérêt notamment pour des débouchés militaires ou pour la spectroscopie LIBS. De nouveaux lasers plastiques voient également le jour avec l'exploration de matériaux, organiques ou hybrides organiques-inorganiques, et d'architectures laser originales, inspirées des diodes laser inorganiques ou à base de cristaux photoniques, pour réduire le seuil des lasers organiques pompés optiquement et aller ainsi vers le pompage électrique.

L'étude de la propagation de la lumière en milieu aléatoire constitue un axe majeur de recherche avec pour challenge le développement de lasers aléatoires sans cavité, dont l'effet de piégeage des photons est provoqué par de la diffusion multiple.

La spectroscopie femtoseconde constitue un outil majeur en pleine évolution. 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 coeur 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 récent, en pleine évolution, dont les résultats sont très prometteurs. Les méthodes de spectroscopie linéaire comme ultra-rapide s'effectuent principalement en moyenne d'ensemble, sur des échelles spatiales macroscopiques ; elles voient maintenant leur extension vers des mesures effectuées sur des nano-objets uniques, complétant les techniques de micro-luminescence déjà largement répandues.

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. Les nanotubes de carbone monofeuillets mobilisent actuellement d'importants efforts de recherche notamment pour la réalisation de futurs dispositifs électroniques. En fonction de l'angle d'enroulement un nanotube peut être soit métallique soit semiconducteur. Ce lien entre propriétés structurale et électronique fait des nanotubes des candidats fascinants pour l'électronique et la spintronique

moléculaire.

Optique de champ proche, nanooptique, plasmonique et nanoélectronique moléculaire

La compréhension de l'interaction de la lumière avec la matière aux échelles nanométriques est un problème fondamental de la nanooptique et de la nanophotonique. Parmi les grands axes de la nanooptique, on peut citer la plasmonique qui exploite les résonances électroniques entre le champ lumineux et les surfaces des métaux, les cristaux photoniques et les nanosondes optiques utilisées en champ proche optique.

La microscopie en champ proche demeure un domaine très actif et de nouvelles voies de recherche se sont mises en place avec notamment le développement d'actions transversales permettant de concevoir, réaliser et étudier des micro- ou nano-structures innovantes (structures en semi-conducteur, microcavités, cristaux photoniques sur substrat, nanoparticules) permettant d'optimiser l'interaction non-linéaire. Qu'il s'agisse d'effets de confinement ou d'exaltation, les propriétés optiques de nanoparticules métalliques ou semi-conductrices dépendent fortement de leurs tailles, géométrie et environnement. 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. Récemment, de nombreuses avancées ont été réalisées, tant du point de vue conceptuel que de la réalisation et de l'observation de nanostructures optiques originales.

Le contrôle du confinement du champ électromagnétique dans des structures spécifiques a ouvert la voie à des études de forces optiques induites par ces forts confinements de champs électromagnétiques. La mesure des forces induites par un champ électromagnétique localisé dans des cavités à cristaux photoniques par exemple constitue un objectif majeur. Le contrôle de ces forces pourrait être à la base de manipulation de nanoparticules par exemple.

De forts confinements latéraux de la lumière peuvent être également obtenus par étirage de fibre optique. L'étude de guides à section sub-longueur d'onde est un thème en plein développement. Les potentialités applicatives sont multiples : fonctions de traitement tout-optique du signal, interconnexions optiques ultra-compactes, capteurs et lasers miniaturisés. La technologie de fabrication des dispositifs à microfibres est encore balbutiante, et les performances de ces dispositifs seront largement dépendantes du matériau constituant. Si l'emploi de la silice est relativement bien maîtrisé, le développement de microfibres à partir de composés fortement non-linéaires représente un enjeu considérable. Les micro- et nanofibres constituent ainsi une nouvelle plate-forme idéale pour la génération d'effets non-linéaires dans un environnement de forte compacité.

L'étude d'assemblage par champ évanescent de nanocavités optiques sur puce de silicium suscite un grand intérêt. De tels nanosystèmes optiques compatibles avec les technologies silicium de la microélectronique ont un fort potentiel en termes d'applications pour le traitement tout optique de l'information sur puce. Un des enjeux majeurs dans ce domaine réside dans la réalisation de

nanosystèmes pour le ralentissement et le confinement de la lumière.

