



INP

**LES GROUPEMENTS
DE RECHERCHE
DE L'INSTITUT DE
PHYSIQUE EN 2021**

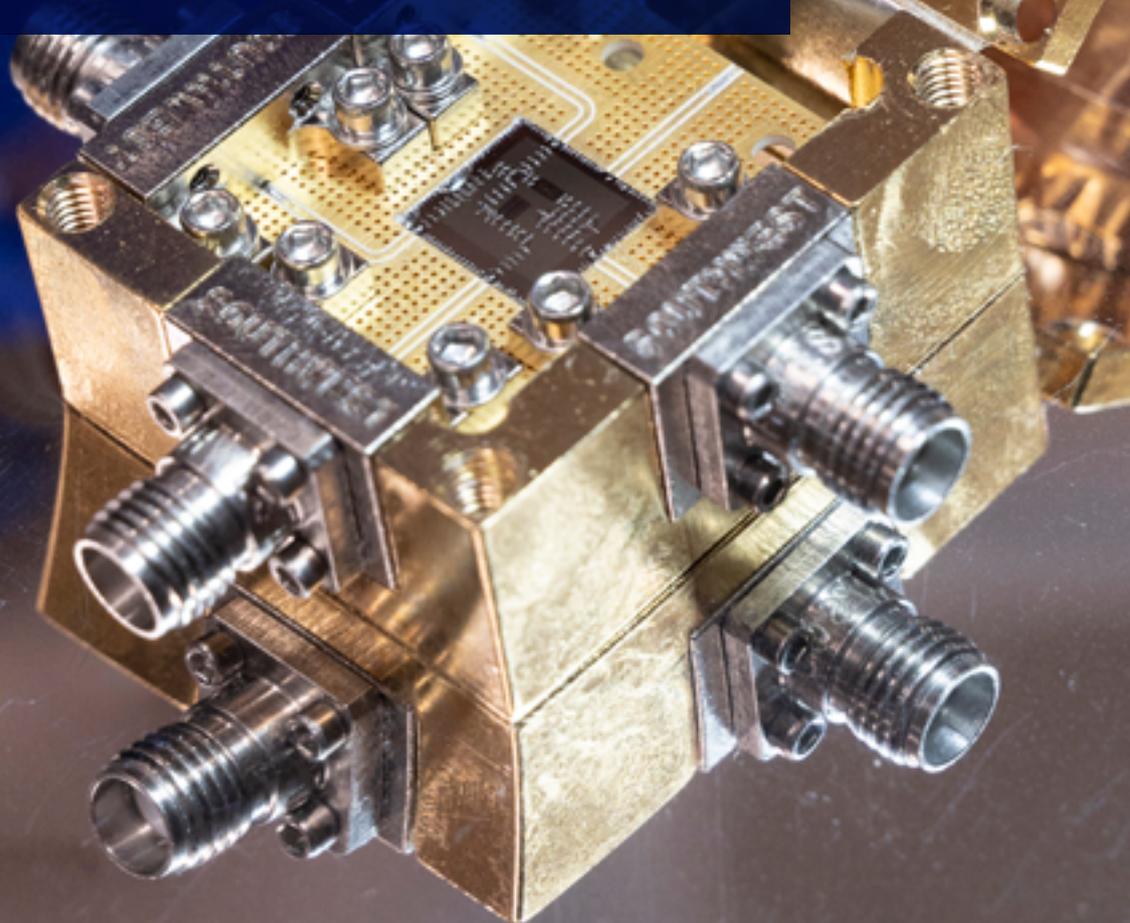


TABLE DES MATIÈRES

Édito	3
ADN 2.0 - Architecture et dynamique du noyau et des génomes	4
AF - Atomes froids	6
BIOCOMP - Implémentations matérielles du calcul naturel	8
COMPLEXE - Contrôle des ondes en milieu complexe	10
ELIOS - Effets non-linéaires dans les fibres optiques	12
EMIE - Edifices moléculaires isolés et environnés	14
HoWDi - Hétérostructures de van der Waals de matériaux de basse dimensionnalité	16
HPERO - Pérovskites halogénées	18
IQFA - Ingénierie quantique, des aspects fondamentaux aux applications	20
ISM - Interfacial soft matter (Matière molle interfaciale)	22
LEPICE HDE - Lasers énergétiques et intenses et plasmas sous conditions extrêmes	24
MecaQ - Optomécanique et nanomécanique quantiques	26
MEETICC - Matériaux, états électroniques, interactions et couplages non-conventionnels	28
MESO - Physique quantique mésoscopique	30
NANOPERANDO - Structure et dynamique des matériaux dans leur environnement « réel »	32
NS-CPU - Nanosciences en champ proche sous ultra vide	34
Or-nano - L'or nanométrique	36
P&O - Polymères et Océans	38
PULSE - Processus ultimes en épitaxie de semi-conducteurs	40
REST - Rencontres de spectroscopie théorique	42
THEMS - Dynamique quantique dans les systèmes moléculaires	44
UP - Ultrafast phenomena (Phénomènes ultrarapides)	46
XFEL - Sciences autour des XFEL	48



Astrid Lambrecht,
directrice de l'Institut de physique

© Cyril Frésillon / CNRS Photothèque

Le groupement de recherche (GDR) est une structure du CNRS qui met en réseau et fédère une communauté scientifique autour d'une thématique originale émergente. L'Institut de physique initie des GDR sur des thématiques scientifiques qui répondent à des problèmes fondamentaux ou sociétaux actuels.

Ces thématiques relèvent du cœur de métier de l'Institut de physique, mais peuvent également avoir trait aux interfaces qu'entretient la physique avec d'autres domaines scientifiques. En ce sens, les GDR à caractère transdisciplinaire portés par l'Institut de physique sont soutenus en association avec les autres instituts CNRS concernés.

Définis pour une durée de cinq ans, renouvelables une fois, les GDR sont pilotés par un directeur ou une directrice et regroupent des équipes comprenant des chercheurs, enseignants-chercheurs,

doctorants, post-doctorants, ingénieurs, relevant d'unités du CNRS, ainsi que des partenaires institutionnels – tels que les universités, le CEA, l'Inserm, l'Inra ou l'Ifremer – et des industriels.

Les principales missions d'un GDR consistent à animer une communauté thématique souvent pluridisciplinaire, avec la volonté de s'ouvrir à de nouveaux partenaires (institutionnels, industriels ou prestataires), à développer les échanges entre scientifiques au sein du réseau de laboratoires impliqués, et à mettre en place des projets scientifiques aux échelles nationale, européenne ou internationale.

Le travail des GDR en 2020 a été fortement affecté par la crise sanitaire, rendant les réunions en présentiel difficiles, voire impossibles sur une grande partie de l'année. Je tiens à remercier sincèrement les porteurs des GDR pour leurs

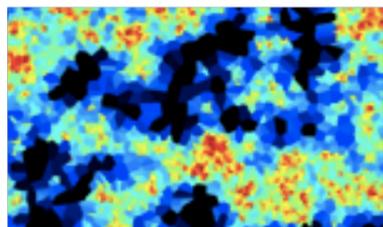
efforts continus tout au long de l'année afin de maintenir l'animation des communautés scientifiques dans ce contexte compliqué. Ce mode de fonctionnement devra être maintenu tant que la situation sanitaire ne permet pas des rencontres et échanges en présentiel.

Ce fascicule présente, sous la forme de fiches synthétiques, les objectifs et les perspectives de chacun des groupements de recherche portés par l'Institut de physique.

Au-delà de la présentation des recherches menées sur les thématiques émergentes dans ce cadre, il offre, par sa diffusion, la possibilité à de nouveaux partenaires relevant d'autres champs disciplinaires de rejoindre ces GDR, en les enrichissant de leurs expertises scientifiques complémentaires.

GDR ADN 2.0 - ARCHITECTURE ET DYNAMIQUE NUCLÉAIRES ET GENOMES

La mission du groupement de recherche **Architecture et dynamique nucléaires et genomes (ADN 2.0)** est de rassembler la communauté française impliquée dans l'étude de l'organisation nucléaire et intéressée par la modélisation physique. À l'interface de la physique et de la biologie, le GDR ADN 2.0 vise à comprendre le rôle fonctionnel de l'organisation nucléaire dans les processus physiologiques et les pathologies associées en suscitant l'émergence d'une approche intégrée de l'architecture des chromosomes et de leur dynamique aux différentes échelles de taille et de temps.



9 thématiques

Techniques expérimentales de la biologie moléculaire et cellulaire

Microscopie de super-résolution

Biotechnologies

Approches haut-débit

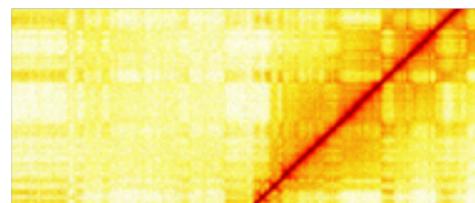
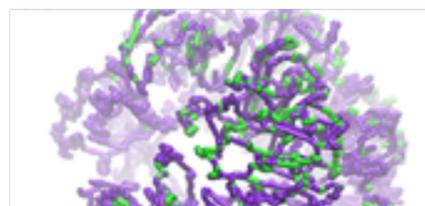
Bio-informatique

Physique statistique

Simulation numérique

Techniques de visualisation et d'animation 3D

Modélisation physique



200 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **50** laboratoires

Coordinateur : Cédric Vaillant (LPENSL) | cedric.vaillant@ens-lyon.fr
Coordinatrice et coordinateur adjoints : Emmanuelle Fabre (GenCellDi)
et Jean-Marc Victor (LPTMC)

PROSPECTIVES

Le groupement de recherche Architecture et dynamique nucléaires (CNRS GDR « ADN 2.0 ») a vocation à fonctionner de manière coopérative et solidaire, et à renforcer les liens entre les équipes travaillant sur l'organisation 3D des génomes. Il a la double particularité de s'intéresser à l'ensemble du monde vivant – eucaryotes, mais aussi bactéries et archaea – et de privilégier la modélisation physique et numérique. Ce choix d'approche ouvre la possibilité unique d'envisager l'organisation nucléaire à la lumière de la différenciation cellulaire et du développement, des pathologies (cancers, maladies infectieuses et chroniques, neurodégénératives) et de l'évolution des espèces. Comment les fonctions universelles remplies par les chromosomes de l'ensemble du monde vivant sont-elles mises en oeuvre par les différents types d'organisation nucléaire ? Selon quels principes physiques ? Comment certains mécanismes se retrouvent dérégulés et conduisent aux pathologies ? Quels mécanismes ont commencé à se mettre en place mais sont restés à l'état d'ébauche chez certaines espèces (processus dits « inchoatifs ») alors qu'ils ont abouti chez d'autres ?

Au défi scientifique immense que représente la compréhension de l'organisation nucléaire physiologique et de ses pathologies, s'ajoute un autre défi – celui du soutien des équipes concernées face à la concurrence internationale. Une collaboration dédiée à la même thématique, soutenue financièrement par les National Institutes of Health (NIH), a en effet démarré aux Etats-Unis en 2015 avec le lancement du programme « 4D Nucleome ». Exclusivement dédié à l'étude de l'architecture et de la dynamique des noyaux de cellules humaines, ce programme pluriannuel, doté d'un budget annuel de 30 millions de dollars, vise à prendre le leadership de ce domaine très compétitif. Pour pouvoir peser à l'échelle internationale, il nous paraît crucial qu'une initiative similaire soit mise en place en Europe. Nous souhaitons pour cela unir nos forces à celles d'autres GDRs aux thématiques connexes (Imabio, AQV) ainsi qu'à d'autres acteurs dans les différents pays européens. Cette initiative serait une excellente occasion de développer la synergie que nous avons amorcée et de faire valoir les atouts de nos approches. Ce serait alors aussi une excellente occasion pour le CNRS de peser sur les orientations des futurs programmes européens.

GDR AF - ATOMES FROIDS

La mission du groupement de recherche **Atomes froids (AF)** est de rassembler la communauté française dont les activités de recherche portent sur les atomes froids. En s'appuyant sur des développements expérimentaux et théoriques, les scientifiques abordent aussi bien des questions d'ordre fondamental qu'appliqué autour de la problématique du refroidissement, par laser ou par évaporation des atomes.



