

06

MATIÈRE CONDENSÉE : STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

Président de la section
Hugues DREYSSE

Membres de la section

Jeanne AYACHE

Christophe DELERUE

Yves DUMONT

Giancarlo FAINI

Jean-Pierre FITOUSSI

Olivier FRUCHART

Jean-Michel GÉRARD

Annie GOLE

Niels KELLER

Claudine LACROIX

François MONTAIGNE

Gilles MONTAMBAUX

Frédéric NGUYEN VAN DAU

Véronique PIERRON-BOHNES

André RAYMOND

Sylvie ROUSSET

Alain SACUTO

Amina TALEB-IBRAHIMI

Michel TESSIER

Jean-Claude VIAL

Les axes « traditionnels » de la section 06 s'organisent autour de quatre thématiques :

– semi conducteurs dont hétérostructures et boîtes quantiques ;

– magnétisme : du macro au nano avec matériaux magnétiques et électronique de spin ;

– fermions fortement corrélés avec supra-conductivité non-conventionnelle et fluides quantiques ;

– systèmes mésoscopiques avec électronique moléculaire et information quantique.

Les activités de recherche se caractérisent par un couplage étroit et fructueux entre expériences et théorie-modélisation-simulations numériques.

Il convient d'ajouter un intérêt fort pour les « grands instruments ». Ce dernier point, comme d'autres (simulation numérique par exemple) est partagé par d'autres sections et en particulier par la section 05. La section 06 regrette le calendrier qui n'a pas pu permettre le travail approfondi qu'elle aurait souhaité et la discussion avec d'autres sections sur des thématiques en recouvrement. Enfin est-il besoin de préciser que le poids attribué à chaque partie n'est pas proportionnel à leur intérêt scientifique?

1 – LES SEMICONDUCTEURS ET LEURS NANOSTRUCTURES

Les semiconducteurs et leurs nanostructures resteront au cœur des développements à venir en physique des solides et en nanoscience, en cohérence avec les évolutions attendues de l'industrie microélectronique et des nano-technologies.

Dans le domaine du magnétisme et de l'électronique de spin, les grands enjeux concernent non seulement la recherche de semiconducteurs ferromagnétiques à température ambiante, mais également la mise au point de dispositifs originaux permettant le transport et la manipulation d'informations basées sur le spin.

Dans le domaine de l'optique, des efforts importants sont nécessaires pour mettre au point les émetteurs et détecteurs du futur, couvrant tout le spectre électromagnétique des UV aux hyperfréquences. Cela concernera en tout premier lieu les fréquences d'intérêt pour les applications, pour les télécommunications ou l'imagerie médicale. Ainsi des voies prometteuses pour la génération de THz (lasers cascade, oscillateurs de Bloch, oscillations plasma) restent largement à explorer. Des recherches sont également stratégiques pour développer des énergies propres (photovoltaïque) ou pour augmenter le rendement des diodes électroluminescentes pour l'éclairage.

Les boîtes quantiques (ou nanocristaux) de semiconducteurs présentent des propriétés optiques remarquables qui peuvent être exploitées pour développer des sources de lumière très originales, en particulier quand elles sont étudiées à l'échelle de la boîte unique. L'objectif est d'aller vers la maîtrise des états quantiques de la lumière, par exemple la génération de photons uniques à 300 K. L'insertion de nanostructures de semiconducteurs dans des microcavités optiques permet de réaliser des expériences d'électrodynamique quantique dans un milieu solide. Dans ce

cadre, la récente mise en évidence de la condensation de Bose-Einstein de polaritons suscite beaucoup d'attention. Le couplage de boîtes quantiques est également un moyen très prometteur pour une ingénierie des états quantiques des électrons et des photons.

Les semiconducteurs prendront certainement une place essentielle dans le développement de l'informatique quantique. Les grands défis concernent la réalisation de systèmes solides, miniaturisés et intégrables permettant le traitement optique ou électrique de l'information quantique. L'étude du spin d'électron, d'exciton ou d'impureté dans une boîte quantique, la maîtrise du couplage entre spins électroniques et spins nucléaires sont des enjeux importants. Un autre objectif stratégique est le développement de sources solides assurant la génération de paires de photons intriqués à la demande.