Les activités de recherches relevant de la dénomination générique de « plasmonique » couvrent en fait des domaines extrêmement variés allant de la biophotonique à l'interconnexion optique. Cet état de fait résulte de l'existence de différents types de modes plasmons. De manière schématique on distingue les modes plasmons localisés supportés par des nanoparticules métalliques des modes plasmons d'interfaces délocalisés qui se développent typiquement à la surface d'un film métallique. Le domaine d'applications privilégié des modes plasmons localisés reste la biophotonique au travers du développement de biocapteurs. De tels biocapteurs exploitent des propriétés spécifiques des modes plasmon localisés tels que la diffusion Raman amplifiée. Notons toutefois que depuis quelques années, l'usage des nanoparticules métalliques dépasse largement le cadre de la simple biodétection pour entrer dans celui de la thérapie. A titre d'exemple, il a été démontré récemment que l'échauffement des nanoparticules métalliques qui sont le siège de modes plasmon localisés peut être utilisé pour détruire in-vivo et spécifiquement des cellules cancéreuses.

Les modes plasmons d'interfaces (délocalisés) présentent aussi un intérêt dans le contexte des biocapteurs, toutefois les applications les plus récentes et disruptives de ces modes concernent le domaine du transfert de l'information à courte distance. Ainsi, la juxtaposition de la technologie silicium et de composants plasmoniques constitue un axe de recherche particulièrement actif pour le développement de composants passifs autorisant le routage de l'information à très haute cadence.

La nanoélectronique moléculaire est un thème interdisciplinaire qui couvre la physique, la chimie et la science des matériaux. L'élément unificateur est le recours à des nanoobjets tels que molécules, nanoparticules, nanotubes, nanofils, agrégats, etc. pour concevoir des fonctions équivalentes à celles des transistors, des diodes, des commutateurs et autres composants utilisés en microélectronique sur silicium. Le concept de l'électronique moléculaire fait l'objet d'une attention croissante depuis plusieurs années en raison de la perspective de réduction de la taille en électronique, grâce au contrôle des propriétés à l'échelle moléculaire. Le développement de fonctions complexes grâce à cette nanoélectronique passe par la compréhension et l'utilisation des propriétés quantiques des nanoobjets, la mise au point de technologies de manipulation collectives (auto-assemblage) et la mise au point de technologies d'interfaçage entre les nanoobjets et le monde macroscopique. L'étude de la cohérence et du contrôle quantiques dans de tels nanoobjets constitue un des enjeux majeurs de la discipline. Les nanomachines moléculaires sont des défis cognitifs porteurs de nombreuses applications.

Optique quantique, optique non-linéaire, optique ultrarapide, dynamique non-linéaire optique et communications optiques

Les états non classiques de la lumière, l'électrodynamique quantique en microcavité, l'optique

non-linéaire en microcavité et autres structures artificielles susceptibles d'en exalter les effets telles que les valves à cristaux liquides, le confinement optique et électronique dans des nanostructures (fils et boîtes quantiques), les solitons de cavité, sous-tendent un vaste ensemble d'effets dont les retombées scientifiques et applicatives, tant pour le traitement quantique de l'information que pour les communications optiques, soulèvent actuellement un grand intérêt. On vise ici à l'élaboration de nouveaux concepts susceptibles de produire des ruptures technologiques à moyen et long terme comme par exemple les sources à photons uniques ou les sources à états intriqués, les fonctions optiques à bruit comprimé, les composants d'émission à haut rendement quantique, les mémoires optiques. Les aspects de dynamique qui éclairent les limites fondamentales de rapidité de dispositifs mettant en œuvre ces concepts sont un volet important de cette thématique.

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 y prendre naissance. 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.

Des recherches récentes ont permis de mettre au jour des phénomènes non-linéaires originaux, comme les similaritons optiques, les ondes scélérates, l'attraction de polarisation ou les solitons incohérents. L'exploitation des solitons dissipatifs pour le traitement tout optique de l'information constitue un axe majeur avec notamment la génération de « molécules solitons » et de « balles de lumière ». Un nouveau domaine original est dédié à l'optique non-linéaire incohérente abordée au niveau théorique par une approche statistique basée sur une formulation thermodynamique hors équilibre (processus de condensation de type Bose-Einstein avec des ondes optiques classiques).

Le domaine des communications par fibres optiques à ultra hauts débits (160 Gbit/s et plus) s'est orienté vers la génération de trains d'impulsions à très haute cadence, la régénération tout optique des impulsions, le développement de nouvelles fonctions tout optiques de traitement du signal (contrôle de la polarisation en particulier), la génération de supercontinums et l'optimisation de nouveaux formats de codage de l'information (CDMA optique). Les solitons et l'optimisation de lignes de transmission à gestion de la dispersion suscitent de nombreuses études.