9 thématiques

Matière quantique ultrafroide

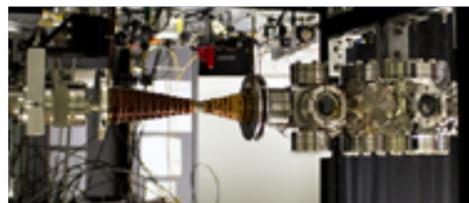
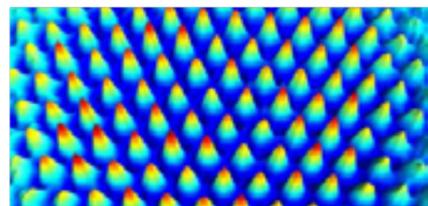
Molécules froides et effets à N-corps

Ondes de matière et ondes lumineuses, cohérence et désordre

Information et optique quantiques

Métrologie, mesures fondamentales et instrumentation

Interface avec d'autres domaines



200 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **22** laboratoires

Coordinateur : Robin Kaiser (INPHYNI) | robin.kaiser@inphyni.cnrs.fr

Coordinatrice et coordinateurs adjoints : Hélène Perrin (LPL), Jacob Reichel (LKB)
et Tommaso Roscilde (LPENSL)

PROSPECTIVES

ATOMES FROIDS POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Ce sujet actuellement très soutenu au niveau européen (avec en particulier le « Flagship » sur les technologies quantiques) figure bien évidemment parmi les priorités du domaine des atomes froids et il convient de maintenir une action importante dans ce contexte, avec le potentiel reconnu des systèmes d'atomes froids pour le développement des technologies quantiques. Il convient cependant de noter que les atomes froids ont de nombreuses autres applications, tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée. Le GDR Atomes froids est structuré en thèmes et nous pensons qu'il sera important de demander aux responsables de ces thèmes d'organiser des réunions thématiques dans des domaines qui ne bénéficient pas de la même visibilité que les technologies quantiques (comme la chimie ultrafroide ou les systèmes désordonnés). Le GDR considère qu'il est important de soutenir ces directions de recherche et de promouvoir l'émergence de nouvelles directions de recherche.

STRUCTURATION NATIONALE

L'essentiel des responsables des groupes travaillant sur les atomes froids se connaissent bien et peu (ou pas) de groupes semblent isolés en France. Le GDR AF permet en particulier de garder un lien avec des groupes hors Ile-de-France (qui ont la structure SIRTEQ « sciences et ingénierie en région Ile-de-France pour les technologies quantiques » et la proximité géographique favorisant les échanges). Le développement de nouvelles activités autour des atomes froids se fait parfois sans concertation nationale et le GDR Atomes froids n'a pas la vocation de piloter une telle politique de recherche. Cependant, en tant que structure CNRS, il serait intéressant pour le GDR de savoir s'il convient de soutenir plus particulièrement des activités nouvelles qui se développent.

LIENS INTERNATIONAUX

Parmi les pays BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud), on note que la Chine, l'Inde et le Brésil sont en train de développer leur activité en atomes froids. La Chine est particulièrement active et il serait important d'avoir une concertation nationale pour planifier les échanges avec les groupes en Chine. Des liens très fructueux entre la France et le Brésil existent depuis longtemps et un réseau de recherche international (IRN) incluant les atomes froids serait une excellente façon de maintenir ces liens. Si besoin, le GDR Atomes froids peut aider à organiser des réunions et des visites pour de tels échanges.

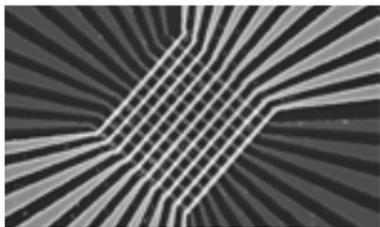
FORMATION ET DIFFUSION GRAND PUBLIC

Le GDR Atomes froids a depuis sa création une action résolument tournée vers les jeunes (avant et pendant la thèse). Une école prédoctorale annuelle aux Houches est maintenant un événement bien établi au niveau international et offre une formation spécialisée et la possibilité d'établir des contacts entre jeunes chercheurs du domaine, essentiels pour la prochaine génération de chercheurs et d'ingénieurs en atomes froids. Par ailleurs, un livre sur les applications des atomes froids a été publié en 2020 [1] visant un plus grand public que les chercheurs travaillant dans le domaine des atomes froids.

[1] Atomes, ions, molécules ultrafroids et technologies quantiques, R. Kaiser, M. Leduc, H. Perrin, Editors, EDP Sciences, Collection : « [Une introduction a...](#) » (2020), ISBN 2759823776

GDR BIOCOMP - IMPLÉMENTATIONS MATÉRIELLES DU CALCUL NATUREL

La mission du groupement de recherche **Implémentations matérielles du calcul naturel (BioComp)** est de rassembler et de structurer la communauté française travaillant sur la réalisation de systèmes matériels bio-inspirés. BioComp vise à la fois à comprendre les mécanismes à l'oeuvre dans les systèmes biologiques afin de créer de nouveaux types de puces basées sur le calcul naturel, et à construire des architectures matérielles hybrides afin de mieux comprendre la biologie.



6 thématiques

Systèmes neuromorphiques

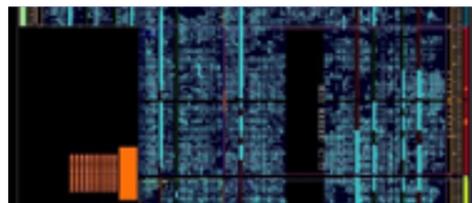
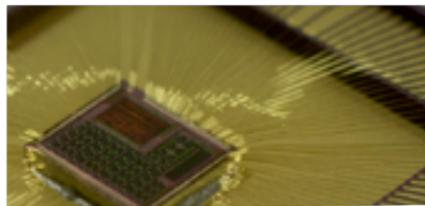
Intelligence artificielle

Calcul bio-inspiré, neurosciences et psychologie cognitive

Traitement de l'information inspiré de la biologie

Matériaux, physique et électronique pour le calcul bio et neuro-inspiré

Robotique neuro-inspirée



160 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **60** laboratoires

Coordinateur : Sylvain Saighi (IMS) | sylvain.saighi@ims-bordeaux.fr

Coordinateur adjoint : Benoît Miramond (LEAT) | benoit.miramond@univ-cotedazur.fr

PROSPECTIVES

Les enjeux des systèmes électroniques inspirés du cerveau sont nombreux :

ENVIRONNEMENTAUX

L'industrie des technologies de l'information consomme déjà plus d'électricité que l'Inde du fait de l'utilisation massive des centres de données, en particulier pour y faire tourner des algorithmes d'intelligence artificielle (IA). Les systèmes neuromorphiques peuvent réduire drastiquement cette consommation d'électricité, vers une IA verte.

ECONOMIQUES

Les applications des systèmes de calcul bio-inspirés peuvent être divisées en deux classes. La première est d'accélérer et miniaturiser l'IA pour les véhicules autonomes, la robotique, les prothèses, les réseaux connectés, etc. La deuxième est de fournir des super-calculateurs pour permettre aux neuroscientifiques de faire tourner des modèles du cerveau.

SOCIÉTAUX

Le développement futur de l'IA nécessite de changer le matériel sur lequel on fait tourner ces algorithmes. La France est en pointe de la recherche fondamentale dans ce domaine ; il faut soutenir cet effort et faire en sorte que cette recherche mène à des produits développés et commercialisés en France.

ÉTHIQUES

Le développement de cette nouvelle électronique modifiera notre interaction avec les machines et soulèvera de nombreuses questions éthiques. Depuis les usages de ces technologies, la protection des données, les mutations sociétales jusqu'à la place juridique de ces systèmes artificiels, de nombreuses questions doivent être abordées en amont.

SCIENTIFIQUES

Progresser vers la réalisation de systèmes de calcul matériels bio-inspirés permettra des avancées scientifiques dans tous les domaines concernés - neurosciences, mathématiques, informatique et architecture des systèmes de traitement de l'information, microélectronique, nanotechnologies et physique.

Pour ceci, de nombreux défis doivent être relevés :

INTERDISCIPLINARITÉ

Il s'agit d'un domaine de recherche naissant, qui, pour aboutir, doit réunir des chercheurs de la physique aux neurosciences en passant par la micro-électronique et l'informatique.

IMPLÉMENTATIONS MATÉRIELLES

Il faut réaliser des nanoneurones et des nanosynapses avec une faible consommation énergétique, par dizaines de millions (10^{11} neurones dans le cerveau), modéliser ces composants, les connecter densément (10^4 synapses par neurone biologique), et développer des algorithmes adaptés (défi : apprentissage non-supervisé).

MODÈLES

Les systèmes IA embarqués nécessitent de nouveaux modèles, moins demandeurs en ressources, capables d'apprendre avec très peu de données, tolérants aux imperfections des composants, robustes aux interférences catastrophiques, et capables de réaliser de multiples fonctions cognitives au-delà de la reconnaissance de motifs (fusion multisensorielle, circuits attentionnels, prédictifs).

GDR COMPLEXE - CONTRÔLE DES ONDES EN MILIEU COMPLEXE

La mission du groupement de recherche **Contrôle des ondes en milieu complexe (COMPLEXE)** est de rassembler la communauté française alliant recherches fondamentale et appliquée dans le domaine de la physique des ondes dans les milieux complexes. COMPLEXE souhaite fédérer opticiens, acousticiens, physiciens des atomes froids et sismologues, et s'intéresse aux aspects fondamentaux de la propagation des ondes ainsi qu'au développement de nouvelles méthodes de contrôle et d'imagerie des ondes au sein de milieux complexes.



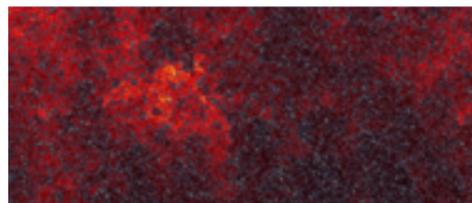
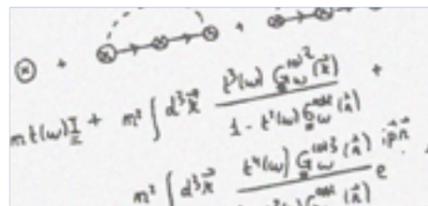
4 thématiques

Techniques de contrôle, d'imagerie et de caractérisation des ondes dans les milieux désordonnés

Recherche fondamentale sur les aspects mésoscopiques et la localisation des ondes dans les milieux désordonnés

Transport ondulatoire dans les milieux corrélés ou non linéaires

Les ondes comme simulateurs de systèmes quantiques ou topologiques



146 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **31** laboratoires

Coordinateur : Nicolas Cherroret (LKB) | cherroret@lkb.upmc.fr

Coordinateur adjoint : Alexandre Aubry (Institut Langevin) | alexandre.aubry@espci.fr

PROSPECTIVES

Le GDR COMPLEXE regroupe des chercheurs venant d'horizons variés mais motivés par un problème commun : décrypter et exploiter la propagation des ondes dans les milieux « complexes ». Dans notre environnement direct, les milieux complexes sont plus souvent la règle que l'exception : il s'agit par exemple des matériaux déviant de l'ordre cristallin à cause de défauts, des tissus biologiques hétérogènes, des émulsions ou encore des gaz denses de particules. Dans ces systèmes, la propagation des ondes ne se fait pas en ligne droite mais est erratique. Ce processus est à la fois un problème et une richesse, car il rend l'imagerie difficile mais donne en même temps naissance à des phénomènes physiques originaux. L'étude des ondes en milieux complexes soulève des défis fondamentaux et appliqués au cœur de l'interdisciplinarité du GDR COMPLEXE.

LE CONTRÔLE ET L'IMAGERIE

Dans un milieu complexe, contrôler la propagation des ondes ou les utiliser pour faire de l'imagerie a longtemps semblé sans espoir. Des gros progrès ont pourtant été réalisés récemment : grâce aux techniques de façonnage d'un front d'onde, ou en enregistrant la matrice de diffusion du milieu (sa « carte d'identité »), on sait désormais forcer une onde à suivre un trajet préétabli à travers un milieu opaque, et même imager à travers lui. Les chercheurs du GDR COMPLEXE travaillent désormais à améliorer la rapidité de ces techniques, à simplifier leur mise en œuvre et à augmenter leur résolution, notamment pour les rendre utilisables au niveau industriel. Quant à l'imagerie à l'intérieur d'un milieu complexe épais, elle demeure un défi majeur.

