

# 04

---

## ATOMES ET MOLÉCULES – OPTIQUE ET LASERS – PLASMAS CHAUDS

Pierre GLORIEUX  
*Président*

Izo Abram  
Hubert Berger  
François Biraben  
Christophe Blondel  
Marcel Chapuis  
Alain Fort  
Dolorès Gauyacq  
Denis Gindre  
Bertrand Girard  
Sylvie Jacquemot  
Manuel Joffre  
Jean-Marc l’Hermite  
Emily Lamour  
Jacques Maurelli  
Patrick Mora  
Joël Plantard  
Fernand Spiegelman  
Pascal Sznitgiser  
Christoph Westbrook  
Jean-Pierre Wolf

Ce rapport présente les grands axes de l’activité dans le domaine de la section 04 et en précise le champ thématique et les objectifs.

- Champ thématique : lumière et matière. La production de la lumière, son contrôle et son utilisation sous toutes ses formes ; la matière, partant du photon, de l’atome, de la molécule unique pour aller jusqu’aux agrégats, grains, biomolécules et à la physique des plasmas chauds.

- Les objectifs :

- ouvrir des champs thématiques nouveaux dans les sciences de la matière ;

- questionner les lois fondamentales de la matière, de la lumière et de leurs interactions : métrologie, tests de relativité, ralentissement de la lumière, intrication quantique, condensats ;

- décrire les propriétés microscopiques et contrôler des systèmes atomiques et moléculaires de complexité croissante ;

- explorer les limites des états de la lumière et de la matière en interaction et leur faire effectuer des opérations plus ou moins complexes en explicitant les lois qui les régissent ;

- produire, contrôler, mettre en œuvre la lumière sous toutes ses formes ;

- assurer le lien entre les techniques et méthodes fondamentales ainsi que leurs applications dans d’autres sciences.

# 1 – OUVRIR DES CHAMPS THÉMATIQUES NOUVEAUX DANS LES SCIENCES DE LA MATIÈRE

*Au cœur de la discipline, des concepts nouveaux apparaissent, issus de la recherche fondamentale, et engendrent des idées d'applications que la simple extrapolation des techniques existantes n'aurait même pas permis d'imaginer. Ainsi l'idée de calcul quantique est elle le fruit de décennies de développement du contrôle d'atomes et de systèmes « à deux niveaux », dont beaucoup pensaient qu'ils resteraient à jamais des systèmes d'école. Ainsi l'optique fait-elle brusquement irruption dans le domaine des techniques d'accélération de particules chargées, parce que la focalisation de faisceaux laser permet d'atteindre des champs électriques instantanés qui rivalisent avec ceux des grands accélérateurs. Ainsi le refroidissement des atomes par laser, longtemps discipline particulière d'atomistes en mal de records, a-t-il finalement débouché sur la production de condensats de Bose-Einstein qui sont beaucoup plus près d'un système statistique idéal que les exemples historiques de l'hélium superfluide et des supraconducteurs. Ainsi encore l'optique non-linéaire nous renvoie-t-elle une solution inédite d'analyse des signaux de radio-fréquence.*

## 1.1 INFORMATION QUANTIQUE

Plusieurs décennies d'affinement des procédés de contrôle des états atomiques par la lumière ont débouché ces dernières années sur la possibilité de production de superpositions d'états quantiques qui dépassent le simple stade d'objets virtuels ou extrêmement transitoires et atteignent des durées de vie qui permettent d'envisager leur transport. Mieux encore : la possibilité de fabriquer de l'intrication, c'est-à-dire une cohérence entre états produits de systèmes couplés non réductible à une cohérence de l'un

ou l'autre système élémentaire, ouvre la voie au calcul quantique.

Dans ce type de calcul continûment parallèle, on exploite le fait qu'un bit quantique ou « qubit » peut être placé dans n'importe quel état de combinaison vectorielle du 0 et du 1 habituellement exclusifs. Les gains en temps de calcul espérés issus de l'algorithmique nouvelle que cette propriété permet de développer sont, mieux que de simples gains de vitesse, des gains sur les lois d'échelle elles-mêmes qui donnent le temps nécessaire aux opérations.

L'existence, en mécanique quantique, de grandeurs physiques incompatibles (qui ne peuvent pas être mesurées simultanément) a également engendré le concept de cryptographie quantique, où l'information est protégée par le fait qu'un éventuel espion sera forcément trahi par le choix qu'il fait de la grandeur qu'il mesure. La lumière se prêtant bien à la fois à ce type d'encryption (soit sur son degré de liberté de polarisation, soit sur les amplitudes en quadrature de son champ électrique) et au transport de l'information, le concept est déjà passé au catalogue de jeunes pousses industrielles.

## 1.2 PRODUCTION DE PARTICULES DE GRANDE ÉNERGIE PAR LASER

L'interaction des faisceaux lasers ultra-intenses de la dernière génération avec les plasmas ouvre des perspectives nouvelles pour la production de particules de haute énergie. Aux intensités atteintes, les électrons soumis à la fois au champ électromagnétique de l'onde laser et aux champs engendrés dans le plasma traversé acquièrent des énergies qui peuvent dépasser 100 MeV. Divers processus collectifs ou binaires (collisions) redistribuent cette énergie sur d'autres particules, ions ou photons X et gamma, susceptibles d'interagir à leur tour avec la matière. Ces sources secondaires de particules de haute énergie gardent en général la propriété d'être ultra-courtes,

comme l'impulsion laser initiale. Les photons gamma collectés ont une énergie suffisante pour pouvoir déclencher des réactions photo-nucléaires dans des matériaux appropriés, et produire des isotopes radioactifs, en particulier des émetteurs de positons. De multiples applications ont été avancées pour tous ces sous-produits de l'interaction laser-plasma à très haute intensité : accélération de particules chargées, allumage rapide des cibles de fusion inertielle, radiographie ultra-rapide, diffraction ultra-rapide, protonthérapie, etc.

### **1.3 LASERS À ATOMES ET ONDES DE MATIÈRE**

L'état extrêmement ordonné que constitue le champ d'un laser peut être utilisé pour créer de l'ordre dans la matière, en particulier – cela ne constitue donc pas un paradoxe – pour refroidir des vapeurs atomiques. Après plusieurs étapes-clés dans la mise au point des processus de refroidissement (dépassement de la limite du refroidissement utilisant l'effet Doppler puis de la limite liée au recul provoqué par l'absorption d'un photon), c'est finalement en faisant intervenir en dernier ressort une phase de refroidissement par évaporation contrôlée que les atomiciens ont observé la condensation de Bose-Einstein en 1995.