Dans le domaine de l'électronique ultime, les grands enjeux seront de sonder et de maîtriser les propriétés électriques et électroniques des semiconducteurs aux limites de la loi de Moore. Cela concerne l'étude non seulement des transistors ultimes obtenus par approche top-down, mais également de nouveaux dispositifs basés sur une approche bottom-up, en particulier sur des boîtes quantiques ou des nanofils de semiconducteurs.

Les semiconducteurs micro et nano-structurés sont très prometteurs pour développer de nouveaux matériaux aux propriétés physiques originales, par exemple en photonique, en optoélectronique silicium, en thermoélectricité, ou pour réaliser des dispositifs fonctionnant en environnement extrême. La formation de matériaux composites par association de matériaux moléculaires, de nanostructures semiconductrices, métalliques ou magnétiques, est une voie à soutenir.

À l'interface avec la physique des surfaces, la chimie et la biologie, la mise au point de détecteurs ultimes à base de nanostructures de semiconducteurs est une voie extrêmement intéressante à explorer. L'intérêt des nanocristaux de semiconducteurs comme sondes optiques pour la biologie est grandissant. Les

nanofils de semiconducteurs peuvent être à la base de capteurs ultimes pour la détection électrique de molécules ou de virus uniques.

Tous ces développements dans le domaine de la physique des semiconducteurs nécessitent de maintenir une activité forte sur les matériaux, en couplage croissant avec les centrales de technologie.

2 – MAGNÉTISME ET ÉLECTRONIQUE DE SPIN

2.1 VUE GÉNÉRALE

Les études sur le magnétisme à toute échelle, continueront de se développer soit du point de vue des dispositifs, soit du point de vue des matériaux ; cependant il faut noter que la frontière « traditionnelle » entre magnétisme, supraconductivité et physique des semiconducteurs va continuer à s'estomper dans la mesure où les recherches portent de plus en plus sur des dispositifs ou des mécanismes couplant différents types de matériaux. Bien qu'un certain nombre de recherches en nanomagnétisme soit motivé par des applications potentielles, il ne faut pas perdre de vue qu'il est important de maîtriser parfaitement la physique sous-jacente.

D'un point de vue fondamental, l'étude des systèmes magnétiques comme systèmes modèles reste très active et peut donner lieu à la découverte de nouveaux états de la matière ou de nouveaux phénomènes : c'est par exemple le cas des aimants moléculaires sur lesquels les études sont à la fois fondamentales (par exemple possibilité d'étudier la statique et la dynamique de spins uniques) et appliquées (systèmes photomagnétiques, spintronique moléculaire, qubits de spins, etc.) ; dans les semiconducteurs magnétiques dilués, qui présentent un intérêt potentiel pour les applications, de nombreux efforts se portent sur la

compréhension de l'origine du ferromagnétisme ; les oxydes magnétiques sont d'une part une source de matériaux nouveaux pour les applications (multiferroïques, thermoélectricité) et d'autre part sont actuellement très étudiés pour leur comportement non standard liés à une basse dimensionalité, ou à la frustration des interactions magnétiques, ou encore à la combinaison d'un degré de liberté orbital au degré de liberté de spin.

En ce qui concerne les applications, le magnétisme continuera de jouer un rôle majeur dans les domaines de la mémorisation, du traitement et du stockage de l'information. Il est primordial de maîtriser tous les aspects :

- i) la recherche de matériaux nouveaux tels que les semiconducteurs magnétiques ou les oxydes : on peut noter l'émergence de nanostructures associant matériaux magnétiques et organiques ;

- ii) l'élaboration et la caractérisation de nano-structures : ce point est particulièrement important et nécessite de disposer de centrales de technologie performantes ainsi que de techniques d'imagerie ;

- iii) l'étude de phénomènes physiques : dynamique ultrarapide de l'aimantation, effets de taille et de forme, magnéto-transport, transfert de spin, électronique moléculaire, etc. ;

- iv) le développement de la simulation qui est primordiale pour décrire les effets dépendant du temps, ainsi que les aspects multi-échelles.