LE TRANSPORT ET LA MÉSCOSCOPIE

L'étude du transport des ondes dans les milieux complexes et des phénomènes d'interférences qu'il génère est au cœur du GDR, dans des domaines aussi variés que le transport électronique dans les conducteurs, la propagation de la lumière dans les milieux opaques ou la physique des ondes atomiques désordonnées. Dans ce cadre, certains phénomènes que l'on pensait compris ont été remis en question ces dernières années, comme l'existence même de la localisation d'Anderson de la lumière. De même, dans les milieux désordonnés présentant de fortes corrélations les concepts les plus simples comme celui de diffusion semblent ne plus s'appliquer. Développer un cadre théorique permettant de comprendre ces nouveaux systèmes et les caractériser systématiquement sont des enjeux centraux pour les années à venir.

LA SIMULATION DU MONDE QUANTIQUE

Exploiter les propriétés d'un système ondulatoire pour reproduire la physique du monde microscopique est une idée en plein essor. Les propriétés du graphène ou d'isolants topologiques peuvent ainsi aujourd'hui être reproduites en propageant des micro-ondes ou de la lumière dans des réseaux bien choisis. Dans le même esprit, on peut réaliser l'analogie du phénomène de superfluidité d'un gaz quantique avec un faisceau optique dans un milieu non linéaire. Le GDR soutient plusieurs équipes travaillant sur ces questions. Il y a fort à faire dans les prochaines années, notamment pour développer les expériences encore rares sur ces sujets, et exploiter les spécificités apportées par les systèmes analogues ondulatoires.

GDR ELIOS - EFFETS NON-LINÉAIRES DANS LES FIBRES OPTIQUES

La mission du groupement de recherche **Effets non-linéaires dans les fibres optiques (ELIOS)** est de rassembler la communauté académique française travaillant sur les effets non-linéaires dans les fibres optiques et les guides d'onde au sens large, incluant l'optique intégrée, et de stimuler les relations avec les industriels français.



7 thématiques

Ondes scélérates et ondes de choc

Fibres multimodes ou multi-coeurs en régime non-linéaire

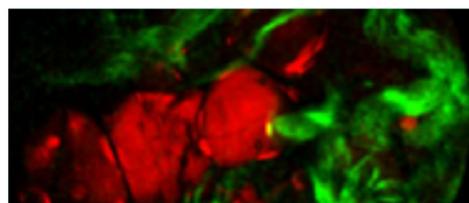
Turbulence/thermalisation en optique

Lasers

Stratégie de machine learning

Peignes de fréquences

Optique intégrée



150 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **25** laboratoires

Coordinateur : Arnaud Mussot (PhLAM) | arnaud.mussot@univ-lille.fr

Coordinateurs et coordinatrice adjoints : Hervé Rigneault (Institut Fresnel),
Christophe Finot (LICB) et Delphine Marris-Morini (C2N)

PROSPECTIVES

L'optique non-linéaire dans les fibres optiques est une thématique qui a émergé au cours des années 70 dans le contexte des télécommunications optiques. Elle a vite constitué un domaine d'étude attirant aussi bien les physiciens voulant explorer des concepts fondamentaux innovants que les ingénieurs voulant profiter d'une solution sans égal pour manipuler et transmettre la lumière. À titre d'exemple, les physiciens du domaine du non-linéaire ont vite identifié la fibre optique comme étant un support parfait pour explorer expérimentalement toute la richesse des dynamiques complexes des solutions de l'équation de Schrödinger non-linéaire. De son côté, la recherche applicative a su profiter de la flexibilité des fibres optiques pour concevoir toute une gamme de nouvelles sources optiques ayant des durées et des longueurs d'ondes très variables. Ainsi, depuis plus de 40 ans, la communauté de l'optique non-linéaire en fibre a su constamment progresser, s'adapter aux besoins des autres communautés et aux nouvelles opportunités issues des progrès réalisés au niveau de la fabrication de la fibre, comme l'avènement des fibres microstructurées au tournant du millénaire ou bien actuellement l'explosion des communications multimodales.

Dans ce paysage international très concurrentiel, la communauté française a toujours su se hisser et se maintenir au meilleur niveau, aussi bien en termes de concepts que d'applications concrètes.

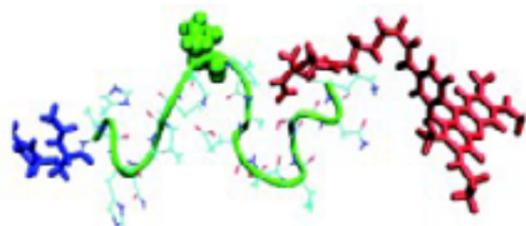
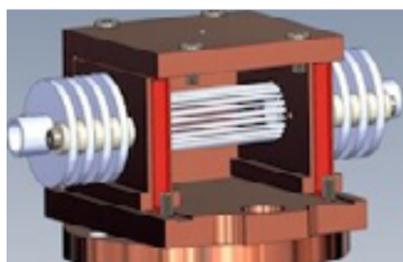
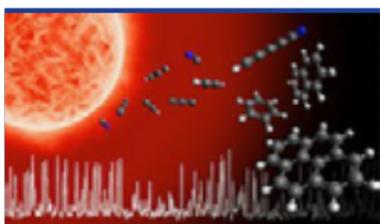
Les dernières publications de plus haut rang de notre communauté ont souligné tout le savoir-faire français dans ce domaine qui a stimulé aussi le développement par notre communauté de techniques innovantes de caractérisation de dynamiques non-linéaires complexes.

En parallèle, l'étude des effets non-linéaires dans les structures photoniques intégrées est un domaine de recherche en pleine expansion. D'une part, le fort confinement du champ dans des guides d'onde éventuellement nanostructurés permet une exaltation des effets non-linéaires. D'autre part, l'intégration des structures non linéaires avec les fonctions optiques classiques à base de guide d'onde (interféromètres, cavités, guides à fentes, modulateurs, photodétecteurs, etc.) ouvre de nombreuses perspectives pour la réalisation de circuits photoniques pour des applications en télécommunication, spectroscopie, capteurs, etc.

Tous ces travaux s'inscrivent dans le cadre de travaux de recherche soit très fondamentaux avec l'étude de la dynamique de formation d'ondes scélérates par exemple, soit très appliqués avec la génération de sources lasers ultra-stable pour le référencement de précision ou la détection de polluants, avec un fort impact sociétal. L'objectif est de créer une synergie entre les différents acteurs académiques et de renforcer les liens avec les partenaires industriels.

GDR EMIE - EDIFICES MOLÉCULAIRES ISOLÉS ET ENVIRONNÉS

Le groupement de recherche **Edifices Moléculaires Isolés et Environnés (EMIE)** a pour mission de rassembler la communauté française des physicien(ne)s et chimistes travaillant sur des systèmes moléculaires de taille et de complexité variées, les objets d'étude pouvant être isolés en phase gazeuse mais aussi placés dans un environnement contrôlé. Autour des aspects fondamentaux de la physique moléculaire expérimentale et théorique, notre communauté est naturellement vouée à se développer et s'enrichir au contact de disciplines voisines (chimie, biologie) et à s'ouvrir à d'autres domaines aux impacts sociétaux importants (sciences de la vie, sciences de l'atmosphère et l'Univers, énergie).



6 thématiques

Méthodologie expérimentale et instrumentation

Approches théoriques

Atmosphères et sciences de l'Univers

États excités et énergie

Biomolécules

Effets d'environnements

250 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **40** laboratoires

Coordinateur : Pierre Çarçabal (ISMO) | pierre.carcabal@universite-paris-saclay.fr
Coordinatrice adjointe : Aude Simon (LCPQ) | aude.simon@irsam.ups-tlse.fr

PROSPECTIVES

L'objectif principal des recherches menées au sein du réseau EMIE est d'améliorer la description et la compréhension de la matière aux échelles atomique et moléculaire.

Les chercheuses et les chercheurs du GDR EMIE participent aux développements méthodologiques expérimentaux et théoriques permettant de caractériser les édifices moléculaires couvrant une vaste gamme de taille, notamment par voie spectroscopique résolue spectralement ou temporellement.

Pour les méthodes résolues en fréquence, les spectroscopies vibrationnelle et électronique sont les principales sources d'information sur les systèmes de grande taille. Nous avons vocation à élargir ce domaine de compétence aux méthodes de spectroscopie à haute résolution, permettant l'utilisation des signatures rotationnelles et rovibrationnelles, particulièrement robustes pour étudier les systèmes de petites et moyennes tailles.

Les transformations moléculaires étudiées explorent des échelles de temps variées allant des temps courts, pour traiter les dynamiques électronique et nucléaire induites par des excitations brèves et intenses (attosecondes-picosecondes), aux temps longs macroscopiques notamment caractéristiques des mécanismes de relaxation lente qui peuvent être étudiés en pièges ou anneaux de stockage.

Du point de vue de l'échelle spatiale, notre communauté couvre aussi un vaste domaine avec des études sur la réactivité hétérogène, les systèmes déposés, solvatés ou en matrice, ou encore les nanoparticules, en identifiant les contributions respectives de l'environnement et de l'objet d'étude.

Fédérée autour de la physique moléculaire fondamentale, notre communauté étend son domaine d'application vers des disciplines situées au-delà de ses propres frontières.

Dans le domaine des sciences de l'Univers, nos membres participent à la caractérisation d'édifices moléculaires pertinents pour les milieux astrophysiques et à l'étude des mécanismes impliqués dans la physique et la chimie des atmosphères. Notre expertise recouvre également l'étude des mécanismes de formation, de croissance ou la réactivité des aérosols, les effets d'environnement, notamment aux interfaces solides/gaz, jusqu'à la formation et le devenir des polluants.

En sciences de la vie, le GDR EMIE dispose d'un savoir-faire basé sur des développements en sciences analytiques, en instrumentation et en approches théoriques, qui a permis de tisser des liens forts à l'interface chimie-biologie. Des études sur l'influence de l'environnement, par exemple les effets d'hydratation sur les molécules biologiques, sont à développer dans ce domaine également.

En lien avec le domaine de l'énergie, nos études des états moléculaires excités peuvent s'appliquer à la dynamique de molécules photoréactives, et nous envisageons aussi d'aborder des questions concernant la stabilité des hydrates de gaz et des molécules d'asphaltènes environnées.

L'interaction de van der Waals permet aujourd'hui d'assembler à l'échelle atomique des matériaux de nature et de dimensionnalité différentes, 2D (les matériaux 2D), 1D (nanotubes, nanofils), 3D (films plus ou moins minces) ou 0D (boîtes quantiques, molécules) sous la forme d'hétérostructures. **Le groupement de recherche Hétérostructures de van der Waals de matériaux de basse dimensionnalité (HoWDi)** a pour mission de regrouper et faire interagir des équipes qui explorent l'élaboration de ces hétérostructures ainsi que leurs propriétés physiques inédites, lesquelles sont héritées des deux matériaux constituants ou générées par des effets aux interfaces ou de proximité.



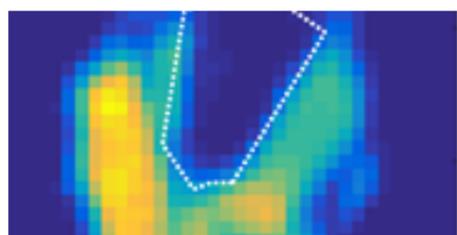
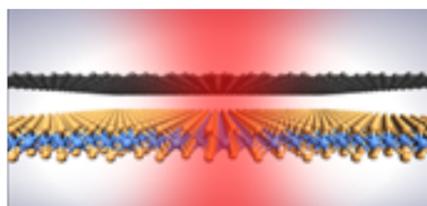
4 thématiques

Synthèse, nanofabrication, caractérisation

Transport et dispositifs électroniques

Optiques, excitonique, photonique

Magnétisme, spintronique, corrélations électroniques



300 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **90** laboratoires

Coordinateur : Christophe Voisin (LPENS) | christophe.voisin@ens.fr

Coordinateurs et coordinatrice adjoints : Stéphane Berciaud (IPCMS), Johann Coraux (NEEL) and Annick Loiseau (LEM)

PROSPECTIVES

Une évolution majeure dans l'étude des phénomènes physiques de basse dimensionnalité repose sur l'assemblage, à l'échelle macroscopique mais avec une précision atomique, de matériaux cristallins, 2D, 1D, et mixtes, 2D-1D, 2D-0D ou 2D-3D. Ces assemblages délicats sont assurés par l'interaction van der Waals, qui donne son nom à cette nouvelle génération d'hétérostructures — les hétérostructures de van der Waals. Ces matériaux artificiels peuvent être élaborés à l'échelle du laboratoire par des moyens peu coûteux, et ont révélé des propriétés remarquables, qui ont eu un fort retentissement ces dernières années (effets de moirés sur la supraconductivité et l'émission de lumière, effets de proximité sur l'émergence de phases électroniques exotiques). Notre réseau aborde les aspects théoriques, numériques et expérimentaux associés aux hétérostructures de van der Waals.