Dans l'élan de cette découverte, la dernière décennie a vu une véritable explosion de l'intérêt porté aux gaz quantiques dégénérés (gaz dans lesquels la longueur d'onde de de Broglie des particules est comparable à leur séparation). Ces gaz sont à la fois très dilués – leur densité correspond à un bon vide primaire ( $10^{-6}$  atmosphère) – et ont un comportement comparable à celui d'un échantillon de matière condensée. Particulièrement intéressantes sont les fortes corrélations entre les particules, qui sont à la base de phénomènes comme la superfluidité, la supraconductivité et les transitions de phase métal-isolant. Les gaz quantiques dégénérés, parce que leur densité et, dans une certaine mesure, les lois d'interaction des particules qui

les composent peuvent être modifiées, ouvrent la voie à une nouvelle recherche expérimentale sur la transition vers les phénomènes quantiques macroscopiques et les phénomènes quantiques collectifs.

À partir de condensats de Bose-Einstein gazeux, plusieurs équipes ont déjà, par une fuite contrôlée hors du piège, produit des faisceaux analogues, pour l'onde de matière atomique, à ce qu'est le laser pour le champ lumineux. L'utilisation de ces « lasers à atomes » – faisceaux de matière de grande longueur de cohérence – pour l'optique et l'interférométrie atomiques est maintenant à l'ordre du jour et constituerait un bond en avant de même nature que l'introduction du laser en optique il y a 40 ans.

### **1.4 ANALYSE OPTIQUE DES SIGNAUX RF**

L'étude des signaux non-linéaires d'interaction transitoire entre lumière et atomes libres d'abord, lumière et chromophores en matrices solides ensuite, a abouti à la mise au point de systèmes pouvant enregistrer en parallèle, sur une grande largeur spectrale (des dizaines de GHz) des hologrammes spectralement sélectifs (sub-MHz) et indépendants quant à l'angle de diffusion qu'ils imposent au rayonnement incident. Ces systèmes ouvrent la possibilité, moyennant la modulation d'une porteuse optique par un signal radio-fréquence, d'analyser ce signal en fréquence avec la rapidité et la puissance de traitement parallèle caractéristiques du traitement optique de l'information. La nouveauté ici est de faire servir l'optique à l'analyse du signal RF et non l'inverse. Cette nouvelle méthode de spectroscopie RF peut s'appliquer non seulement à la détection des radars, mais également à la radioastronomie et à l'observation de la Terre.

## 2 – QUESTIONNER LES LOIS FONDAMENTALES DE LA MATIÈRE, DE LA LUMIÈRE ET DE LEURS INTERACTIONS

*La physique atomique étudie des systèmes simples et bien contrôlés. Cela permet d'une part des expériences de grande précision pour tester les lois fondamentales et, d'autre part, d'étudier et de comprendre les mécanismes les plus subtils de la mécanique quantique. Dans ces domaines, les progrès les plus récents concernent la métrologie temps-fréquence, les tests des interactions fondamentales sur des systèmes simples et l'étude des limites de la mécanique quantique.*

### 2.1 LA MÉTROLOGIE TEMPS-FRÉQUENCE ET SES APPLICATIONS FONDAMENTALES

Dans le domaine micro-onde, l'une des principales applications des atomes froids est le développement des horloges à fontaine atomique. Ces horloges, qui permettent des temps d'interaction atomes micro-onde de l'ordre de la seconde, ont maintenant atteint une exactitude meilleure que  $10^{-15}$ , et les projets spatiaux (horloge PHARAO et programme ACES) devraient permettre de gagner encore un ordre de grandeur, voire plus. De nombreux groupes travaillent aussi pour développer des horloges dans le domaine optique, ce qui permettra à terme de gagner encore plusieurs ordres de grandeur. Deux voies sont suivies : d'une part celle de l'ion unique piégé, qui présente l'avantage d'un environnement bien contrôlé mais l'inconvénient d'un faible rapport signal à bruit, et d'autre part celle des atomes froids, pour laquelle le signal à bruit est bien meilleur mais l'environnement beaucoup plus perturbé à cause des collisions entre atomes. Les meilleures performances ont été obtenues

avec un ion  $\text{Hg}^+$  piégé (USA, observation d'une transition UV avec un facteur de qualité de  $1,6 \times 10^{14}$ ) et, par interférométrie atomique avec la raie d'intercombinaison du calcium (USA, Allemagne). À l'avenir, l'utilisation d'atomes froids placés dans un réseau optique devrait permettre d'avoir à la fois un environnement bien contrôlé et un très bon rapport signal à bruit.

Les fréquences optiques étant plus grandes que les fréquences micro-onde de quatre à cinq ordres de grandeur, leur mesure par rapport à l'horloge à césium était jusqu'à ces dernières années très difficile. Cette mesure ne pouvait se faire qu'à l'aide de chaînes de multiplication de fréquences qui étaient des dispositifs très lourds à mettre en œuvre. Ce domaine est désormais totalement renouvelé grâce à l'utilisation des peignes de fréquences engendrés par les lasers femtoseconde. Le principe est d'élargir le spectre d'un laser femtoseconde à l'aide d'une fibre à cristal photonique, de façon à couvrir une octave. Ces systèmes ont permis de mesurer un grand nombre de fréquences de référence avec des incertitudes de l'ordre de  $10^{-13}$  à  $10^{-14}$ .

Appliquée aux systèmes simples (hydrogène, hélium, atomes exotiques), la métrologie temps-fréquence doit permettre d'atteindre un nouveau degré de précision dans la vérification de la symétrie matière-antimatière. La très haute résolution en physique moléculaire pourrait de son côté aboutir à l'observation de la violation de parité dans des molécules chirales. La comparaison d'horloges utilisant des atomes différents, ou fonctionnant dans des domaines spectraux éloignés (visible et micro-onde) constitue également un enjeu important. Ces mesures pourraient en effet détecter une éventuelle variation temporelle de la constante de structure fine, ce qui constituerait une découverte majeure. Enfin, l'existence d'étaçons de temps ultra-stables ouvre la perspective de tests très sensibles des propriétés de l'espace-temps, comme l'isotropie de la propagation de la lumière et les effets liés aux forces gravitationnelles (retard dû au champ de gravitation d'une étoile – effet Shapiro – ou effet d'entraînement dû à une masse en rotation – effet Lense-Thirring –).

## 2.2 OUVERTURE VERS LA PHYSIQUE DES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Les mesures de physique atomique sont de nos jours capables d'atteindre des précisions extraordinaires. Il s'agit d'un champ de recherche très actif. Parmi les résultats les plus récents, on peut citer les mesures faites à l'aide d'ions piégés (mesure des rapports de masses atomiques avec une incertitude de l'ordre de  $10^{-10}$ , mesure du facteur de Landé d'ions hydrogénoïdes) et la mesure du moment magnétique anormal du muon à Brookhaven. À l'interface avec la physique nucléaire et la physique des particules, l'étude des atomes exotiques devrait permettre d'obtenir des informations sur le noyau (mesure de la distribution de charge du proton par spectroscopie de l'hydrogène muonique) ou sur les corrections dues aux interactions fortes (mesure à basse énergie des longueurs de diffusion proton-pion).