2.2 ÉLECTRONIQUE DE SPIN

Un des vecteurs importants du développement de l'électronique de spin a été la capacité progressive de maîtriser des structures de plus en plus hétérogènes (des hétérostructures métalliques vers les jonctions tunnel, vers les systèmes associant ferromagnétiques et semiconducteurs). Il est vraisemblable que cette direction restera pertinente dans les années à

venir : on voit aujourd'hui émerger une thématique autour de l'association de matériaux magnétiques et organiques.

Un autre vecteur de développement du thème est associé au développement des nanotechnologies qui permet d'envisager l'étude de structures aux dimensions réduites. La poursuite de ces efforts devrait accompagner les efforts autour du thème émergent de la nanospintronique (spintronique dans des systèmes confinés).

Dans le domaine de l'électronique de spin, il y a des effets de base, comme par exemple le transfert de spin, dont la découverte est encore très récente et dont la physique associée reste pour l'essentiel à explorer. Il est d'ailleurs vraisemblable que de nouveaux effets pourront être découverts dans les années à venir.

Enfin, la pertinence des thèmes d'études, une fois la phase d'exploration initiale passée, est intimement liée à la capacité de dégager une vision applicative crédible.

Certains enjeux applicatifs peuvent être listés : stockage de l'information, mémoires et logique non volatile, capteurs de champ faible, traitement du signal.

3 – PHYSIQUE MÉSCOPIQUE

Aux échelles de longueur les plus courtes, des phénomènes nouveaux apparaissent, propres au comportement quantique de la matière. Mais ces phénomènes ne sont pas propres aux dimensions nanométriques et peuvent se manifester aux échelles intermédiaires, à la frontière des mondes microscopique et macroscopique. La physique mésoscopique est concentrée sur l'étude des propriétés fondamentales de la matière à cette échelle intermédiaire. Les concepts qu'elle étudie, transport quantique, inter-

actions électroniques ou cohérence, la placent au carrefour de nombreuses thématiques très actuelles : l'information quantique, la spintronique, l'électronique moléculaire, la physique atomique (les gaz d'atomes froids), la chimie (méthodes de construction bottom-up). Un enjeu extrêmement important pour le futur sera de veiller à renforcer cette évolution vers des recouvrements à la fois conceptuels et expérimentaux. Les concepts qu'elle aborde ne sont pas propres aux échelles nanométriques, mais se retrouvent dans d'autres domaines de la matière condensée, comme la compétition entre ordres magnétique et supraconducteur, ou la compréhension des effets de corrélations électroniques.

On peut dégager quelques axes forts.

3.1 INFORMATION QUANTIQUE

Si une méthode naturelle consiste à utiliser des objets quantiques comme les atomes ou les ions, une voie importante consiste à utiliser des circuits électriques mésoscopiques. Ces derniers bénéficient de la souplesse de conception offerte par la nanofabrication. Toutefois leur taille fait qu'ils sont sensibles à la décohérence induite par l'environnement. Plusieurs voies sont tracées, utilisant les circuits supraconducteurs, les circuits semiconducteurs ou les spins uniques dans une boîte quantique métallique de très petite taille (point quantique). Cette dernière voie est la moins développée en France, du moins sur le plan expérimental.

Les enjeux pour le futur sont actuellement l'amélioration de la cohérence en protégeant le circuit de son environnement et la fabrication de qubits couplés. Si la perspective de réaliser un véritable processeur quantique reste encore très lointaine, la mise au point de circuits se comportant de façon quantique est déjà un but assez fascinant pour justifier les recherches, et a déjà ouvert de nouvelles perspectives pour les détecteurs ou amplificateurs limités quantiquement, le bruit quantique, les tests de la

mécanique quantique dans le domaine de l'intrication (sujet chaud à venir). Dans ce domaine, il faudra veiller à développer les interfaces entre les différentes approches de l'information quantique, la matière condensée et la physique atomique.