UNE FAMILLE ÉLARGIE

Les matériaux de van der Waals suscitent un engouement scientifique majeur depuis 15 ans, d'abord avec le graphène, puis avec le nitrure de bore (BN) et par la suite avec les dichalcogénures de métaux de transition semiconducteurs. Ces cinq dernières années, de nouvelles phases quantiques (ordre de spin, de charge, corrélations électroniques, structure de bandes électroniques et photoniques de topologies non triviales) sont observées expérimentalement dans la limite 2D. Individuellement, ces matériaux font l'objet d'études fondamentales dédiées et leur intégration dans des hétérostructures van der Waals donne accès à une multitude de nouveaux phénomènes physiques.

ÉLABORATION, CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION

Des approches « top-down » toujours plus perfectionnées permettent d'empiler des feuillets micrométriques en contrôlant leur séquence et leurs orientations relatives. Ces approches offrent des possibilités quasi-illimitées et avec elles, l'accès à un vaste champ de propriétés originales. Elles sont particulièrement commodes à mettre en œuvre à l'échelle du laboratoire, mais ne sont pas adaptées pour fournir des hétérostructures de grande surface, ou pour les produire à grande échelle. Notre GDR a pour but de promouvoir un effort national sur les approches « bottom-up », d'élaboration, dans un domaine ou presque tout reste à faire : maîtriser la qualité, la phase cristalline et la stœchiométrie des matériaux de van der Waals, ainsi que les relations

d'épitaxie, et les effets de proximité au sein d'hétérostructures. Ces recherches s'accompagnent de caractérisations avancées (microscopies et spectroscopies optiques, électroniques, mesures à sondes locales). Ces efforts peuvent s'appuyer sur des efforts numériques et de modélisation permettant de prédire l'existence et les propriétés de nouvelles familles de matériaux et d'hétérostructures.

TWISTRONIQUE ET EFFETS DE PROXIMITÉ

Le contrôle de la distance entre matériaux de van der Waals à l'échelle de l'Angström et la maîtrise du degré de liberté angulaire (angle chiral dans des nanotubes, écart angulaire (« twist ») entre les registres atomiques de couches 2D) offrent la possibilité de réaliser une véritable ingénierie de structures de bandes et de découvrir de nouvelles phases électroniques et photoniques ou de nouveaux phénomènes de couplage en champ proche. Dans ce contexte, l'émergence de matériaux de van der Waals dotés d'un ordre magnétique permet de réinventer la physique des effets de proximité magnétiques, par exemple à l'interface entre matériaux semiconducteurs et ferromagnétiques 2D.

MÉTROLOGIE ET DISPOSITIFS INNOVANTS

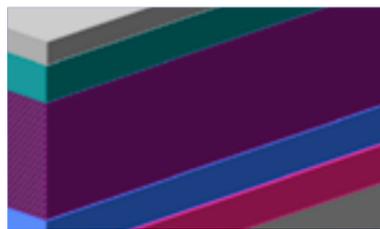
Les hétérostructures de van der Waals sont facilement intégrables dans des nanostructures photoniques, électroniques, magnétiques, mécaniques. Il devient dès lors possible d'optimiser et de contrôler leurs caractéristiques d'émission de lumière et/ou de transport électronique jusqu'à une précision métrologique.

Plus généralement les hétérostructures de van der Waals permettent de concevoir de nombreux dispositifs modèles (sources de photons uniques, diodes électroluminescentes, photodétecteurs, jonctions tunnel magnétiques, ect.), dont le fonctionnement microscopique est contrôlable par un paramètre extérieur (contrainte mécanique, champ électrique, ect.). Un des enjeux majeurs de ce domaine est d'exploiter les spécificités des matériaux de van der Waals (absence de liaisons pendantes, de défauts de paramètre de mailles, phases électroniques et magnétiques variées, interactions coulombiennes exaltées, pseudospin de vallée) pour obtenir de nouvelles fonctionnalités qui ne peuvent être réalisées avec d'autres matériaux plus établis.

GDR HPERO* - PÉROVSKITES HALOGÉNÉES

Le groupement de recherche **Pérovskites Halogénées (HPERO)** est dédié aux pérovskites halogénées. Il propose une approche multidisciplinaire mélangeant à parts égales les aspects fondamentaux et appliqués, de façon à créer une synergie susceptible de faire émerger de nouveaux concepts comme de proposer de nouvelles potentialités en termes d'applications.

* Halide perovskites

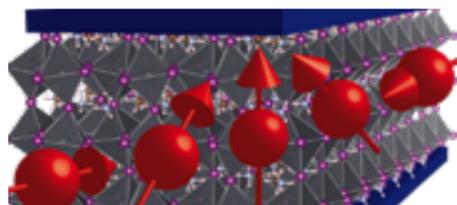
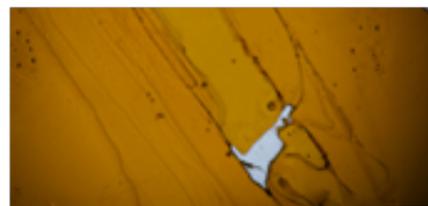


3 thématiques

Ingénierie chimique du matériau

Caractérisation des propriétés structurales, électroniques et optiques du matériau

Le matériau et ses interfaces



150 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **42** laboratoires
(dont 4 laboratoires étrangers)

Coordinatrice : Emmanuelle Deleporte (LuMIn) | emmanuelle.deleporte@ens-paris-saclay.fr
Coordinateurs et coordinatrice adjoints : Jacky Even (FOTON), Claudine Katan (ISCR) et Nicolas Mercier (MOLTECH-ANJOU)

PROSPECTIVES

Les pérovskites hybrides halogénées ont marqué une percée pour le photovoltaïque aux débuts des années 2010, avec un premier rendement certifié dans le diagramme NREL à 14,1 % début 2013. En 2020, le record certifié est de 25,5 %, dépassant ceux des filières silicium films minces ou multicristallines de même que celui de la filière CIGS. L'emploi des pérovskites halogénées dans des architectures de type cellules tandem, notamment avec le silicium, devrait permettre d'atteindre des rendements records de plus de 30 % dans les prochaines années (29,15% a été atteint en décembre 2020 avec une cellule tandem silicium/pérovskite).

Ces rendements records étant obtenus sur de petites surfaces, une mise à l'échelle des procédures de fabrication (up-scaling réussi en 2019 par le CEA-INES pour atteindre 20.3% sur un module de 11.2 cm²) est un enjeu important, d'autant plus que la technologie de dépôt des couches (basse température, en solution) est a priori bien adaptée.

Les problèmes de stabilité (d'origine chimique ou sous illumination) des cellules solaires pérovskites sont un verrou technologique dont la résolution ouvre plusieurs champs de recherche, avec des travaux visant à (i) comprendre les mécanismes sous-jacents que ce soit du point de vue expérimental ou théorique, (ii) développer de nouvelles interfaces incluant des couches tampons de matériaux organiques ou inorganiques, outre la recherche de matériaux transporteurs de trous/d'électrons mieux adaptés, (iii) affiner la composition de la couche pérovskite.

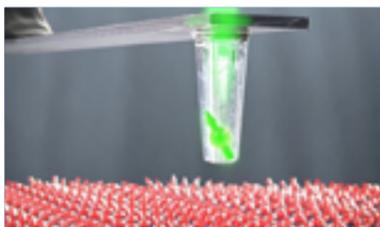
Ces problématiques ont participé à une véritable résurgence de l'intérêt pour les pérovskites en couches, bien connues depuis le début des années

1990 pour leurs propriétés optiques remarquables. Par ailleurs, la communauté internationale s'est également tournée vers les édifices nanométriques comme les îlots quantiques. Ainsi, le champ des perspectives pour les pérovskites halogénées s'est étendu de façon considérable ces dernières années avec :

- un champ d'exploration pour l'ingénierie chimique considérablement élargi : mise en forme (cristaux, films minces, nanostructures), dopage, exploration de nouveaux cations, substitution du plomb, encapsulation, couches d'interfaces dans les dispositifs ;
- une diversification des champs d'applications potentielles : LEDs, diodes lasers, photodétection, transistors à effet de champ, spintronique/spinorbitronique, catalyse et photocatalyse (production d'hydrogène), ect ;
- des besoins croissants en matière de compréhension des propriétés physiques : informations structurales, nature et rôle des défauts, propriétés optiques (excitons, biexcitons), de transport (électronique, de spin) et mécaniques, mécanismes physiques et chimiques aux interfaces. Cette compréhension s'appuie sur des travaux expérimentaux et théoriques, exploitant en grande partie le panel d'outils développés pour les semi-conducteurs « conventionnels » et nécessitant en particulier l'utilisation de grands instruments (neutrons, synchrotron, champs magnétiques intenses, RMN, GENCI).

GDR IQFA - INGÉNIERIE QUANTIQUE, DES ASPECTS FONDAMENTAUX AUX APPLICATIONS

La mission du groupement de recherche **Ingénierie quantique, des aspects fondamentaux aux applications (IQFA)** est de rassembler la communauté française dont les activités de recherche relèvent des technologies quantiques. Tous les supports à l'information quantique sont concernés, que celle-ci soit communiquée, traitée, simulée ou manipulée, individuellement ou collectivement, à l'aide de photons, d'atomes, d'ions piégés, d'électrons, de circuits supraconducteurs, etc.



5 thématiques

Aspects quantiques fondamentaux

Communication quantique et cryptographie

Ordinateur quantique, calculs et algorithmes

Simulation quantique

Métrologie quantique et capteurs



400 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **50** laboratoires

Coordinatrice : Anais Dréau (L2C) | anais.dreau@umontpellier.fr

Coordinateur adjoint : Alexei Ourjountsev (JEIP Collège de France) |
alexei.ourjountsev@college-de-france.fr

PROSPECTIVES

ORGANISATION DU COLLOQUE IQFA'12 À L'ENS LYON

Souhaitant se démarquer de l'axe principal Paris-Grenoble-Nice, le comité IQFA a décidé d'organiser son prochain colloque, IQFA'12, à l'ENS de Lyon en novembre 2021, et d'en confier la gestion à Pascal Degiovanni du Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon (LP-ENS-Lyon). IQFA'12 sera ouvert sur toutes les thématiques qui relèvent du GDR, avec, comme à l'accoutumée, des interventions de type tutoriel et un appel à contributions de type poster et sélection d'une quinzaine d'entre elles pour passage à l'oral, méthodologie ayant déjà fait ses preuves, notamment auprès des jeunes chercheuses, des jeunes chercheurs, ainsi que des doctorants et doctorantes et post-doctorants et post-doctorantes.

RENFORCER L'INTERDISCIPLINARITÉ

L'interdisciplinarité a toujours été l'une des missions principales du comité scientifique IQFA. Il existe aujourd'hui un fort intérêt pour l'organisation de colloques hybrides entre IQFA et les GDR Informatique mathématique (IM) et Physique quantique mésoscopique (MESO). Ces colloques hybrides devraient cibler d'une part les aspects ingénierie quantique développés à partir de systèmes issus de la matière condensée, et d'autre part sur les algorithmes quantiques issus des recherches en informatique et mathématiques théoriques. Les mises en perspectives expérimentales seront bien entendu considérées.