Biophotonique et neurophotonique, spectroscopie multidimensionnelle et microscopies optiques non-linéaires

La biophotonique est une discipline récente associant optique et photonique à la biologie pour la compréhension des fonctions biologiques et de leurs exploitations à des fins médicales, thérapeutiques et préventives. C'est un domaine transdisciplinaire en forte expansion relevant de la physique (optique, photonique), de la chimie (spectroscopie, chromophores, nanomatériaux),

de la biologie, de la biochimie, de la médecine (ADN, protéines, cellules, tissus, organismes), de l'ingénierie (instrumentation) et de l'éthique.

La bio-photonique connaît depuis plusieurs années une expansion particulièrement impressionnante, tant au niveau des approches physiques employées que des questions biologiques abordées. 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. Celles couramment utilisées sont basées sur l'excitation de fluorescence (intrinsèque ou à l'aide de marqueurs extrinsèques) qu'elles opèrent dans le régime linéaire ou non-linéaire. Des approches qui permettent d'obtenir des résolutions sous la limite de diffraction (champs proche, microscopie 4π , détection de particule unique, illumination structurée...) ont vu le jour récemment, que ce soit pour l'étude de systèmes biomimétiques ou de la matière vivante.

Ces dernières années, la nécessité d'intégrer des fonctionnalités optiques dans des laboratoires sur puce (métrologie au niveau cellulaire), a permis également d'approfondir et d'innover dans le biomédical grâce à la photonique (sources supercontinuum pour la microscopie confocale et pour la spectroscopie résolue en temps de tissus osseux, biocapteurs pour les allergènes, sondes de mesures de fluorescence, tomographie optique, etc.). Actuellement, le thème microfluidique et nanostructures pour la biologie connaît un fort développement.

Le repliement des protéines reste un sujet d'actualité en biophysique, étudié notamment par des techniques de mesure du dichroïsme circulaire résolu en temps qui offrent une alternative originale aux mesures habituelles d'absorption infrarouge. Parmi les autres techniques d'analyse la spectroscopie multidimensionnelle a connu ces dernières années un essor considérable, tout particulièrement dans le domaine infrarouge en raison de son importance pour l'étude de la dynamique vibrationnelle de molécules chimiques ou biologiques.

Un domaine émergent de la biophotonique concerne la neurophotonique. Il s'agit, à travers des systèmes optiques de transillumination, d'étudier un tissu vivant perfusé et mesurer des propriétés ou des variations des propriétés physico-chimiques situées à l'intérieur de ce tissu par des voies optiques. L'utilisation de 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.

La microscopie optique non-linéaire s'est aujourd'hui établie comme la méthode de référence pour l'observation tridimensionnelle de tissus biologiques intacts. Récemment, l'utilisation de signaux non-linéaires endogènes basés sur la fluorescence, la génération d'harmoniques (dans des nanocristaux par exemple), ou le mélange de fréquences (CARS notamment), a permis d'observer les tissus avec ou sans marquage exogène. L'analyse de l'origine physique de ces signaux a permis d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation comme l'observation tridimensionnelle dynamique de la morphogenèse embryonnaire,

l'imagerie de la matrice extracellulaire collagénique, de l'accumulation de lipides ou d'eau dans les tissus, ou de la microstructure de milieux fortement organisés comme la cornée oculaire. D'un point de vue méthodologique, des avancées technologiques importantes ont été effectuées comme l'application du contrôle cohérent en microscopie non-linéaire pour exciter sélectivement une molécule, l'introduction de l'optique adaptative pour améliorer la qualité d'imagerie en profondeur, et le développement de nouveaux imageurs fonctionnant dans la gamme TeraHertz. Le domaine de suivi de biomolécules uniques connaît un grand essor avec le développement de techniques d'observation d'un très grand nombre de molécules uniques (microscopie dite de super-résolution). Par ailleurs, de nouvelles sondes fluorescentes sensibles à l'environnement cellulaire (pH, concentrations ioniques) ont vu le jour et connaîtront sans doute à l'avenir un fort développement, notamment par l'emploi de nanoparticules dopées avec des terres rares ou des nanocristaux semiconducteurs. Ces nouveaux outils optiques ultrasensibles permettent la détection d'objets à l'échelle individuelle et sont utilisés pour l'analyse de processus biologiques, tel que les interactions ADN-protéines ou le mouvement de protéines membranaires et de moteurs moléculaires en cellules vivantes.