3.2 ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE ET NANOMÉCANIQUE

La manipulation d'objets de taille nanoscopique conduit à des développements expérimentaux et applicatifs importants. Différentes « fonctions » de l'électronique (barrières isolantes, fils semiconducteurs, diodes de redressement, mémoires moléculaires, etc.) ont été étudiées. Dans le domaine des jonctions moléculaires, les développements récents visent à mieux comprendre et contrôler les propriétés de transport électronique en particulier au niveau de l'interface électrode/molécules. Aussi l'influence sur le transport du couplage des électrons avec les modes de vibration des molécules est un aspect important, à la fois au niveau expérimental et théorique. La majorité des travaux concernent le transport électronique, mais des ouvertures importantes devraient concerner la spintronique moléculaire, l'optronique moléculaire ou l'intrication quantique. Alors que les recherches étaient focalisées jusque là sur les dispositifs individuels, des actions démarrent au niveau des assemblages, des architectures et circuits (exemple : transistors à nanotubes de carbone).

Le domaine de la nanoélectromécanique (NEM) est prometteur. Le couplage entre les degrés de liberté mécaniques (oscillations, déformations, déplacements) et les degrés de liberté électriques (charges, courants, champs électriques et magnétiques) doit être compris et exploité dans un régime essentiellement quantique. En réduisant la taille des dispositifs, la fréquence d'oscillation et la sensibilité aux perturbations extérieures augmentent, et en revanche leur consommation diminue. On

pourra alors construire des dispositifs mécaniques avec une rapidité et une sensibilité sans précédent.

3.3 LES HAUTES FRÉQUENCES

De nouveaux phénomènes apparaissent quand l'énergie d'un photon devient comparable à la température, à la tension ou aux énergies caractéristiques du système, comme l'espacement entre niveaux dans une boîte quantique. Il s'agit typiquement de fréquences de l'ordre du GHz ou plus. Les hautes fréquences permettent de mieux comprendre et d'exploiter le couplage entre électrons et photons, d'accéder à de nouvelles informations sur les mécanismes de transport, comme la statistique des porteurs de charge. Par ailleurs, l'utilisation de détecteurs/générateurs on-chip permet d'atteindre des gammes de fréquences de l'ordre de plusieurs centaines de GHz, inaccessibles aux méthodes d'amplification conventionnelles. L'un des enjeux essentiels est de mieux comprendre des phénomènes qui pourraient à terme servir de base à de futurs dispositifs, en particulier, des qubits reposant sur des modes photoniques, de nouveaux détecteurs on-chip finement résolus en fréquence et des détecteurs approchant la limite quantique, et de nouveaux outils permettant de tester plus finement notre compréhension des circuits quantiques.

3.4 SYSTÈMES HYBRIDES

Par leur originalité, l'intérêt des nanostructures hybrides S/F (supraconducteur/ferromagnétique) dépasse l'électronique quantique et touche d'autres domaines de la matière condensée comme le magnétisme et les électrons fortement corrélés. C'est un domaine récent qui reste pour l'instant très orienté vers la recherche fondamentale. Les hybrides S/F ouvrent des perspectives nouvelles d'étude

de la physique du « spin » dans un liquide quantique, comme :

1. la non-localité quantique. Comment séparer une paire de Cooper en deux?;
2. la dynamique couplée de la phase supraconductrice et de l'aimantation;
3. l'injection de spin. Qui gagne entre le condensat et l'aimantation hors équilibre?

Ce domaine de recherche se développe au carrefour de la physique mésoscopique et du magnétisme, deux domaines de recherche très actifs en France. La maîtrise des techniques de dépôt et de lithographie conduit à une bonne maîtrise des échantillons.