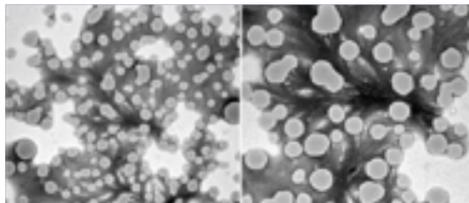
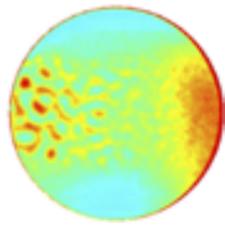
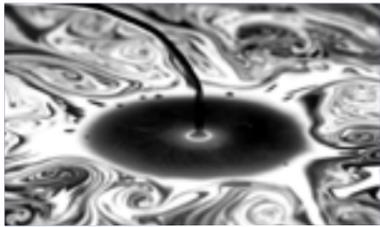
ACTIONS DE FORMATION EN INGÉNIERIE QUANTIQUE

Compte tenu de la pluridisciplinarité de la recherche qui relève des technologies quantiques (physique, mathématiques, chimie, théorie de l'information, matière condensée, matériaux, nanosciences, marketing, etc.), les grands organismes de recherche français, tels que le CNRS et les établissements d'enseignement supérieur, doivent aujourd'hui adapter leur offre de formation afin de proposer des parcours qui permettront de former les futures générations « d'ingénieurs quantiques ». Ce type de formation se doit d'être véritablement transdisciplinaire. Ainsi, le GDR IQFA, avec l'aide de l'Institut de physique du CNRS, compte s'impliquer fortement dans la mise en place d'une offre de formation, pouvant prendre la forme d'une école thématique du CNRS ou d'une action nationale de formation. Les objectifs sont doubles. D'une part, il s'agit de répondre à un besoin grandissant dans les laboratoires CNRS, à la fois auprès des chercheurs et des ingénieurs. D'autre part, il s'agit de répondre efficacement et en amont à la vision de l'Europe en ce qui concerne la formation des futures générations « d'ingénieurs et de chercheurs quantiques ».

GDR ISM - INTERFACIAL SOFT MATTER

La mission du groupement de recherche **Interfacial soft matter*(ISM)** est de souligner l'importance et de comprendre en profondeur la structure et la dynamique des nombreuses formes de matière molle interfaciale. Le GDR ISM est un forum permettant aux communautés françaises et internationales - issues de la physique, de la chimie et de l'ingénierie et utilisant un ensemble divers d'outils expérimentaux, théoriques et informatiques - étudiant le comportement et les interactions de la matière molle aux interfaces de se rassembler et échanger des idées.

*Matière molle interfaciale



5 thématiques

Mécanique des interfaces molles

Surfaces en contact avec des électrolytes

Matière active

Couches fonctionnelles molles

Relations structure/propriétés

200 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **40** laboratoires

Coordinateur : Joshua D. McGraw (Gulliver) | joshua.mcgraw@espci.psl.eu

Coordinateurs et coordinatrice adjoints : Lionel Bureau (LiPhy), Cécile Cottin-Bizonne (ILM), Benjamin Cross (LiPhy) et Vincent Ladmiral (ICGM)

PROSPECTIVES

L'organisation et la dynamique des matériaux souples peuvent être profondément modifiées au voisinage d'une interface car les énergies d'interaction y sont typiquement du même ordre de grandeur que celles impliquées dans le matériau. De même pour le volume, de nombreux matériaux mous et entités biologiques peuvent être décrits comme « constitués d'interfaces » : des systèmes tels que les suspensions de particules ou de gouttelettes sont formés d'objets mésoscopiques interagissant via des forces intermoléculaires et de surface, dont les détails contrôlent les propriétés macroscopiques du matériau .

Les interfaces sont, aujourd'hui, en effet au cœur d'une multitude de problèmes complexes dans la science de la matière molle : de la transcription de l'ADN, au frottement et à la lubrification, en passant par la régulation de charge et les couches fonctionnelles « intelligentes » nécessitant de nouvelles synthèses. De plus, de nombreux systèmes hors équilibre donnent lieu à une mobilité spontanée de particules sans nécessité d'une action extérieure. Tous ces systèmes, du fait de leur regroupement sous le terme « matière molle », portent typiquement les signatures de l'agitation thermique. Le GDR Interfacial Soft Matter (ISM) a été créé pour étudier la combinaison de tous ces aspects.

Les principaux thèmes abordés par ISM constituent un domaine émergent. Les thèmes portant sur la mécanique et les électrolytes, décrivant les aspects d'équilibre mais aussi les aspects dynamiques et structurels de la matière molle interfaciale, sont les axes les plus fondamentaux du domaine de recherche d'ISM. Ces axes fondamentaux sont fortement intriqués avec la matière active ainsi que les applications pratiques, sociétales et industrielles des couches fonctionnelles molles dans le volet relations entre structure et propriétés du GDR. Dans ce volet, les questions liées à la synthèse et aux applications innovantes de la matière molle aux interfaces sont aussi d'intérêts pour nos partenaires industriels.

GDR LEPICE HDE - LASERS ÉNERGÉTIQUES ET INTENSES ET PLASMAS SOUS CONDITIONS EXTRÊMES

La mission du groupement de recherche **Lasers énergétiques et intenses et plasmas sous conditions extrêmes (LEPICE HDE)** est de rassembler la communauté française dont les activités de recherche sont liées aux hautes densités d'énergie. La coordination des échanges permet de concevoir de nouveaux diagnostics ou encore de partager des méthodes de modélisation autour de thématiques relatives aux lasers énergétiques ou intenses, et aux plasmas sous conditions extrêmes.



7 thématiques

Physique des chocs générés par laser, équations d'état sous conditions extrêmes, planétologie, géophysique

Hydrodynamique et transport dans le contexte de la fusion par confinement inertiel (FCI)

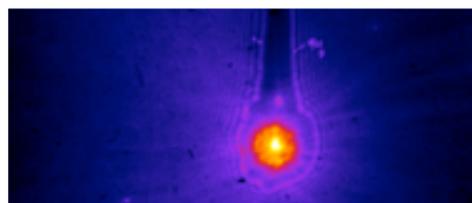
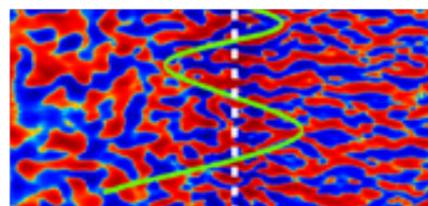
Interaction laser plasma, propagation et absorption des faisceaux laser dans des plasmas chauds et denses

Physique atomique des plasmas denses

Astrophysique de laboratoire

Sources secondaires de rayonnement et de particules accélérées par laser pour leurs applications dans le contexte de la haute densité d'énergie (HDE) et de la physique nucléaire

Avenir et ouverture



150 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **16** laboratoires

Coordinateur : Stefan Hüller (CPhT) | stefan.hueller@cpht.polytechnique.fr

Coordinatrice et coordinateur adjoints : Sylvie Depierreux (CEA-DAM) et

Patrick Renaudin (CEA-DAM)

PROSPECTIVES

Les thématiques du GDR LEPICE (Lasers énergétiques et intenses, plasmas sous conditions extrêmes) couvrent assez largement la physique accessible avec des lasers énergétiques dans le domaine des hautes densités d'énergie (HDE) comme la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement inertiel (FCI), l'astrophysique et de la géophysique.

La recherche sur les états extrêmes de la matière est un sujet fondamental important en raison de ses implications en physique des matériaux, en planétologie, en géophysique, et en astrophysique. Les lasers énergétiques, ainsi que des nouvelles sources de rayonnements de courte longueur d'onde permettent aujourd'hui de diagnostiquer et/ou d'accéder à des pressions qui portent des matériaux dans des états encore inconnus. Il est alors possible d'aller au-delà des compréhensions obtenues à partir des méthodes classiques. L'énergie disponible sur ces installations permet de recréer en laboratoire les conditions extrêmes rencontrées dans l'Univers (supernovae, disques d'accrétion, jets, etc.) et de réaliser des études dynamiques. Les études sur l'hydrodynamique, à la fois expérimentales et théoriques-numériques et réunissant plusieurs groupes dans ce GDR, forment un élément clé dans ce domaine des plasmas sous conditions extrêmes.

Dans le contexte des recherches sur la fusion par laser, FCI, ainsi que dans le contexte des applications en utilisant des lasers (ultra-) intenses, l'interaction laser-plasma est un élément clé pour comprendre le couplage entre des faisceaux laser et une cible, pour pouvoir déterminer l'absorption, la diffusion et la répartition de l'énergie.

Les compétences réunies dans ce GDR permettent d'avancer sur des sujets actuels comme le transfert d'énergie entre faisceaux, l'amplification des impulsions laser.

Les sources de lumière secondaires dues au mouvement collectif d'électrons en champ laser ont un grand potentiel d'application pour la HDE ; les sources d'accélération de protons et d'électrons par laser sont aujourd'hui incontournables pour les expériences en HDE.

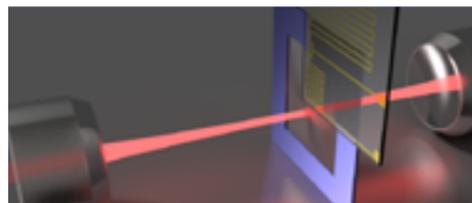
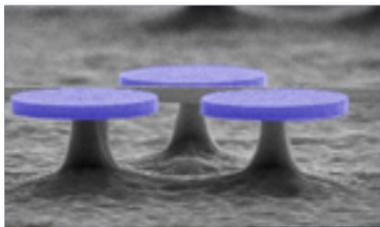
La physique atomique des plasmas denses joue un rôle important pour plusieurs axes définis, notamment dans le transport radiatif et son impact sur l'hydrodynamique du plasma. Les études d'opacités de plasmas fortement corrélées portent sur l'évolution de phénomènes comme les instabilités de Rayleigh-Taylor, chocs radiatifs.

À l'interface entre la physique nucléaire, la physique atomique et la physique des plasmas se trouvent les activités sur les excitations nucléaires par laser, avec l'objectif d'étudier les modifications des états nucléaires dans un milieu ionisé dense et chaud.

Certaines installations dorénavant disponibles en France et dans le monde permettront prochainement d'atteindre des intensités laser qui exposeront le vide et le milieu (plasma !) à des champs extrêmes. Les phénomènes QED s'enchaîneront. Plusieurs groupes de réflexion s'occupent de prévoir la détection et de mettre en évidence de ces événements encore très rares à des intensités prochainement accessibles sur les installations comme Cilex-Apollon.

GDR MECAQ - OPTOMÉCANIQUE ET NANOMÉCANIQUE QUANTIQUES

La mission du groupement de recherche **Optomécanique et nanomécanique quantiques (MecaQ)** est de rassembler la communauté française dont les activités de recherche sont liées à la nanomécanique et à l'optomécanique, notamment dans le régime où les fluctuations quantiques jouent un rôle important. La métrologie, les mesures ultrasensibles ou l'information quantique font partie des sujets de recherche du GDR MecaQ.



11 thématiques

Thermodynamique Quantique

Nanomécanique et optique non-linéaire

Théorie des systèmes nanomécaniques

Capteurs optomécaniques

Optomécanique quantique

Systèmes hybrides

Optomécanique et physique fondamentale

Electro-optomécanique

Nano-fabrication & ingénierie nanomécanique

Micro-/nano-optomécanique dans l'industrie

Nanophononique et transport de phonons

120 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **32** laboratoires

Coordinateur : Pierre-François Cohadon (LKB) | cohadon@lkb.upmc.fr

Coordinateurs adjoints : Daniel Lanzillotti-Kimura (C2N) et Pierre Verlot (LuMIn).

PROSPECTIVES

Les années 2010 ont été marquées par l'émergence de systèmes mécaniques « quantiques », qui désignent littéralement des résonateurs mécaniques d'une sensibilité dont la description de la dynamique nécessite un traitement quantique. Le GDR Optomécanique et nanomécanique quantiques fédère les activités autour de ces thématiques de la mesure et du contrôle quantique à l'échelle macroscopique, avec de nouveaux enjeux et défis extrêmement ambitieux.

ENJEUX ET DÉFIS TECHNOLOGIQUES

Les enjeux technologiques principaux du développement des systèmes mécaniques quantiques accompagnent ceux des technologies quantiques émergentes et s'inscrivent dans la perspective d'une nouvelle génération de capteurs ultrasensibles et de moyens de communication futurs, ainsi que de leur intégration ultra-compacte pour une utilisation généralisée. On peut citer par exemple le développement de convertisseurs opto-électromécaniques cohérents, les systèmes hybrides quantiques (association d'un résonateur mécanique et d'un degré de liberté quantique), les cristaux nano-optomécaniques (qui pourraient être utilisés comme isolants topologiques), les sondes locales nano-optomécaniques, la définition de nouveaux standards métrologiques, etc. Les défis technologiques associés à ces enjeux relèvent essentiellement de la sensibilité de ces systèmes aux effets de la décohérence, qui doivent être minimisés autant que possible.