2.5 PLASMAS CHAUDS : VERS LA PRODUCTION D'ENERGIE PAR FUSION CONTROLÉE

Les dernières années ont vu l'attribution régulière de postes de recherche sur la thématique des plasmas chauds magnétisés aussi bien au CNRS que dans les universités. Cette tendance positive doit être maintenue et participe de l'engagement du CNRS dans la recherche sur les énergies non-carbonées. Dans le contexte international, la décision de construire ITER à Cadarache implique fortement la France pour assurer le succès de cette entreprise. Les nombreux développements du projet dans cette phase initiale soulignent l'importance de développer la recherche fondamentale associée dans tous les domaines de la connaissance, technologique, expérimentale et théorique. Combiné à l'aspect pluridisciplinaire, le programme de fusion par confinement magnétique s'inscrit ainsi clairement dans les missions du CNRS. La communauté scientifique nationale associée sur cette thématique de recherche, CEA, CNRS, INRIA, université s'est structurée au niveau national autour du Master Fusion et de la Fédération de Recherche Nationale sur la Fusion par Confinement Magnétique. Cette dernière constitue la meilleure structure existante pour permettre à la France d'atteindre ses objectifs scientifiques vis-à-vis d'ITER. L'évolution de cette structure notamment par le développement d'un financement national est nécessaire. Les investissements doivent s'orienter selon trois directions, le support aux « petits » dispositifs expérimentaux qui trouvent leur place dans les universités, le support à des diagnostics développés par le CNRS sur les dispositifs expérimentaux lourds comme Tore Supra (CEA Cadarache), JET (Euratom, Culham), voire d'autres dispositifs en Europe, le développement de calculateurs intermédiaires permettant aux équipes de modélisation de préparer les calculs en vue de l'utilisation

des supercalculateurs (High Performance Computers ou HPC). Dans le domaine des petites expériences une réflexion sur le besoin et la mutualisation des compétences des organismes impliqués dans la fusion par confinement magnétique doit déboucher sur une meilleure complémentarité et une plus grande pertinence de ces dispositifs. La participation aux expériences sur les grands tokamaks par la mise en œuvre de diagnostics par les équipes du CNRS est un point de passage pour la visibilité de l'établissement aussi bien au plan national qu'international. Une réflexion pour implanter une équipe CNRS au côté du CEA sur le site d'ITER doit être engagée et devrait donner un maximum d'efficacité à la France dans l'accompagnement d'ITER. La participation à la mise en œuvre de calculateurs intermédiaires est une nécessité qui dépasse le cadre de la fusion et vise à accompagner une mutation dans l'étude des systèmes complexes par les simulations numériques. Enfin, l'organisation très flexible du CNRS peut lui permettre de jouer un rôle actif dans le développement des collaborations internationales, en Europe et avec les partenaires d'ITER (Chine, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Japon, Russie) d'une part, mais surtout avec les pays en dehors du cadre d'ITER, le meilleur exemple étant le Brésil. En conclusion, la part croissante du CNRS dans la recherche sur la fusion magnétique contrôlée doit s'accompagner d'une politique d'investissement et d'une participation croissante non seulement dans la recherche mais aussi dans l'orientation de la recherche pour permettre à la France de répondre au défi d'ITER dans le cadre d'une collaboration internationale sur les énergies non carbonées.

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 : la fusion par confinement magnétique (FCM - tokamak) et la fusion par confinement inertiel (FCI - laser), et deux TGE (très grands équipements), 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 développé pour la filière FCM 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, etc. 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. Dans chacune des filières, l'émergence de grands équipements orientent la recherche vers une plus grande intégration des connaissances en privilégiant des approches globales et/ou multi-échelles

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, la montée en puissance d'ITER orientera la recherche sur les plasmas chauds vers une plus grande intégration portée par une approche globale et une prise en compte plus fine de la dynamique des électrons. Le couplage au plasma de la puissance radiofréquence injectée par des antennes est aussi essentiel pour réaliser les conditions nécessaires aux réactions de fusion. 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, etc.) ; l'analyse du comportement des éléments de première paroi sous irradiation (érosion, rétention du tritium, tenue des matériaux, etc. pour des flux intenses de particules chargées et de neutrons). À la différence des sujets propres au plasma où l'effort doit s'orienter vers une description globale, la physique de la paroi s'inscrit dans une approche multi-échelles.

Filière inertielle

La fusion par confinement inertiel connaît également des progrès importants avec la mise en service du laser américain NIF (National Ignition Facility), et la poursuite de la construction du laser LMJ près de Bordeaux, qui devrait être opérationnel en 2015. La première démonstration de production d'énergie par fusion inertielle avec un gain supérieur à 10 est attendue vers 2012 sur le NIF, ce qui marquera un jalon historique dans cette approche. En parallèle avec la démarche du NIF centrée sur l'attaque indirecte, de nouveaux schémas d'allumage en attaque directe sont largement étudiés : l'allumage « rapide », assisté par un laser pétawatt, et l'allumage par choc, avec des enjeux scientifiques importants, comme le contrôle en énergie des faisceaux d'électrons créés par laser pétawatt, et surtout les modalités de propagation du laser dans un plasma préformé. Ces approches requièrent un grand

nombre d'études préalables de physique fondamentale sur l'accélération et le transport de particules rapides (électrons, protons, ions...), les instabilités hydrodynamiques ou de faisceaux, les plasmas chauds et denses magnétisés...