L'une des principales applications de ce champ de recherche est la détermination encore plus précise de constantes fondamentales de la physique. On peut citer la détermination de la constante de Rydberg avec une incertitude meilleure que  $10^{-11}$  qui a entraîné une amélioration notable des tests d'électrodynamique quantique (déplacement de Lamb de l'hydrogène et de l'hélium). Dans ce domaine, la détermination de la constante de structure fine  $\alpha$  reste un enjeu fondamental. En effet, les valeurs obtenues dans divers domaines de la physique ne sont en accord qu'à  $10^{-7}$  près, ce qui est très insuffisant pour tester le modèle standard à partir des mesures du moment magnétique anormal de l'électron et du muon. L'une des voies possibles est la mesure du rapport  $h/M$ , rapport entre la constante de Planck et la masse d'un atome et qui devrait permettre une détermination indépendante de  $\alpha$  avec une incertitude meilleure que  $10^{-8}$ .

Dans le domaine de la gravitation, notre communauté est fortement impliquée dans la recherche des ondes gravitationnelles avec

l'interféromètre VIRGO, d'une part pour la mise en œuvre des méthodes optiques les plus sensibles, et d'autre part, pour la compréhension de la limite quantique fondamentale liée au couplage opto-mécanique entre la lumière et les miroirs de l'interféromètre.

## 2.3 COMPRENDRE LES LIMITES DU MONDE QUANTIQUE

Le nouveau domaine de l'information quantique est basé sur la manipulation des états intriqués. Ces états sont connus pour être assez fragiles. Une question importante est donc de comprendre les mécanismes de perte (ou de décohérence) de ces états. La décohérence est le phénomène qui gouverne et explique la transition entre le monde quantique, dans lequel n'importe quelle superposition d'états est possible, et le monde classique, dans lequel un grand nombre de ces possibilités (comme une superposition correspondant au fameux chat de Schrödinger) ne sont jamais observées. La décohérence et les stratégies pour la contourner sont actuellement des sujets de recherche expérimentale.

Sur le plan fondamental, la question de l'origine de la décohérence ramène à la relation entre le monde quantique et la gravitation, puisque la diffusion des ondes gravitationnelles a été identifiée comme le principal mécanisme de décohérence responsable, à l'extrême, du caractère classique du mouvement des planètes. L'observation de la transition vers cette décohérence gravitationnelle, négligeable sur les objets nanoscopiques, est un des défis actuellement posés à la physique des interféromètres à ondes de matière. (*Voir* § 1 « Ouvrir des champs thématiques nouveaux dans les sciences de la matière. »)

Les effets de cohérence quantique ouvrent aussi de nouvelles perspectives dans la manipulation de l'interaction entre la lumière et la matière. Par exemple, la transparence d'un milieu absorbant pour un premier faisceau

laser peut être contrôlée par un deuxième faisceau qui couple de manière cohérente certains états du milieu, ce qui produit des phénomènes d'interférence qui annulent l'absorption dans une bande étroite de longueurs d'onde. À ce phénomène est associée une variation abrupte de l'indice de réfraction, ce qui a comme conséquence la réduction de la vitesse de groupe (vitesse à laquelle se propage une impulsion courte) à quelques mètres par seconde, c'est-à-dire à 100 millions de fois moins que la vitesse de la lumière dans le vide. Ce ralentissement extrême de la lumière pourrait permettre l'observation de nouveaux phénomènes (par exemple en optique non linéaire) qui nécessiteraient des intensités lumineuses très importantes si la lumière n'était pas ralentie, et pourrait avoir des applications dans des domaines aussi variés que l'imagerie ou les télécommunications.

### **3 – DÉCRIRE LES PROPRIÉTÉS MICROSCOPIQUES ET CONTRÔLER DES SYSTÈMES ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES DE COMPLEXITÉ CROISSANTE**

*La physique moléculaire, axe important de la section 04, y trouve sa place à cause de sa nature essentiellement fondamentale mais aussi en raison de son ouverture vers l'environnement (notre atmosphère terrestre en constitue le premier laboratoire), vers l'astrochimie, la chimie du vivant et les nanosciences. Le développement de sources laser à impulsions ultra-brèves et la construction prochaine d'une source de rayonnement synchrotron de troisième génération (SOLEIL) ouvrent de nouvelles perspectives. À côté de la spectroscopie à haute résolution, révélatrice de la structure moléculaire, se développe une spectroscopie résolue dans le temps qui, elle, 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 en exploitant les propriétés de très forte cohérence des impulsions ultracourtes.*

#### **3.1 DES ÉDIFICES ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES DE PLUS EN PLUS COMPLEXES**

La spectroscopie fondamentale constitue un des savoir-faire de base qui doit être poursuivi. Le développement de modèles théoriques pour décrire les mouvements intra- ou inter-moléculaires (molécules non rigides) est mené en parallèle avec l'analyse de spectres à moyenne ou haute résolution, sélectionnés soit pour leur intérêt théorique soit pour leur importance astrophysique ou atmosphérique (Voir § 6), dans une gamme spectrale s'étendant du THz à l'XUV. Des expériences de laboratoire, tout en continuant à chercher à reproduire des espèces moléculaires présentes dans l'environnement atmosphérique ou inter-stellaire, s'orientent vers les systèmes biologiques. Certaines techniques de diagnostic ont été étendues à l'optique non-linéaire, comme par exemple le dichroïsme circulaire résolu en temps en vue d'étudier la dynamique des changements conformationnels de biomolécules.

Les objets étudiés en physique moléculaire sont de plus en plus complexes, soit par le nombre d'atomes, soit par la variété des forces de cohésion mises en jeu, soit encore par leur degré d'excitation ou d'ionisation. L'étude de ces objets complexes n'est pas seulement un but en soi mais est motivée par l'émergence de nouveaux besoins dans les disciplines voisines (chimie, astrophysique, biologie, nanosciences, etc.) pour une compréhension à l'échelle moléculaire et en particulier quantique des processus observés. Parmi les espèces étudiées figurent des molécules chirales, qui jouent un rôle

fondamental dans la chimie du vivant et dont la discrimination structurale est recherchée par des méthodes de spectroscopie à très haute résolution ainsi que des complexes de van der Waals stabilisés dans des jets supersoniques.