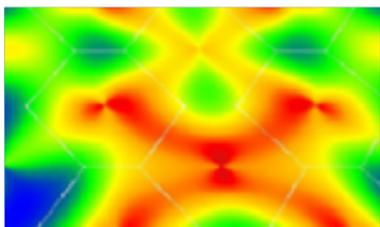
Des progrès très spectaculaires ont été très récemment réalisés dans cette direction, avec l'apparition au cours de l'année 2017 de systèmes nanomécaniques dotés de facteurs de qualités dépassant le milliard à température ambiante. L'élaboration de procédés permettant d'allier de très faibles coefficients de dissipation optique et mécanique reste toutefois un défi qui alimente une recherche intense.

ENJEUX ET DÉFIS FONDAMENTAUX

Les progrès technologiques des systèmes mécaniques ultrasensibles sont également alimentés par des enjeux fondamentaux relevant essentiellement de ce que l'on appelle la « seconde révolution quantique », tels que l'observation et le dépassement des limites fondamentales de sensibilités dans les mesures de déplacement, l'observation de la quantification de l'énergie mécanique à l'échelle macroscopique (et donc la mesure quantique non-destructive du mouvement), la préparation d'états mécaniques macroscopiques non classiques, ou encore l'observation de l'influence de la gravité sur les phénomènes de décohérence quantique. Ces enjeux font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches visant à comprendre les conséquences de ces phénomènes à l'échelle macroscopique, à proposer des protocoles de mesures compatibles avec la théorie quantique, ainsi qu'à modéliser les systèmes se présentant comme les meilleurs candidats.

GDR MEETICC - MATÉRIAUX, ÉTATS ÉLECTRONIQUES, INTERACTIONS ET COUPLAGES NON-CONVENTIONNELS

La mission du groupement de recherche **Matériaux, états électroniques, interactions et couplages non-conventionnels (MEETICC)** est de rassembler la communauté française de scientifiques expérimentateurs et théoriciens, chimistes et physiciens, qui étudie les matériaux présentant des états électroniques et des couplages non-conventionnels. Contrôlées, les propriétés remarquables de systèmes tels que les multiferroïques ou les isolants topologiques pourraient conduire à des ruptures dans le domaine de l'énergie et des technologies de l'information.

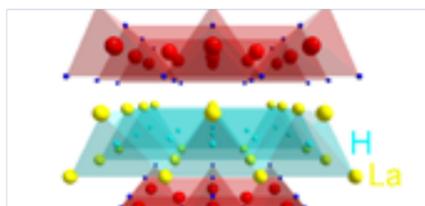


3 thématiques

Propriétés remarquables dans les systèmes à fortes corrélations (magnétisme, supraconductivité)

États électroniques non-conventionnels dans les phases topologiques et les systèmes confinés

Matériaux et propriétés électroniques non-conventionnelles



350 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **45** laboratoires

Coordinateur : Yvan Sidis (LLB) | gdr.meeticc@u-psud.fr
Coordinateur adjoint : Etienne Janod (IMN)

PROSPECTIVES

Les perspectives scientifiques du GDR MEETICC sont présentées selon ses trois axes de recherche.

AXE « SYSTÈMES À FORTES CORRÉLATIONS »

Des avancées récentes impliquent les interactions chirales (Dzyaloshinskii-Moriya), à l'origine de mésostructures magnétiques originales (skyrmions, hopfions). En ce qui concerne la supraconductivité, une forte activité se développe autour des pnictures, chalcogénures et siliciures de fer (découverts en France). La compréhension de leur diagramme de phase, mêlant phases exotiques et supraconductivité non-conventionnelle, pourrait permettre l'identification des mécanismes de supraconductivité. Notons l'émergence de thèmes liés aux états électroniques de surface, hors équilibre, ou associant corrélations électroniques et couplage spin-orbite comme dans les iridates.

AXE « ÉTATS ÉLECTRONIQUES NON- CONVENTIONNELS DES PHASES TOPOLOGIQUES »

Nous entrevoyons des développements concernant les propriétés topologiques des systèmes corrélés (isolants de Mott ; supra à fermions lourds), ou des semi-métaux de Weyl. Par ailleurs, les gaz d'électrons 2D métalliques voire supraconducteurs ouvrent la voie à une électronique émergente et au calcul quantique topologiquement protégé (quasiparticules de Majorana).

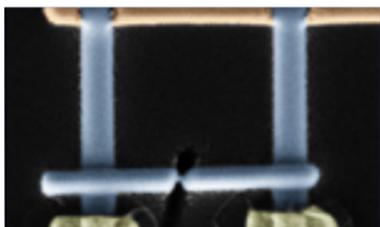
AXE « MATÉRIAUX ÉMERGENTS »

On peut relever le développement des oxyhydrides induisant des états de valence atypiques (Ni^+ , Ru^{2+} , etc.) pouvant conduire à de nouvelles phases, et la prédiction globale de propriétés topologiques, basées sur le groupe d'espace et la théorie des bandes. Enfin, le contrôle des propriétés aux interfaces (multiferroïcité, conversion courant de spin/charge) émerge fortement, et pourrait conduire à de nouvelles hétérostructures, associant isolants topologiques ou ferromagnétisme à propriétés physiques inédites.

Nos recherches bénéficieront des progrès impressionnants des techniques expérimentales utilisant des conditions extrêmes de pression, de température et de champ électrique/magnétique, donnant accès à des régions inexplorées des diagrammes de phases. Soulignons l'essor considérable des techniques ultrarapides (femtoseconde voire attoseconde ; sources XFEL européennes, sources HDD, etc.), donnant accès à de nouveaux états exotiques hors équilibre et permettant de découpler les interactions simultanément à l'oeuvre dans nos systèmes.

GDR MESO - PHYSIQUE QUANTIQUE MÉSOSCOPIQUE

La mission du groupement de recherche **Physique quantique mésoscopique (MESO)** est de fédérer l'activité nationale en physique quantique mésoscopique. Ses thèmes d'activité portent sur le transport électronique cohérent dans les conducteurs de toutes dimensionnalités et nature (systèmes hybrides, isolants topologiques, graphène, supraconducteurs, etc.). Les évolutions récentes portent sur la manipulation des états quantiques dans de tels systèmes, ainsi que sur leur comportement à haute fréquence.



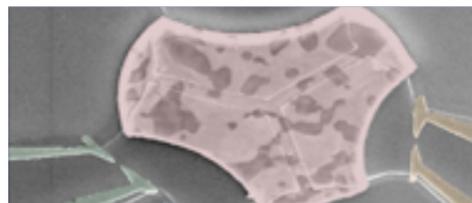
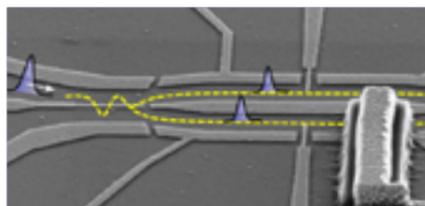
4 thématiques

Transport et manipulation cohérente de charge et de spin

Systèmes hybrides, matière topologique et de Dirac

Systèmes quantiques et environnement

Thermodynamique des systèmes mésoscopiques



320 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **35** laboratoires

Coordinateur : Nicolas Roch (NEEL) | nicolas.roch@neel.cnrs.fr

Coordinateurs adjoints : Hugues Pothier (SPEC) et Xavier Waintal (CEA-Grenoble)

PROSPECTIVES

LES ENJEUX

La thématique générale du GDR MESO est l'étude des propriétés quantiques des conducteurs, principalement par des mesures de transport qui renseignent sur la nature ondulatoire des porteurs de charge, mais aussi par des mesures de bruit de courant qui renseignent sur la nature corpusculaire et donc la statistique des porteurs. Ces dernières années ont vu émerger des techniques de sondes locales (mesures capacitives, mesures de transport tunnel, etc.), des mesures à fréquences finies (pour atteindre le régime où la fréquence de l'excitation est comparable aux fréquences caractéristiques du circuit) et des expériences hybrides combinant optique et transport. La plupart des expériences se font sur des basses énergies (en dessous de la centaine de μeV et à très basse température (10 – 100 mK).

Le GDR reste très axé « physique fondamentale », même si nous restons attentifs aux applications possibles. En particulier, on peut s'attendre à ce que nos travaux aient des conséquences pour l'information quantique. En effet, si la miniaturisation des composants électroniques suit son cours, l'électronique du futur pourrait rentrer dans des domaines où les effets quantiques jouent un rôle important. Toutes les recherches sur les bits quantiques justifiées par la perspective d'un possible ordinateur quantique ont permis de comprendre beaucoup de mécanismes sous-jacents responsables de la perte de cohérence quantique. Un autre point très important est l'émergence de nouveaux types de matériaux ou de la matière topologique. Le graphène en est un exemple flagrant où les progrès réalisés dans la fabrication d'échantillons de haute mobilité ont permis de réaliser des étalons de résistance pour la métrologie basés sur l'effet Hall quantique ne nécessitant pas de refroidissement à l'hélium liquide.

Les enjeux fondamentaux se déclinent sur les 4 axes que nous avons soulignés dans la demande de renouvellement du GDR à savoir :

- le transport et la manipulation cohérente de charge et de spin
- les systèmes hybrides, la matière topologique et de Dirac
- le couplage des systèmes quantiques avec leur environnement
- la thermodynamique des systèmes mésoscopiques

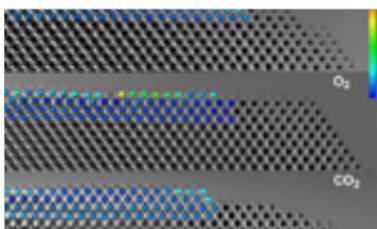
Les moyens théoriques et expérimentaux nouveaux permettent de sonder les systèmes dans des limites jamais explorées, au-delà d'une simple approche perturbative. Un des enjeux de notre GDR est de promouvoir une culture scientifique permettant d'aborder les systèmes quantiques avec une vision transversale, combinant des approches issues des autres communautés.

LES DÉFIS

Les systèmes que nous étudions contiennent naturellement de nombreuses particules en forte interaction. Ainsi, l'un des défis est de résoudre le problème à N-corps, quel que soit le type d'Hamiltonien, dépendant du temps ou non. Ce défi est à la fois théorique et expérimental puisque pour traiter de tels problèmes, il faut combiner de nouveaux outils théoriques et des expériences permettant de sonder des quantités toujours plus complexes.

GDR NANOPERANDO - STRUCTURE ET DYNAMIQUE DES MATÉRIAUX DANS LEUR ENVIRONNEMENT « RÉEL »

La mission du groupement de recherche **Structure et dynamique des matériaux en environnement « réel » (Nanoperando)** est de rassembler les équipes françaises étudiant la dynamique structurale des matériaux dans leurs milieux de formation ou d'application. Si l'analyse *in situ* ou *operando* est développée sur toutes les techniques permettant d'étudier la matière à l'échelle atomique, elle n'en reste pas moins une science très jeune et ses progrès futurs sont conditionnés par l'émergence de synergies interdisciplinaires qui pourraient ouvrir de nouveaux champs d'investigations en sciences des matériaux, mais aussi en sciences de la Terre et du vivant.



5 thématiques

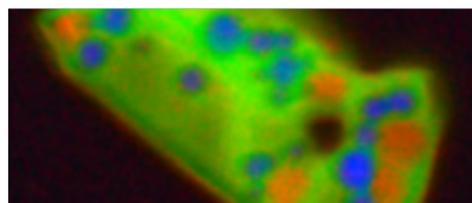
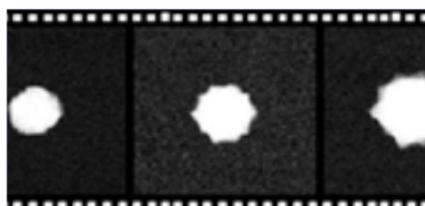
Synthèse, restructuration et auto-assemblage des nanomatériaux

Réactivité des nano-catalyseurs

Réactions électrochimiques

Structure et dynamique des matériaux biologiques dans leur milieu natif

Cycle de vie des (nano)matériaux dans des environnements biologiques ou naturels



260 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **50** laboratoires

Coordinateur : Damien Alloyeau (MPQ) | damien.alloyeau@univ-paris-diderot.fr

PROSPECTIVES

Les objectifs des actions et événements scientifiques du GDR Nanoperando sont multiples :

Stimuler le couplage entre les expérimentateurs (développeurs) des techniques environnementales et les potentiels utilisateurs spécialistes des matériaux, en confrontant les possibilités et limites actuelles des techniques d'analyses environnementales avec les besoins des utilisateurs.