3.5 MÉTROLOGIE QUANTIQUE

C'est un exemple de transfert direct de concepts fondamentaux aux applications pratiques. La métrologie a connu un véritable bouleversement lors de la mise en évidence des effets quantiques caractéristiques de la méso-physique, que sont l'effet Josephson (EJ), l'effet Hall quantique (EHQ), et l'effet tunnel monoélectronique (ETM) fondé sur le blocage de Coulomb. Ces trois effets génèrent des grandeurs électriques théoriquement quantifiées, et reproductibles, exclusivement reliées aux constantes fondamentales de la physique. La métrologie quantique est donc par essence une application directe des effets physiques incontournables de la mésophysique. Elle utilise d'ores et déjà l'EJ et l'E HQ de manière routinière pour assurer la traçabilité du volt et de l'ohm jusqu'à l'échelle industrielle.

4 – SYSTÈMES FORTEMENT CORRÉLÉS : DE L'ÉTUDE DE NOUVEAUX MATÉRIAUX AUX APPLICATIONS ET À LA MODÉLISATION

Les cuprates ont ouvert un nouveau champ de recherche en physique de la matière condensée sur des systèmes où différents ordres de la matière coexistent et entrent en compétition. Dans leur sillage, les cuprates ont apporté un éclairage nouveau sur les organiques, les fermions lourds qui présentent des ordres souvent antinomiques (supra/ferro et anti-ferro) et ont débouché sur la recherche et l'étude de nouveaux systèmes tels que les manganites et les multiferroïques où le couplage de deux (ou plus) ordres différents joue un rôle central. Ces systèmes ouvrent la voie vers de nouvelles applications : capteurs thermoélectriques ou à magnétorésistance géante, nouveaux composants pour l'électronique à base d'oxydes multiferroïques, utilisation de l'effet magnétocalorique ou de la thermoélectricité dans le développement de sources d'énergie « propres ».

D'un point de vue plus fondamental, l'étude de ces systèmes est importante pour la compréhension du rôle des corrélations électroniques. Ces nouveaux états de la matière nécessitent à la fois :

- de nouvelles approches théoriques : prise en compte des effets de corrélation dans la structure électronique, développement des méthodes numériques telles que diagonalisations exactes, Monte-Carlo quantique ;

- le développement de nouvelles spectroscopies (ARPES, neutrons, RMN, Raman, etc. éventuellement en champ fort ou sous pression) qui combinent les résolutions en énergie et en impulsion.

La proximité – voire l'intrication – de ces états en compétition trouve son parallèle dans le développement en physique mésoscopique des systèmes hybrides (jonctions supra/ferro,

impuretés). Dans l'avenir, ces deux domaines devraient se rejoindre car cette compétition existe à toutes les échelles. Enfin on peut penser que les progrès dans la fabrication de nanosystèmes, vers des tailles de plus en plus petites, permettra de tester les solutions exactes de modèles développés sur des systèmes de taille finie.

Le domaine des fluides et liquides quantiques reste très actif dans les laboratoires français : l'hélium reste étudié en tant que système modèle par exemple dans des géométries confinées pour étudier les effets de dimensionalité ou les transitions de phase en présence de désordre ; les gaz d'atomes ultrafroids offrent de nouvelles possibilités pour sonder les effets de corrélations en physique de la matière condensée. Enfin, les activités aux interfaces sont en plein développement : on peut citer l'utilisation de l'hélium 3 pour la détection de la matière noire, ou en médecine.

5 – MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE

En simulation numérique de la structure électronique, un enjeu stratégique est de placer la communauté française au premier plan des développements très importants qui sont en cours et qui mènent à l'émergence d'une nouvelle discipline à l'interface entre théorie et expérience. La simulation numérique doit être au cœur des grandes avancées scientifiques en physique, chimie, biologie et nanosciences. Pour cela, plusieurs actions sont à mener :

- il est indispensable de soutenir le développement de codes de calcul, de reconnaître le travail particulier des chercheurs impliqués dans cette tâche, et de renforcer les groupes qui mènent des actions originales dans ce domaine. Cela doit passer par la formation de groupes d'une certaine taille, de noyaux d'excellence, plutôt que par l'embauche de chercheurs isolés ;