Les agrégats sont des prototypes de systèmes moléculaires complexes. D'un point de vue fondamental, ils permettent, de façon graduelle et maîtrisée, la construction de propriétés intrinsèquement collectives de la matière. La structure, la dynamique et la réactivité de ces nano-objets isolés ou en interaction dépendent de la taille et du confinement. La thermodynamique des systèmes finis constitue une problématique commune aux physiciens des agrégats et aux physiciens des noyaux.

### 3.2 LES ÉTATS EXCITÉS ÉTUDIÉS PAR DES APPROCHES DIVERSIFIÉES

La dynamique des états excités constitue un enjeu tant théorique qu'expérimental. Outre la spectroscopie, elle est souvent associée à la *fragmentation* moléculaire et aux processus réactifs. La relaxation dans un système possédant un grand nombre de degrés de liberté, homogènes ou hétérogènes (agrégats, biomolécules), peut désormais être étudiée. L'utilisation ou la combinaison des techniques laser résolues en temps, d'excitation photonique ou collisionnelle et de détection en multi-coïncidence apportent la perspective d'une description complète de la dynamique. Un des enjeux est de comprendre la part des processus concertés et statistiques. De ce point de vue, l'apparition de techniques de piégeage ouvre désormais l'accès aux temps longs. Le domaine des collisions avec des particules énergétiques implique également la physique des ions multichargés, le contrôle du dépôt d'énergie dans des milieux denses, y compris biologiques, les propriétés en champ fort.

De nombreuses équipes s'intéressent à l'*interaction d'objets* (molécules, agrégats, nanoparticules et nano-objets de basse dimen-

sionnalité) *avec un environnement* (support, solvant, matrice, cages, films minces). La déposition de molécules sur une surface induit des phénomènes spécifiques : nouveaux degrés de liberté, comportements réactifs différents, possibilité de manipuler des objets uniques sur une surface, etc. On cherche actuellement à caractériser, influencer ou contrôler les évolutions dynamiques en surface qui impliquent souvent des états excités transitoires avec différentes approches : impact d'atomes (sonde dynamique et locale des processus d'excitation et de transfert d'énergie), impact d'électrons (spectroscopie par perte d'énergie, réactions induites par excitation ou attachement électronique), excitation par photon (spectroscopie non linéaire, photo-émission, réactions induites par photo-absorption), expériences pompe – sonde dans le domaine femtoseconde, spectroscopie et manipulation avec STM (imagerie, spectroscopie locale, réarrangement en surface par injection d'électrons). Les problématiques abordées concernent les processus électroniques élémentaires, l'influence de l'environnement et du site, les différentes échelles de temps en jeu (durée de vie des transitoires de réaction, en particulier), la possibilité de manipuler à volonté atomes et molécules en surface pour y créer un objet à propriétés spécifiques. Le *contrôle des propriétés* et la *fonctionnalisation de molécules ou de nano-objets adressables individuellement* (molécule unique) posent des défis particulièrement intéressants. Les propriétés d'ensemble (morphologie, organisation, transport vibrationnel et électronique, magnétisme, propriétés optiques) dans les systèmes de basse dimensionnalité, les réseaux supramoléculaires ou à base d'agrégats, constituent un autre enjeu.

### 3.3 LES DESCRIPTIONS QUANTIQUES DES INTERACTIONS MOLÉCULAIRES

Du point de vue théorique, le raffinement des méthodes permet le calcul *ab initio* des surfaces de potentiel et de la dynamique

moléculaire quantique sur les petits systèmes. Ces développements sont liés avec l'étude du chaos classique ou quantique, la modélisation globale des états très excités (théorie du défaut quantique) ainsi que de la dynamique en champ laser intense. Les techniques de *propagation de paquets d'onde* pour les variables électroniques ou (inclusivement) nucléaires sont particulièrement bien adaptées pour suivre au cours du temps l'évolution adiabatique ou non adiabatique de petits systèmes moléculaires, éventuellement en interaction avec une surface. Le *traitement unifié de la structure électronique ab initio et de la dynamique moléculaire* par des méthodes de type « fonctionnelle de la densité » permet désormais d'aborder les « grands systèmes » (agrégats et nano-objets) et l'évolution électronique dans des formalismes dépendant du temps. La paramétrisation des surfaces de potentiel (champs de forces) continue à se développer pour les simulations dynamiques à grande échelle. C'est aussi le cas des approches modèles des états excités, soit pour la dynamique, soit pour l'étude des systèmes fortement corrélés (magnétisme d'agrégats et de systèmes de basse dimensionnalité). La simulation (Monte-Carlo ou dynamique moléculaire) s'avère aussi performante pour résoudre des problèmes difficiles de minimalisation globale de l'énergie ou pour déterminer les grandeurs thermodynamiques. Enfin dans le champ de l'interaction molécule-environnement, des systèmes de basse dimensionnalité ou encore des systèmes organisés, un effort devra être poursuivi vers la modélisation (transport, propriétés collectives, bain thermique, désordre, effets non-linéaires). La diversité des méthodologies nécessite un dialogue avec d'autres communautés, mais un des atouts des équipes de la section 04 est la forte intégration entre les différents niveaux de modélisation et de simulation.

## 4 – EXPLORER LES LIMITES DES ÉTATS DE LA LUMIÈRE ET DE LA MATIÈRE

*La décennie écoulée a vu le développement de nouvelles sources de lumière capables de produire un rayonnement avec des caractéristiques jusque là inatteignables, repoussant ainsi les frontières du faisable vers les hautes fréquences, les basses fréquences, les très courtes durées et les très fortes puissances crête ouvrant la voie à la production de particules.*

### 4.1 VERS LES DURÉES BRÈVES ET LES IMPULSIONS CONTRÔLÉES

Le raccourcissement des impulsions lasers se poursuit d'une manière étonnamment continue pour entrer maintenant dans le domaine des attosecondes ( $10^{-18}$ s). L'extension du domaine spectral utilisé vers les hautes fréquences joue évidemment un rôle-clé dans le raccourcissement des durées. On part d'oscillateurs émettant des impulsions de quelques femtosecondes associés à des amplificateurs fonctionnant à cadence rapide (kHz ou plus) pour engendrer des harmoniques élevées dans des gaz. Dans des conditions précises de contrôle de leur phase, ces impulsions de spectre centré dans l'UV lointain se révèlent être extrêmement brèves. La position relative de la phase et de l'enveloppe est d'autant plus cruciale que l'impulsion ne comporte qu'un ou deux cycles optiques. L'interaction avec les atomes s'avère sensible à cette phase absolue, et constitue un diagnostic essentiel.