Rapprocher trois communautés d'expérimentateurs (microscopie électronique, microscopie champ proche et techniques synchrotron), qui malgré leurs buts, stratégies et problématiques communs, collaborent encore trop peu. Cette diversité des compétences techniques regroupée au sein du GDR sera un atout essentiel pour couvrir efficacement sa pluralité thématique.

Exploiter la complémentarité des techniques environnementales et initier le développement d'approches corrélatives multi-échelles. Confronter les résultats obtenus avec différentes techniques permettra de mieux comprendre les phénomènes observés *in situ* et les artefacts inhérents à chaque technique (effets du faisceau d'électrons, effet de pointe, interprétation des données synchrotron, etc.). Cette approche facilitera également le transfert des idées, voire

même des technologies entre les techniques. Il est aussi important d'établir des protocoles communs d'acquisition et de traitement des données susceptibles d'être applicables à différentes techniques et expériences.

Identifier et débloquent les verrous techniques freinant l'utilisation des techniques environnementales sur certains types d'échantillons. Compte tenu de la diversité et de la complexité des phénomènes observables, il est indispensable de mettre en place des groupes de travail interdisciplinaires qui connaissent les contraintes instrumentales et les exigences spécifiques liées à la nature des échantillons et à leur environnement.

Coupler l'expérience et la théorie. En parallèle des récents progrès de l'analyse *in situ*, des approches théoriques sont développées pour comprendre les propriétés thermodynamiques des nanomatériaux en interaction avec leur environnement. En rapprochant expérimentateurs et théoriciens, le GDR Nanoperando générera de nouvelles synergies et rassemblera un pôle de compétence indispensable pour interpréter quantitativement des phénomènes dynamiques souvent très complexes.

GDR NS-CPU - NANOSCIENCES EN CHAMP PROCHE SOUS ULTRA VIDE

Un phénomène en nanoscience est un fait physique, chimique, magnétique, mécanique ou optique qui est mesurable par une observation individuelle et directe avec une précision spatiale de l'ordre du picomètre. La mission principale du groupe de recherche **Nanosciences en champ proche sous ultra vide (NS-CPU)** est de fédérer la communauté française dont les activités de recherche « nanosciences » s'appuient sur les techniques de microscopie en champ proche fonctionnant sous ultra vide.



5 thématiques

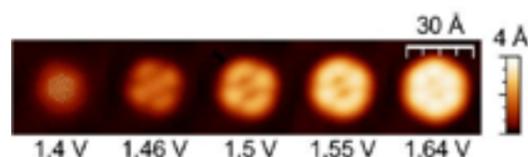
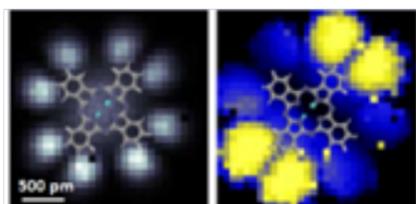
Structure électronique et vibrationnelle de nanostructures et de nano-objets individuels

Interactions lumière-matière à l'échelle du nanomètre

Étude du magnétisme local et d'états quantiques

Propriétés électroniques, électrostatiques et transferts de charge

Concepts théoriques et outils numériques



125 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **20** laboratoires

Coordinateur : David Martrou (CEMES) | dmartrou@cemes.fr

Coordinateurs et coordinatrices adjoints : Jérôme Lagoute (MPQ), Muriel Sicot (IJL), Guillaume Schull (IPCMS), Christophe Brun (INSP), Clemens Barth (CINaM), Sylvie Godey (IEMN), Christian Joachim (CEMES)

PROSPECTIVES

Adossées aux sciences de surface, les nanosciences croisent de nombreux domaines scientifiques et techniques: la nanoélectronique, l'électronique et la mécanique moléculaire, le nanomagnétisme, la physique des semi-conducteurs et des supraconducteurs, la physique et chimie des nano-objets individuels, la catalyse hétérogène, la métallurgie, etc. Les instruments de prédilection pour l'étude des nanosciences sont les microscopies champ proche (STM, STM-photon, STM+champ magnétique, STS, NC-AFM, KPFM) fonctionnant sous ultra vide (UHV), et à différentes températures (4 K, 77 K, 300 K, etc.). Elles permettent d'accéder directement à la topographie de la surface support, mais surtout aux propriétés électroniques, optiques ou magnétiques d'un nano-objet unique, d'une molécule, d'un atome ou d'un état de surface.

STRUCTURE ÉLECTRONIQUE ET VIBRATIONNELLE

La spectroscopie tunnel (STS) donne accès à la structure électronique de la matière jusqu'à l'échelle atomique par des mesures de conductance $I(V)$, $I(Z)$ et différentielles. Cette technique permet de mesurer le spectre électronique de nano-objets individuels (molécules, nanostructures), et aussi de sonder les propriétés électroniques des matériaux de basses dimensionnalités (nanotubes, graphène et autres matériaux bidimensionnels). Les états vibrationnels peuvent être sondés par spectroscopie inélastique aussi bien sur des nano-objets individuels que sur des nanomatériaux.

INTERACTION LUMIÈRE-MATIÈRE

Les propriétés optiques d'un nano-objet unique, tel qu'un plot quantique, une molécule fluorescente ou un atome, dépendent de manière critique de leurs interactions avec leur proche environnement (< 10nm). Différents mécanismes comme un transfert de charge ou d'énergie entre la pointe et le nano-objet peuvent être utilisés pour sonder, modifier ou exacerber les propriétés de ces nano-objets. Les expériences combinant, sous ultra-vide, microscopie à effet tunnel et optique permettent l'observation directe de ces mécanismes. Le développement de techniques impliquant l'utilisation de lasers impulsif, ouvre également la voie à des études de type pompe-sonde permettant de combiner résolution spatiale atomique et résolution temporelle femtoseconde.

MAGNÉTISME LOCAL ET ÉTATS QUANTIQUES

L'étude des propriétés électroniques locales de matériaux massifs, de matériaux de basse dimension, ou de nano-objets individuels présentant un état quantique non trivial (magnétique, supraconducteur, onde de densité de charge ou de spin, isolant de Mott, isolant topologique ou supraconducteur topologique, etc) a connu un essor important avec la mise au point de techniques STM UHV basse température, notamment couplées à un champ magnétique extérieur. Ces techniques permettent d'observer les paramètres d'ordre quantique, les ordres de charge, de spins locaux jusqu'à l'échelle atomique. Des développements instrumentaux récents visent à sonder les excitations électroniques élémentaires résolues en temps et/ou en fréquence (jusqu'à quelques dizaines de GHz).

ÉLECTROSTATIQUE ET TRANSFERT DE CHARGE

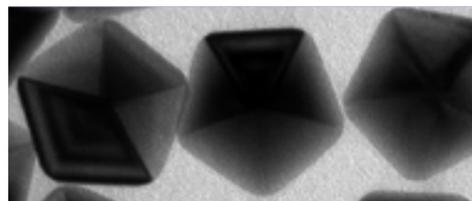
L'étude des phénomènes électrostatiques à l'échelle de la charge élémentaire s'observent en microscopie à force atomique en mode non contact (nc-AFM) couplée à la microscopie à sonde de Kelvin (KPFM). On mesure à la fois la topographie avec une résolution atomique et le potentiel de surface lié aux propriétés électrostatiques (dipôles, charges) et électroniques (travail de sortie, dopage, etc.) de la surface ou du nano-objet unique étudié (une nanoparticule, un nano-îlot, une molécule, un atome, défauts de surface, etc.).

CONCEPTS THÉORIQUES ET OUTILS NUMÉRIQUES

La description des interactions « pointe-surface support » (seule ou avec le nano-objet) comme l'échange, l'électrostatique, le Van der Waals et le magnétique, est à la base de tous les calculs permettant de prévoir et de reproduire les différentes expériences réalisables en champ proche : topographie (STM, NC-AFM), spectroscopies dI/dV , dI/dZ , dZ/dV (STS), $\Delta f/dZ$, $\Delta f/dV$ (NC-AFM/KPFM), manipulation d'un atome ou d'une molécule. L'interprétation des données expérimentales va appuyer le développement et la mise à disposition de codes de calculs basés sur la description quantique et/ou semi-classique de ces interactions.

GDR OR-NANO - L'OR NANOMÉTRIQUE

La mission du groupement de recherche **L'or nanométrique (Or-nano)** est d'animer un réseau de scientifiques dont les recherches concernent les nanoparticules d'or, les films d'or nanométriques ou les nanoparticules d'alliage contenant de l'or. L'or joue un rôle particulier à l'échelle nano du fait de son caractère métallique, de ses propriétés optiques, de sa réactivité et de sa biocompatibilité. Le GDR Or-nano permet des échanges très pluridisciplinaires portant sur la nanophotonique, la plasmonique, la nanoélectronique, la catalyse, la synthèse chimique, la fonctionnalisation chimique, les méthodes de simulation et les thérapies nouvelles.



6 thématiques

Plasmonique avancée et nanoélectronique

Nanoparticules d'or pour la santé : radio-photothérapie et théranostique

Nanoparticules d'or pour l'environnement : couplage plasmonique-catalyse

Théorie et modélisations numériques

Synthèse, fonctionnalisation et réactivité

Enjeux sociétaux divers : vulgarisation, dissémination des connaissances scientifiques, éthique scientifique

400 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **64** laboratoires

Coordinateur : Olivier Pluchery (INSP) | olivier.pluchery@insp.jussieu.fr

Coordinateurs et coordinatrices adjoints : Catherine Louis (LRS), Hazar Guesmi (ICGM), Julien Burgin (LOMA), Nathalie Tarrat (CEMES), Magali Gary-Bobo (IBMM) et Fabienne Testard (NIMBE)

PROSPECTIVES

Le positionnement thématique du GDR Or-Nano est particulier à cause du statut très spécifique des nanoparticules d'or qui relèvent de champs disciplinaires variés tels que la nanophotonique fondamentale, la plasmonique, la réactivité, la fonctionnalisation biochimique, les nouveaux procédés de synthèse chimique, les thérapies avancées, les simulations numériques, etc.

LA PHYSIQUE DES ÉLECTRONS CHAUDS

Les électrons chauds sont des électrons excités fortement au-dessus du niveau de Fermi : soit via un STM, soit par une onde optique ou des faisceaux d'électrons, etc. Les électrons chauds correspondent à des états excités dont la durée de vie est finie, de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes. Ils sont très minoritaires devant les électrons non perturbés et se thermalisent rapidement. Ils sont donc difficiles à détecter. La plasmonique est une voie qui permet d'amplifier l'effet des électrons chauds et qui ouvre un nouveau champ de la physique où se conjuguent optique et physique de la matière condensée. Les nanosystèmes hybrides (métal/semi-conducteur) impliquant des nanoparticules d'or présentent également un grand intérêt à l'heure actuelle puisqu'ils sont à l'origine de la « plexitonique » qui mêle plasmons et excitons. L'étude et l'utilisation de leurs propriétés optiques n'en sont qu'à leurs débuts, et ce nouveau type d'objet présente également des liens forts avec les électrons chauds évoqués précédemment, puisqu'ils permettent d'étudier l'injection d'électrons chauds du métal (excités par la résonance de plasmon) dans la sous-partie semi-conductrice du nanosystème.