- il faut encourager les développements méthodologiques permettant dans le futur la prédiction *ab initio* des propriétés physiques couvrant tout le spectre de la physique des solides : les diverses spectroscopies, la dynamique moléculaire, le transport quantique, la supraconductivité, les systèmes fortement corrélés, les systèmes à interactions faibles, le magnétisme, les systèmes à dimension réduite, les simulations à température non nulle ;

- les approches multi-échelles associant méthodes *ab initio* et semi-empiriques doivent être développées pour aller vers les systèmes complexes comme les verres, les mécanismes réactionnels, les systèmes biologiques, le vivant. Un autre objectif est la simulation de dispositifs électroniques complets. À plus long terme, la résolution de problèmes inverses est envisagée, c'est-à-dire qu'il doit être possible de prédire de nouveaux matériaux ayant certaines propriétés physiques recherchées ;

- les couplages entre différentes approches de la structure électronique doivent être encouragés, entre les méthodes issues de la théorie de la fonctionnelle de la densité, le champ moyen dynamique, le Monte Carlo quantique et les méthodes de diagonalisation exacte.

Enfin il faut souligner la nécessité de renforcer les moyens de calcul pour assurer ces développements.

6 – INTERFACE PHYSIQUE-BIOLOGIE-MÉDECINE

Les thématiques principales de la section sont en interface avec la biologie et la médecine via l'imagerie, les matériaux et les micro-et nano-technologies (microfluidique et micro-mécanique) :

- l'imagerie et la microscopie (en particulier optique) ont beaucoup progressé en

sciences de la matière inerte et se valident maintenant en biologie et en médecine et participent au diagnostic médical. Les processus non linéaires multiphotoniques ou multiharmoniques ou encore de Raman cohérent mais aussi photothermiques conduisent à une imagerie fonctionnelle minimalement invasive et à l'échelle subcellulaire. Des progrès sont enregistrés et sont attendus grâce à l'efficacité de marqueurs nanométriques tels que les nanocristaux semiconducteurs ou les nanoparticules métalliques (en particulier d'or). La nanostructuration des substrats conduisant à une exaltation des processus optiques est aussi mise à profit en microscopie cellulaire ;

– la micro et nano-lithographie des semiconducteurs et des couches organiques aboutissent à des dispositifs en microfluidique et micromécanique qui sont des composants de base pour les microlaboratoires sur puces (lab on chip) ;

– enfin, les méthodes de mesures mises au point sur objets artificiels mésoscopiques se confrontent maintenant à des objets biologiques tels que l'ADN. On peut imaginer des sondes à l'échelle de l'ADN, participant ainsi au développement exceptionnel que connaît la génomique, le diagnostic génétique ou immunologique.

7 – CENTRALES DE TECHNOLOGIE

Au niveau national, la France a mis en place un réseau de quelques Grandes Centrales de Technologies possédant des moyens lourds pour l'élaboration et la fabrication de nanostructures. Ces Centrales sont rattachées à des laboratoires de recherche en nanosciences et les chercheurs participent activement à la recherche en technologie proprement dite. Cette stratégie s'est révélée fructueuse pour la réactivité face à de nouveaux défis, comparée

à un simple système de « guichet ». Elle se doit d'être maintenue et généralisée. Par ailleurs, à côté de ces moyens lourds, il est important de veiller à favoriser et soutenir l'essor de Centrales Spécifiques rattachées aux laboratoires fortement impliqués en nanotechnologie. Il ne s'agit pas de dupliquer ce qui existe déjà mais de répartir les efforts de manière cohérente avec le développement des besoins en nanosciences. Ces centrales spécifiques doivent s'appuyer sur les Grandes Centrales pour les besoins mettant en œuvre les moyens lourds de la nanofabrication.

8 – INSTRUMENTATION

Les progrès dans l'instrumentation sont liés à l'évolution vers des études sur des systèmes hybrides, des systèmes hétérogènes, des systèmes très dilués et des systèmes de taille de plus en plus petite (submicronique à nanométrique). Ces évolutions sont à soutenir car elles sont porteuses d'avancées tant au niveau de la compréhension des processus fondamentaux que des développements technologiques pour le futur (voir le reste de l'argumentation scientifique pour le plan stratégique).