### 4.2 DES PUISSANCES TOUJOURS PLUS ÉLEVÉES

Les lasers térawatt sont désormais commerciaux et relativement faciles d'emploi. Tous les lasers intenses reposent maintenant



sur la technique d'amplification d'impulsions à dérive de fréquence et, en majorité, sur l'utilisation du saphir dopé au titane qui permet d'obtenir à la fois des cadences de tir élevées et des durées très brèves. Le domaine du pétawatt ( $10^{15}$  W) apparaît maintenant accessible, si l'on raccourcit encore les impulsions et si on porte leur énergie à quelques dizaines de joules. Seule la technologie des lasers à verre peut fournir des énergies plus élevées. Des projets pétawatt de quelques centaines de joules sont en cours de développement dans des laboratoires universitaires. L'étape ultérieure, la dizaine de kilojoules, exige des installations beaucoup plus importantes, telles que par exemple le laser Mégajoule construit en Aquitaine.

Des méthodes nouvelles couplant dérive de fréquence et amplification paramétrique sont apparues, qui permettent d'espérer réunir à court terme très forte énergie et impulsions très brèves. Les densités de puissance obtenues après focalisation sont gigantesques (quelques  $10^{24-25}$  W/m<sup>2</sup>, bientôt plus), ce qui ouvre la voie à la physique des plasmas relativistes et à de nouveaux concepts, tels que celui de l'allumage rapide des cibles thermonucléaires par fusion inertielle et l'accélération ou même la production de particules par laser (*Voir* § 1).

### 4.3 VERS LES HAUTES FRÉQUENCES

L'interaction laser-plasma à haut flux permet l'élaboration de sources de rayonnement X ou XUV cohérentes (lasers X, génération d'harmoniques élevées, diffusion Compton) ou incohérentes (émission des plasmas chauds). Les progrès accomplis au cours des dernières années s'appuient pour beaucoup sur le développement dans les laboratoires de lasers ultra-brefs et ultra-intenses, qui ont permis de réduire le besoin en énergie laser de pompage des lasers X de quelques centaines à une dizaine de joules. Ont également été construits de nouveaux lasers X dits « OFI » (en régime d'ionisation par effet

de champ), qui fonctionnent dès à présent à une cadence de l'ordre de 1 Hz. Par ailleurs les harmoniques élevées engendrées dans les agrégats commencent à être suffisamment puissantes pour des applications préindustrielles du type lithographie à 13,9 nm.

Un effort important a porté sur l'utilisation des rayons X durs produits par interaction laser femtoseconde-matière pour la mesure par diffraction résolue en temps de la dynamique de changement d'état. Le couplage entre rayonnement synchrotron et lasers intenses permet d'arriver à des résultats similaires de façon très prometteuse. La poursuite des recherches dans les prochaines années et surtout le développement des applications de ces sources XUV très intenses nécessitent des installations spécifiques, dont se sont déjà dotés le Japon, l'Allemagne et les États-Unis. Un projet de construction d'une source laser X est actuellement développé en Île-de-France pour une mise en service prévue en 2005.

### 4.4 ET AUSSI LES « BASSES » FRÉQUENCES

Les progrès dans l'ingénierie des semi-conducteurs ont permis ces dernières années le développement de lasers dits « à cascade quantique » où le contrôle des transitions électroniques à travers la bande de conduction d'un puits quantique permet l'émission de rayonnement dans la gamme du THz. D'autres sources de rayonnement THz font actuellement l'objet de recherches actives, notamment au moyen de lasers bi-fréquence et de lasers femtosecondes. La disponibilité de rayonnement dans cette nouvelle gamme de fréquences, à la frontière entre l'électronique et l'optique, ouvre des perspectives tant pour la physique fondamentale (spectroscopie, physique atomique et moléculaire) que pour la physique appliquée (télécommunications, imagerie biomédicale) et l'astrophysique.

## 4.5 LA FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

La maîtrise de la fusion thermonucléaire est une étape indispensable avant la conception de réacteurs à fusion, qui constituent l'une des clés des problèmes énergétiques du siècle qui commence. Deux grandes voies sont explorées activement, la fusion par confinement magnétique, et la fusion par confinement inertiel. Le CNRS, et en particulier la section 04, a des programmes de recherche dans ces deux voies, en relation avec les programmes du Commissariat à l'énergie atomique et avec les programmes internationaux.

Les grandes machines à confinement magnétique (Tore-Supra à Cadarache ou JET à Oxford) ont un fonctionnement complexe dont la compréhension nécessite diagnostics performants, modélisation, simulations numériques et une certaine dose d'empirisme. En parallèle, des expériences en laboratoire à petite échelle, domaine spécifique du CNRS, permettent à moindre coût la mise au point de diagnostics ou l'exploration de nouveaux concepts. Les principaux efforts concernant la fusion par confinement magnétique portent sur les interactions plasma-paroi, la turbulence et le transport associé (instabilités magnétohydrodynamiques, contrôle du chaos dans les décharges) et la dynamique des populations suprathermiques (particules alpha et ions) en régime thermonucléaire. Les diagnostics optiques (diffusion Thomson, réflectométrie, spectroscopie à haute résolution) sont des outils d'analyse essentiels des plasmas de tokamak. L'actualité est pour le moment liée au sort du projet international ITER, qui devrait mobiliser les efforts dans les 30 années à venir. ITER est prévu pour donner l'accès à un régime de combustion thermonucléaire quasi-continu.

En ce qui concerne la fusion par confinement inertiel, la source d'énergie initiale est constituée par les lasers de puissance. Les principaux défis à relever sont la stabilité de la propagation des faisceaux lasers, en particulier vis-à-vis de la rétrodiffusion ou

de la filamentation, la maîtrise des instabilités hydrodynamiques et de la symétrie de l'implosion des cibles ainsi que leur allumage thermonucléaire. Le programme du laser Mégajoule à Bordeaux couvre ces aspects. L'interaction de lasers intenses avec la matière transformée en plasma est un thème lié à la fusion par confinement inertiel sur lequel le CNRS a porté un effort particulier. Deux types principaux d'installations laser sont utilisés : haute énergie (impulsions nanosecondes) ou haute puissance (impulsions sub-picosecondes). La qualité optique des faisceaux est l'objet d'une grande attention, car leur propagation et l'homogénéité de la tache focale en dépendent largement. Les faisceaux d'ions lourds sont des concurrents potentiels aux faisceaux lasers comme sources d'énergie dans le concept de fusion inertielle, ce qui constitue une motivation pour l'étude du ralentissement des faisceaux d'ions dans la matière.

Les plasmas créés par laser ouvrent également l'accès à des conditions physiques rencontrées dans différents problèmes d'astrophysique (transfert radiatif dans les étoiles, explosion de supernovae, chocs radiatifs) ou de planétologie (détermination d'équations d'état du fer, de l'eau, à très haute pression).