Une collaboration à l'échelle européenne, le projet HiPER, vise ainsi à démontrer la capacité de la fusion inertielle pour la production d'énergie à l'échelle industrielle. Ce programme européen est d'abord un formidable défi de technologie laser, essentiellement sur le pompage par diodes. C'est aussi un défi pour la physique de la fusion inertielle, qui doit tout d'abord s'appuyer sur les capacités expérimentales du laser MégaJoule et du laser pétawatt PETAL associé ; mais aussi sur un réseau européen d'installations laser de plus petite taille, mieux adaptées à la recherche de par leur souplesse et leur disponibilité de temps de faisceau.

Ces installations doivent comprendre des systèmes dans une gamme énergétique de une à quelques centaines de joules, des installations de gamme kilojoule comme LULI2000 et enfin, une installation dans la gamme de 10 kJ serait indispensable à l'échelle européenne, à l'instar du système Omega à Rochester.

États extrêmes de la matière

Les éclaircissements et les puissances atteints ces dernières années par les lasers de haute intensité, soit seuls soit couplés à un laser de haute énergie, ouvrent la porte à l'étude de nouveaux phénomènes physiques, souvent aux interfaces entre domaines. Le paysage français sera dominé par deux grands instruments en cours de construction, qui devraient être opérationnels vers 2015 : le laser Pétawatt PETAL à Bordeaux, et le laser de haute puissance APOLLON sur le plateau de Saclay, accompagnés d'un réseau de lasers de haute intensité à l'échelle nationale. Grâce à l'ensemble de ces systèmes de pointe, des progrès importants dans plusieurs domaines liés à l'interaction laser-matière à haute intensité ont été récemment obtenus, ou sont attendus prochainement.

Ainsi, l'accélération de particules par laser en milieu plasma est un sujet en plein essor. Il est aujourd'hui possible de produire par accélération laser des paquets d'électrons stables, accordables en énergie, en charge, et en dispersion en énergie jusqu'à un niveau d'environ 1%. Une application phare de ces électrons accélérés par laser serait le développement d'un laser à électrons libres compact à courte longueur d'onde, par couplage avec un onduleur.

L'accélération de protons et d'ions par laser est également très étudiée ; la compréhension de l'accélération et du transport de ces particules chargées dans un milieu hétérogène peut alors donner lieu à des applications interdisciplinaires, en chimie, biologie ou médecine.

Plus généralement, les rayonnements particuliers et électromagnétiques issus de l'interaction, des THz aux X durs, sont généralement très brefs et apparaissent comme des outils uniques pour sonder la dynamique ultrarapide de la matière. Citons l'utilisation de la protographie pour mesurer les champs électriques ou magnétiques de plasmas ; les nouvelles possibilités d'absorption X près des seuils résolue en temps pour sonder l'évolution d'un ordre local ; les études de la dynamique des constituants internes des atomes avec une résolution femtoseconde ; le contrôle de l'excitation de molécules et de réactions

chimiques et la création de hautes densités d'excitations électroniques dans des diélectriques. La résolution la plus extrême correspond au domaine en plein essor de la physique attoseconde, grâce à des techniques de plus en plus évoluées pour contrôler le champ électrique d'un laser à l'échelle d'un seul cycle optique, ou permettant d'utiliser le phénomène même de génération d'harmoniques élevées comme sonde tomographique d'orbitales moléculaires.

Les impulsions laser à ultra-haute intensité et fortement focalisées mènent à des éclaircissements ultra-relativistes ; des phénomènes exotiques de physique sont alors prédits, par exemple en électrodynamique non-linéaire. Ces phénomènes relativistes devraient prochainement mener à l'apparition de nouvelles sources de rayonnements de très courte longueur d'onde. Une possibilité nouvelle est d'utiliser les lasers à électrons libres X (European XFEL, LCLS) comme lasers intenses de très courte longueur d'onde, susceptibles de créer des phénomènes complètement nouveaux, des atomes aux plasmas.

Enfin, le couplage entre hautes intensités et physique à haute densité d'énergie ouvre aussi des champs de recherches majeurs, comme l'étude de la matière dense et tiède, l'étude des conditions prévalant au cœur des planètes et des étoiles ou la physique nucléaire dans les plasmas laser.