8.1 TECHNIQUES CLASSIQUES PLUS PERFORMANTES

- Instrumentation de sondes « classiques » à sensibilité ultime : les seuils de mesure permettent de mesurer les propriétés thermodynamiques d'objets nanométriques grâce à l'exploitation de la métrologie nouvelle liée aux effets mésoscopiques (effet Josephson, etc.) ;

- Techniques TGE (neutrons, synchrotron, champs magnétiques intenses) ;

– vers une meilleure optimisation des sources et des dispositifs expérimentaux en terme de : **flux, focalisation, cohérence, résolution** en énergie en angle en spin, résolution spatiale (10 nm), résolution temporelle (sub-ps),

– utilisation de la polarisation des sources de lumière pour l'exploitation de tous les états de symétrie de la matière,

– innovation dans l'instrumentation en conditions extrêmes : pression, température (Ultra-hautes, Ultra-basses), champ magnétique.

- Techniques de champ proche (STM, AFM, SNOM, etc.);

– les techniques de champ proche ont évolué très rapidement avec de nouvelles fonctionnalités. Une des évolutions fortes du STM et de l'AFM vont vers la détection et la manipulation de spin.

De nouveaux dispositifs originaux (certains en cours de développement) intègrent la possibilité d'étudier les propriétés liées au spin de nanosystèmes, en plus des études sur la morphologie et la structure électronique déjà possibles, mais qui se sont amplifiées ces dernières années (spectroscopie par effet tunnel STS, évolution vers le STM polarisé en spin SPSTM par exemple).

D'autres évolutions concernent les approches multi-pointes (transport électrique, nantribologie, nanomécanique, etc.) et les perspectives d'une nouvelle « chimie » sous pointe. Notons également des nouveaux développements en champ proche optique comme la spectroscopie Raman en champ proche, l'imagerie dans l'infra rouge et le très récent développement du microscope en champ proche thermique.

- Microscopie électronique

On assiste ces dernières années à une vraie révolution dans la microscopie électronique en transmission avec les correcteurs d'aberration (de Cs) et le filtrage en énergie

qui permettent des analyses avec des résolutions spatiales encore meilleures ($< 0,1$ nm) avec sélectivité chimique.

La combinaison du TEM avec des techniques complémentaires in situ – mesures de transport, de spectroscopie, etc. sur des objets observés avec une résolution subatomique – permettront l'observation de transformations de phase, d'interdiffusions, ou de réactions sous faisceau électronique ou ionique, à basse ou haute température, directement dans le microscope, pour simuler des évolutions structurales et chimiques à l'échelle subatomique de matériaux utilisés dans l'espace ou dans des conditions extrêmes.

- Instrumentation hyperfréquences, GHz (maintenant très répandue et couplée à d'autres types d'imagerie) et bientôt THz : transport, etc.

8.2 COUPLAGE DES TECHNIQUES

(corrélations des informations pour une information plus complète)

On constate de manière générale une évolution vers le couplage de plusieurs techniques expérimentales et ceci, dans le but d'obtenir une description plus complète des systèmes mais également afin de travailler avec plusieurs sondes différentes sur le même objet pour une description plus précise.

8.3 ÉLABORATION CONTRÔLÉE DE MATÉRIAUX ET DISPOSITIFS

Les techniques d'élaboration de matériaux et d'objets d'étude bénéficient en outre de développements instrumentaux de contrôles in-situ, permettant le façonnage rapide de matériaux nouveaux à l'empilement atomique contrôlé, comme les techniques physico-chimiques en phase solide, liquide, ou gazeuse ;

à l'interface à la biologie (greffage, etc.), de croissance physique (EPJM, PLD, etc.). Ces apports ont été déterminants. Les approches vers la nano-structuration de type top-down + bottom-up, doivent continuer à être développées.

Le couplage direct des techniques de croissance avec les autres techniques expérimentales doit être encouragé. Il est stratégique de soutenir et de reconnaître les activités dans le domaine de l'élaboration qui sont en amont des découvertes relevant de la section 06.