Aussi bien pour la fusion par confinement magnétique que pour la fusion par confinement inertiel, la physique atomique des plasmas chauds et la spectroscopie jouent un rôle déterminant dans les outils de diagnostics (étude des profils de raies des ions multichargés, propriétés radiatives des plasmas, détermination des paramètres physiques du plasma, densité, température, écart à l'équilibre thermodynamique).

Enfin la simulation numérique est un outil complémentaire à l'expérience aussi bien pour les plasmas relativement denses obtenus par interaction laser-matière que pour les plasmas peu denses confinés par champ magnétique : modèles fluides hydrodynamiques ou magnéto-hydrodynamiques, modèles cinétiques ou gyro-cinétiques.

## 5 – PRODUIRE, CONTRÔLER, METTRE EN ŒUVRE LA LUMIÈRE SOUS TOUTES SES FORMES

*La lumière est mise en œuvre de manière de plus en plus performante, que ce soit au niveau de la taille des dispositifs et de la précision nanométrique des diagnostics ou dans la qualité des faisceaux (fluctuations jusqu'au niveau quantique). La maîtrise des techniques et 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 ultra-performants grâce à la multifonctionnalisation.*

### 5.1 MAÎTRISE DES DIMENSIONS NANOMÉTRIQUES

Le couplage des microscopies à pointe inventées au début des années 80 (microscopie tunnel électronique, microscopie optique à champ proche) avec les techniques de microfabrication développées initialement pour la micro-électronique, a conduit au développement de tout un arsenal nouveau en nano-optique. Il permet la miniaturisation en optique intégrée et la modification par voie optique d'objets de taille submicronique et nanométrique. Ceci ouvre la voie à un vaste champ d'investigations en physique, en micro-électronique, en chimie et en biologie.

L'exemple le plus marquant de nouveaux objets de nano-optique est celui des « cristaux photoniques » constitués d'arrangements périodiques de trous submicroniques dans un substrat. De tels arrangements créent des « bandes interdites photoniques » qui interdisent la propagation de la lumière dans certaines directions. Les matériaux ainsi construits peuvent servir de gaine de confinement pour des guides, des fibres ou des cavités optiques et

permettent d'envisager le développement d'une optique guidée sub-longueur d'onde. Le fort confinement de la lumière produit aussi une augmentation importante de son intensité, ce qui favorise les effets d'optique non linéaire et permet, par exemple, la réalisation de doubleurs ou d'additionneurs de fréquences.

Une deuxième voie importante en nano-optique est celle des plasmons de surface qui sont des modes propres électromagnétiques se propageant sur une interface diélectrique-métal. Leur exploitation conduit au développement d'une technologie optique miniaturisée, appelée « plasmonique », dont l'avantage est que la même circuiterie métallique peut transporter des charges électriques et des champs électromagnétiques aux fréquences infrarouges et visibles, ouvrant ainsi la perspective d'intégration de composants optiques miniaturisés 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.

### 5.2 MAÎTRISE DE L'ORGANISATION

Après une vague d'études sur le chaos et la dynamique non linéaire des systèmes optiques où l'on s'intéressait à l'émergence de comportements purement temporels auto-organisés (auto-pulsations, chaos), l'attention s'est portée vers la dynamique spatio-temporelle, correspondant donc aux situations où complexité ou organisation s'établissent à la fois dans le temps et dans l'espace. Les progrès dans la technologie optique (lasers à semiconducteurs à cavité verticale (VCSELs), valves à cristaux liquides) ont élargi les champs d'investigation et rendu possible l'observation de structures spatiales localisées (solitons spatiaux, fronts) ou de motifs auto-organisés (hexagones, carrés) résultant du jeu combiné de la diffraction-diffusion et des

non-linéarités optiques. Les solitons spatiaux, longtemps recherchés et enfin observés dans des VCSELS sont des structures stables, effaçables et adressables optiquement. Ils ouvrent la voie au traitement tout optique de l'information. Tout récemment la filamentation des impulsions femtosecondes dans les matériaux a montré que ces concepts irriguent aussi le domaine des applications. Enfin, cette organisation se manifeste aussi au niveau le plus fondamental avec les images quantiques où ces propriétés spatiales couplées aux effets quantiques ouvrent d'intéressantes perspectives tant du point de vue conceptuel qu'en ce qui concerne les applications potentielles.

### 5.3 MAÎTRISE DES FLUCTUATIONS

Les progrès récents de l'ingénierie ont permis l'élimination d'une grande partie des imperfections techniques des sources lumineuses qui produisent des fluctuations aléatoires de l'intensité, de la phase, ou de la fréquence de la lumière émise. Ceci a déclenché une recherche active en optique fondamentale sur la maîtrise des fluctuations d'origine quantique. La manifestation la plus connue des fluctuations quantiques est l'observation d'une granularité dans le flux d'énergie lumineuse, dite « bruit de grenaille », due à l'existence d'un « quantum d'énergie », le photon. Des stratégies de compression du bruit quantique dans ses différentes manifestations ont été élaborées pour construire, par exemple, des sources (et particulièrement des lasers à semiconducteur) dont la stabilité en intensité est meilleure que celle permise par le bruit de grenaille. L'utilisation de ces sources ouvre la voie à des applications allant des mesures optiques de haute précision et de la métrologie aux communications à faible bruit.

Le contrôle des fluctuations quantiques a conduit également au développement de sources lumineuses capables de produire des trains d'impulsions contenant chacune un et un seul photon. L'utilisation de tels trains

de photons uniques fournit une garantie de sécurité absolue lors du codage de l'information en cryptographie quantique. Les trains de photons indiscernables permettent aussi la réalisation d'états quantiques de la lumière avec un nombre de photons déterminé et peuvent être utilisés pour atteindre une résolution bien inférieure à la longueur d'onde en lithographie optique ainsi que pour réaliser des portes logiques quantiques.

### 5.4 MAÎTRISE DES MATÉRIAUX POUR L'OPTIQUE

Qu'il s'agisse de cristaux photoniques, de couches minces cristallines, de cristaux massifs, de systèmes organiques ou hybrides, la problématique « matériau » reste toujours d'une actualité primordiale car c'est elle qui très souvent est à la source des grandes évolutions de l'optique. Ces dix dernières années ont vu l'arrivée à maturité de cristaux d'oxydes minéraux à propriétés laser ou optiques non linéaires remarquables qui ont permis la conception de générateurs de rayonnement cohérent accordable dans le visible et le proche infra-rouge en régimes impulsions nano-seconde, picoseconde ou femtoseconde. Des progrès ont été réalisés récemment en matière de qualité spectrale et spatiale des faisceaux engendrés. Toutefois des évolutions importantes sont nécessaires : il s'agit d'une part de l'ouverture de nouvelles plages spectrales, dans l'UV jusqu'à 200 nm avec des matériaux luminescents, et dans l'infra-rouge moyen de 4  $\mu\text{m}$  à 12  $\mu\text{m}$  avec des cristaux non linéaires ; d'autre part pour beaucoup d'applications, il est primordial de miniaturiser les sources de rayonnement. Cette miniaturisation peut d'abord être obtenue en considérant des matériaux bi-fonctionnels, qui sont à la fois lasers et non linéaires ; c'est aujourd'hui un domaine en pleine émergence qui nécessite une nouvelle ingénierie tant sur le plan de la chimie que de l'optique. Une autre voie pouvant conduire à la miniaturisation est la réalisation de guides

d'onde à propriétés lasers ou (inclusivement) non linéaires. Tous ces aspects nécessitent un enchaînement pertinent des compétences en cristallographie, en cristallogenèse, en photochimie des polymères et en caractérisation.

## **6 – ASSURER LE LIEN ENTRE LES TECHNIQUES ET MÉTHODES FONDAMENTALES ET LEURS APPLICATIONS DANS D'AUTRES SCIENCES**

*Les interfaces de notre discipline sont très développées et fertiles, tant avec la chimie, l'astrophysique, l'atmosphère, la physique nucléaire qu'avec les sciences de l'information, les nanosciences et la biologie. Ils concernent l'application de résultats scientifiques fondamentaux obtenus à ces domaines connexes, mais aussi l'utilisation des techniques expérimentales innovantes qui ont été développées dans un cadre plus fondamental.*

### **6.1 INTERFÉROMÉTRIE ATOMIQUE**

Dans le domaine de l'optique atomique, il a déjà été démontré que les ondes de matière sont très sensibles aux effets inertiels (rotation, accélération et gravité). Les capteurs inertiels basés sur l'interférométrie atomique sont donc très prometteurs. Le développement de gyromètres à atomes froids est déjà en cours en France. Un condensat de Bose-Einstein, dont les propriétés de cohérence approchent celles d'un laser, semble un atout supplémentaire pour la réalisation des interféromètres à atomes. De plus, des progrès impressionnants dans la simplification des dispositifs et des

procédures ont été réalisés. L'introduction de la « puce à atomes » a notamment suscité beaucoup d'intérêt dans le monde. Avec ces puces, le condensat est créé avec une structure de fils électriques sous vide de quelques  $\text{cm}^2$ . La dissipation électrique et l'exigence sur la qualité du vide sont fortement réduites. En utilisant le savoir faire acquis dans le développement des horloges atomiques portables (projet PHARAO) en matière de miniaturisation d'un dispositif laser, on peut espérer construire des gyromètres à ondes atomiques embarquables sur avion.

### **6.2 CHIMIE ET RÉACTIVITÉ**

Il est désormais possible de suivre le processus chimique élémentaire (transfert d'électron, de proton ou d'atome H) à l'échelle picoseconde ou femtoseconde au cours d'une réaction photochimique, par exemple lors de l'irradiation d'une molécule biologique (acide aminé, base de l'ADN). La *femtochimie* permet aussi de détecter les mouvements autour d'un état de transition (intermédiaire de réaction) et d'accéder à différentes régions parcourues par la réaction en fonction du temps. Elle s'appuie sur des techniques sophistiquées d'imagerie de vitesse (électrons, ions) qui permettent de caractériser en temps réel la nature des états électroniques visités et en particulier les transitions non-radiatives entre différents états électroniques.

### **6.3 CONTRÔLE COHÉRENT**

L'idée d'utiliser les très fortes propriétés de cohérence des lasers pour « déposer de l'énergie » de façon idéale ou optimale dans une molécule de façon à la conduire à se fragmenter ou à réagir chimiquement de manière choisie par l'expérimentateur est apparue dans

le milieu des années 80. De nombreux schémas basés sur des mécanismes d'interférences quantiques entre chemins d'excitation ont été proposés, explorés et démontrés.

Le « contrôle optimal » associe une impulsion ultracourte à un système de mise en forme d'impulsions et un algorithme d'optimisation. L'idée générale est d'optimiser la forme de l'impulsion en fonction de l'objectif à atteindre. L'efficacité de chaque impulsion est mesurée « en temps réel » et le résultat est utilisé directement par l'algorithme d'optimisation. La faisabilité de ce principe général a été démontrée dans de nombreux systèmes, des plus simples (physique atomique et moléculaire, boîtes quantiques) aux plus complexes (phase liquide, milieux biologiques). Cette approche peut n'être utilisée que comme une boîte noire, dans le cas où l'application prime. Il s'avère que l'analyse de la forme d'impulsion optimisée permet de plus en plus souvent de remonter à une compréhension détaillée du mécanisme photo-induit et de la dynamique mis en jeu.

Les efforts doivent encore porter sur les aspects algorithmiques (dans une approche pluridisciplinaire), tout comme sur les méthodes de mise en forme d'impulsions. Ils peuvent bénéficier, au-delà de la femtochimie, à tous les processus non-linéaires, tels ceux intervenant dans la physique des lasers intenses et ultra-intenses (plasmas, génération de rayonnement attosecondes et de très courte longueur d'onde) pour lesquels l'impulsion la plus courte et la plus régulière est loin d'être optimale.

## 6.4 INTERFACE ASTROPHYSIQUE

Un fort couplage avec l'astrophysique a lieu aussi bien en amont, par des expériences de laboratoire ou des calculs simulant les conditions physiques des milieux astrophysiques, qu'en aval par l'interprétation des mesures spatiales. Les programmes nationaux de l'INSUE (PN-PCMI, PNP) permettent la rencontre et la collaboration entre physiciens de laboratoire et astronomes pour une exploitation

optimale des données abondantes enregistrées par les sondes spatiales (satellite ISO, mission FUSE, par exemple). Par ailleurs, l'extension des domaines spectraux vers le domaine THz-infrarouge lointain a fait l'objet d'efforts instrumentaux récents en relation avec la mission spatiale HERSCHEL et les observations sur le grand interféromètre millimétrique ALMA du plateau de l'Atacama, qui ouvriront le ciel en sub-millimétrique à l'horizon 2007, avec un besoin considérable de base de données dans ces régions spectrales (comme les transitions de J élevés dans  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ , la recherche de  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ , et les modes de basse fréquence de gros systèmes).

La spectroscopie et la dynamique de formation et de destruction de ces systèmes carbonés (polyaromatiques hydrogénés, charbon, fullerènes) constituent un intérêt commun à cette interface : *l'astrochimie*. En particulier, la fragmentation des hydrocarbures, accompagnée de la déshydrogénation de ces espèces peut fournir des agrégats ou des chaînes de carbone pur. La réactivité sur les grains carbonés intéresse également les deux communautés et va certainement se développer au niveau théorique comme au niveau expérimental dans les prochaines années. L'étude des systèmes carbonés intéresse également la communauté de la physico-chimie de l'atmosphère, les suies et autres aérosols carbonés jouant un rôle majeur dans les transferts radiatifs et les problèmes de santé publique.

## 6.5 SPECTROSCOPIE ET PHYSICO-CHIMIE ATMOSPHÉRIQUE

Dans le cadre des programmes nationaux de l'INSUE (PNCA) et internationaux (ESA) les molécularistes alimentent les banques de données spectrales à haute résolution. La caractérisation spectrale d'espèces telles que  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  et les radicaux  $\text{NO}_x$  est essentielle pour la validation et l'exploitation des données recueillies par des sondes spatiales.

Le savoir-faire des chercheurs de la section 04 dans le domaine de la réactivité sur les agrégats (théorie et expérience) a ouvert récemment des interactions prometteuses avec la communauté des physiciens de l'atmosphère et celle des géologues. De nouveaux projets se développent sur la réactivité de polluants à la surface de nanograins de glace, d'aérosols ou de suies présents dans l'atmosphère. Les outils théoriques nécessaires sont très similaires à ceux utilisés par certaines équipes spécialistes de la réactivité des agrégats : simulations à température finie, ensembles thermodynamiques, calculs d'énergie libre, liens entre propriétés macroscopiques et microscopiques (*Voir § 3*). Les propriétés optiques des particules doivent être précisées pour permettre de déterminer l'effet des aérosols dans le bilan radiatif. Étant donné l'enjeu scientifique et socio-économique des problèmes environnementaux, la recherche en amont réalisée dans notre communauté et les interactions avec les disciplines en aval devraient largement se développer dans les années qui viennent.

## 6.6 INSTRUMENTATION POUR L'ANALYSE DE L'ATMOSPHÈRE

Plusieurs équipes développent des méthodes de mesure de traces, basées sur des techniques ultrasensibles de mesure d'absorption intracavité (CRDS, Cavity Ringdown Spectroscopy, ICLAS, Intra-Cavity Laser Absorption Spectroscopy). Couplées notamment aux nouvelles sources laser infrarouges (différence de fréquence entre diodes laser, lasers à cascade quantique), elles ouvrent de nouvelles perspectives dans la détection de composés organiques volatils, de molécules instables et réactives, de radicaux, et de toxiques. Des efforts importants sont consacrés à la portabilité des instruments, afin de pouvoir les engager dans les grandes campagnes nationales et dans des missions aéroportées ou satellitaires.

Les Lidar (Light Detection And Ranging) ont bénéficié de développements très importants, leur permettant d'obtenir des informations uniques

dans les campagnes sur la physico-chimie de l'atmosphère (à Lyon, ou Fos-Marseille dans le cadre d'ESCOMPTE). Les méthodes multi-longueurs d'onde ont fourni des données quantitatives (taille, forme) sur les aérosols. L'utilisation de la spectroscopie non-linéaire et d'impulsions ultra-brèves et ultra-intenses pour la caractérisation de l'atmosphère (projet franco-allemand *Teramobile*) a démontré comment la filamentation dans l'air, créant un supercontinuum cohérent s'étendant de l'UV à l'IR, autorise la détection Lidar de plusieurs polluants simultanément et ceci sur plusieurs kilomètres. De même, des aérosols biologiques ont été identifiés pour la première fois à distance, grâce à la spectroscopie multiphotonique directement dans les particules. Enfin, le caractère conducteur (plasma) des filaments a été utilisé pour déclencher et guider des décharges mégavolts, simulant la foudre.

## 6.7 INTERFACE AVEC LA BIOLOGIE

Les mécanismes fondamentaux de relaxation et fragmentation des systèmes moléculaires complexes et des protéines sont encore mal connus : énergétique, dynamique, processus de localisation de l'énergie (*Voir § 3*). Ces problèmes sont similaires à ceux que l'on peut rencontrer dans les agrégats. La compétence acquise en spectrométrie de masse commence à être transférée aux agrégats (sources Electrospray et MALDI, FTICR, pièges). Les approches des processus élémentaires, familiers à la communauté des agrégats pourraient en sens inverse permettre de mieux comprendre et quantifier les mécanismes mis en jeu dans ces complexes moléculaires, par exemple grâce à l'étude des propriétés électriques. Il en est de même pour la formation et la dissociation de complexes moléculaires faiblement liés et d'assemblages supramoléculaires.

L'imagerie et la microscopie d'objets biologiques ont beaucoup progressé, avec notamment la tomographie cohérente optique, la tomographie acousto-optique, l'imagerie

d'objets uniques, l'imagerie de fluorescence résolue en temps, ainsi que les nouvelles techniques de microscopie non-linéaire. En particulier, les oscillateurs femtosecondes, de par la durée ultracourte des impulsions produites, conjuguent une puissance moyenne modérée et une forte puissance crête. Tirant parti des processus non-linéaires directement au sein des systèmes observés, seule la partie de l'échantillon se situant dans la zone confocale est ici sollicitée, ce qui confère aux techniques non-linéaires un avantage déterminant en termes de

photo-toxicité. Si la microscopie biphotonique est entrée aujourd'hui dans un stade commercial, il reste néanmoins beaucoup à apprendre et à développer pour les autres techniques comme les microscopies CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) ou par génération d'harmoniques, techniques qui présentent l'avantage supplémentaire de ne pas nécessiter de marqueurs fluorescents. Le développement de nouveaux contrastes, notamment en utilisant les techniques de façonnage des impulsions excitatrices, est également une voie très intéressante.

## ANNEXE

### LISTE DES ACRONYMES

#### Institutionnels

CNRS	
ESA	European Space Agency
INSUE	
PCMI	Physico-Chimie du Milieu Interstellaire
PNCA	Programme National de Chimie Atmosphérique

#### Grands instruments

ALMA	Atacama Large Millimeter Array
ITER	n'est pas un acronyme, signifie « le chemin » en latin
JET	Joint European Torus
SOLEIL	
VIRGO	

#### Quasi grand public

LIDAR	Light Detection And Ranging
RF	Radiofrequency

#### Scientifiques

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
CARS	Coherent AntiStokes Raman Scattering
CRDS	Cavity Ring Down Spectroscopy
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émission
FRICR	Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance
FUSE	Far Ultraviolet Spectroscopic Experiment
HERSCHEL	n'est pas un acronyme
ICLAS	IntraCavity Laser Absorption Spectroscopy
ISO	Infrared Space Observatory
MALDI	Matrix Assisted Laser
PHARAO	Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite
STM	Scanning Tunnel Microscope
VCSEL	Vertical Cavity Semiconductor Laser