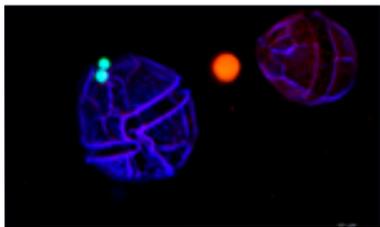
PLASMONIQUE, NANOTHERMIQUE ET PLASMONIQUE QUANTIQUE

La plasmonique permet de manipuler le champ proche optique en jouant sur des effets d'antennes et de concentrer le champ sur des dimensions bien inférieures à la longueur d'onde. Les nanoparticules d'or sont également de plus en plus utilisées comme nanosources de chaleur contrôlables optiquement. Elles permettent notamment l'étude des phénomènes thermiques aux petites échelles. La plasmonique quantique quant à elle se situe très largement dans la continuité des travaux réalisés jusqu'à présent en plasmonique non linéaire mais permet d'envisager une optique quantique relativement intégrée à long terme. Du point de vue de la plasmonique non linéaire classique, les efforts se portent sur l'optique non linéaire multipolaire et ses applications, notamment pour le sensing.

Par ailleurs, les liens de laboratoires avec l'entrepreneuriat sont en train de se tisser progressivement, notamment du fait de l'aspiration de nombreux docteurs à créer des start-ups, soutenus de plus en plus souvent par des chercheurs permanents. Sur la période 2017-2020, Or-nano a côtoyé une dizaine de start-ups telles que Cybernano, SmartForce, Ugiel, WatchLive, NanoLike, Daumet, Bichromatics dans des domaines très variés où chaque fois l'or nanométrique joue un rôle clé. C'est un renouveau très profond des partenariats possibles public-privé qui permettra certainement de contourner la frilosité des grandes entreprises à établir un dialogue avec le monde académique. Il faut accompagner encore davantage cette aspiration.

GDR P&O - POLYMÈRES ET OCÉANS

La mission du groupement de recherche **Polymères et Océans (P&O)** est de rassembler la communauté française travaillant sur le devenir des plastiques en milieu aquatique dans le but de favoriser l'émergence de nouvelles recherches interdisciplinaires sur ce sujet. L'atout majeur du GDR P&O est de mobiliser toutes les communautés scientifiques concernées : chimistes, physiciens, biologistes, écologues, écotoxicologues, océanographes, économistes et sociologues pour soutenir le développement d'approches multi-échelles et transdisciplinaires.

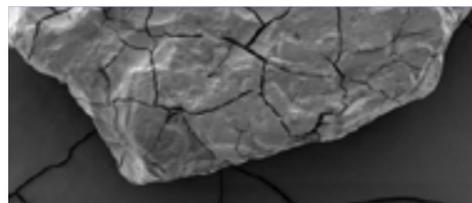


3 thématiques

Les plastiques : de leur entrée dans l'environnement à leur devenir ultime

Impacts des plastiques et risques à long terme

Les pistes pour le futur



240 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **50** laboratoires

Coordinatrice : Pascale Fabre (L2C) | pascale.fabre@umontpellier.fr

Coordinateur et coordinatrices adjoints : Matthieu George (L2C), Fabienne Lagarde (IMMM), Ika Paul-Pont (LEMAR)

PROSPECTIVES

LES PLASTIQUES : DE LEUR ENTRÉE DANS L'ENVIRONNEMENT À LEUR DEVENIR ULTIME

Quelles sont les quantités apportées par chacune des sources de contamination (rivières, fleuves, côtes, mer) ? Quel est le véritable niveau de contamination des océans (surface, colonne d'eau, fonds marins, sédiments) et comment modéliser le cycle du plastique en tenant compte du continuum terre-mer jusqu'aux abysses ? De nouveaux protocoles scientifiques doivent être mis au point pour tenir compte de toutes les échelles allant des macro, aux micro et nanoplastiques. De nombreuses connaissances fondamentales sur le comportement et le devenir ultime des plastiques dans l'environnement restent à acquérir. Afin d'évaluer les temps de dégradation des polymères dans un milieu aussi complexe que l'environnement, il est plus que jamais nécessaire de comprendre les liens entre leurs propriétés structurales et/ou morphologiques et leurs processus de (bio)dégradation et de fragmentation.

IMPACTS DES PLASTIQUES ET RISQUES À LONG TERME

Quels sont les impacts de l'accumulation des plastiques dans le milieu aquatique sur les organismes et le fonctionnement des écosystèmes ? Comment les micro et nanoplastiques ainsi que les contaminants associés interagissent-ils avec les enveloppes cellulaires et quelles sont leurs capacités de transfert au sein des tissus et des cellules ? La toxicité des micro-plastiques réside

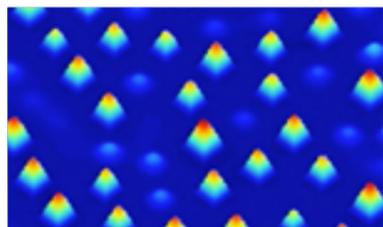
dans le fait qu'ils se composent d'un mélange complexe et dynamique de polymères et d'additifs, auquel les matières organiques et les contaminants chimiques et biologiques peuvent de plus se lier. Les mécanismes de colonisation et de formation du biofilm, le rôle des plastiques dans la vectorisation d'espèces, la biodégradabilité des polymères sont autant de sujets qui doivent être approfondis. Prenant en compte la grande diversité des plastiques et la complexité du milieu naturel, la recherche menée en laboratoire doit également se doter d'une dimension écosystémique.

LES PISTES POUR LE FUTUR

Quelles sont les solutions à privilégier pour le futur ? Comment une communauté scientifique interdisciplinaire peut-elle répondre à cette demande sociétale, environnementale, économique et politique ? Il est nécessaire dans les années à venir de pouvoir proposer des polymères innovants alternatifs, dont la biodégradabilité pourra être contrôlée en jouant sur leur physico-chimie, et dont on anticipera, dès leur conception, le devenir et les impacts potentiels en fin de vie. Pour tenir compte de la dimension sociale et économique du problème de la pollution plastique des océans, les questions relatives à la mise en place de nouveaux modèles économiques et à la perception des enjeux environnementaux par la société seront aussi posées.

GDR PULSE - PROCESSUS ULTIMES EN ÉPITAXIE DE SEMI-CONDUCTEURS

La mission du groupement de recherche **Processus ultimes en épitaxie de semi-conducteurs (PULSE)** est de rassembler la communauté française travaillant sur l'épitaxie de systèmes à base de semi-conducteurs, afin d'appréhender de façon globale les difficultés liées aux processus de croissance, les procédés innovants développés, les nouvelles directions suivies et les questions ouvertes, tant au niveau théorique qu'expérimental.



8 thématiques

Modélisation et couplage entre théorie et expérience

Intégration monolithique hétérogène et hétéroépitaxie sur silicium

Organisation sur substrat fonctionnalisé et nanostructuré, croissance sélective et épitaxie latérale

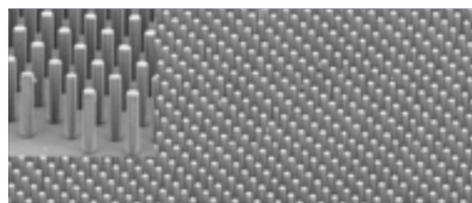
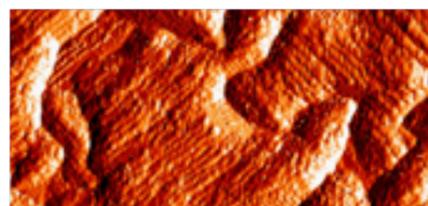
Caractérisations ultimes : locales, microscopiques et globales

Nouvelles techniques instrumentales liées à l'épitaxie (contrôle de croissance, analyses de surface *in situ* etc.) et nouveaux systèmes (couplage, clusters etc.)

Propriétés (optiques, électroniques, etc.) des systèmes épitaxiés et applications

Nouveaux matériaux semiconducteurs (oxydes, organiques) et nouveaux systèmes (1D, 2D, cœur-coquille, etc.)

Nanofils



315 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **33** laboratoires

Coordinateur : Jean-Noël Aqua (INSP) | jean-noel.aqua@insp.jussieu.fr

Coordinatrices adjointes : Isabelle Berbezier (IM2NP) et Chantal Fontaine (LAAS)

PROSPECTIVES

L'épitaxie n'a cessé depuis des décennies de produire des découvertes fantastiques associées à de nombreux prix Nobel : développement de l'épitaxie par jet moléculaire (MBE), invention du transistor, effet tunnel, effet Hall, spintronique, magnétorésistance géante, diodes LED bleues, isolants topologiques, etc. Aujourd'hui, de nouveaux besoins apparaissent tant en recherche fondamentale qu'industrielle, pour différentes applications et matériaux, en nanoélectronique, photonique, technologie de l'information, photovoltaïque, etc. Les défis portent sur le contrôle en termes de croissance et de propriétés, d'objets aux échelles atomiques « ultimes ». Si l'élaboration par épitaxie de matériaux de grande qualité est atteinte pour des couches nanométriques, les nouvelles applications portent sur des géométries plus complexes, nanofils, boîtes quantiques, nanomembranes, matériaux 2D.

Les enjeux liés à la technique d'épitaxie sont multiples. Le développement de techniques *in situ* en temps réel ou dans la même chaîne de vide, constitue une réelle rupture pour l'élaboration. La microscopie électronique en transmission *in situ* devrait ainsi permettre l'observation en direct de la croissance à l'échelle atomique, quand les techniques d'analyse chimique devraient donner des cartographies à ces mêmes échelles. Les nouvelles lignes de synchrotrons et de sources « extrêmement brillantes », ouvrent la perspective de caractérisation fine des nano-objets, et d'analyse du couplage structures/propriétés (optiques et électroniques) pouvant conduire à de nouveaux systèmes.

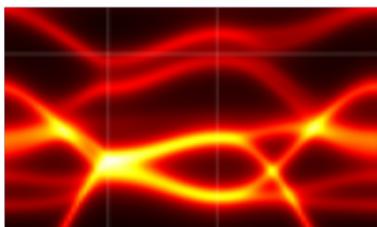
Les enjeux concernant les mécanismes de croissance concernent la compréhension et le contrôle de l'interaction physico-chimique matériau/substrat, ainsi que de la sélectivité et localisation de la croissance avec d'importantes perspectives d'intégration monolithique. Un objectif est d'accéder à la fabrication directe de nano-objets sur des substrats nanostructurés ou nanofonctionnalisés.

Le contrôle de l'épitaxie suppose aussi un renforcement du lien entre théorie et expérience, via la prise en compte d'une complexité suffisante. La modélisation des mécanismes hors-équilibre, le calcul par fonctionnelle de la densité (DFT) des propriétés optiques, électroniques ou de transport, ou le développement de nouvelles approches de type multi-échelle, révèlent le besoin d'une description réaliste prenant en compte la complexité des phénomènes.

Enfin, de réelles opportunités s'ouvrent avec l'interaction avec d'autres communautés, comme celle des matériaux 2D (graphène, silicene, etc.). Si leur production top-down est bien connue, elle aboutit à des systèmes trop limités. L'épitaxie de Van der Waals de matériaux 2D par jet moléculaire (MBE) ou en phase vapeur (CVD) ouvre la possibilité de croissance de films et hétérostructures pleine plaque, ouvrant le champ des applications à ces matériaux uniques.

GDR REST - RENCONTRES DE SPECTROSCOPIE THÉORIQUE

La mission du groupement **Rencontres de spectroscopie théorique (REST)** est de fédérer au niveau national la communauté des « théoriciens » et « simulateurs » des états excités électroniques (de valence et de cœur). Il a pour vocation de faire rencontrer et échanger des chercheurs théoriciens autour d'un double objectif (et dénominateur commun) : i) développement de la théorie des états excités électroniques ; ii) modélisation des matériaux réalistes, (matériaux massifs, surfaces, molécules et nanostructures) ayant un fort intérêt technologique.



6 thématiques

Développements fondamentaux au-delà de la théorie des perturbations

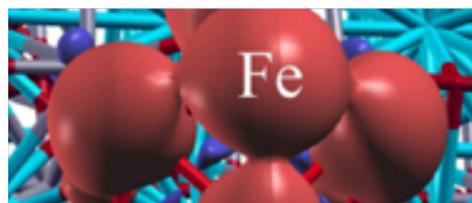
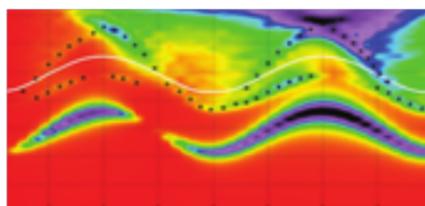
De l'écrantage aux spectroscopies

Approches efficaces pour la spectroscopie

Chimie quantique et physique de l'état solide

Excitations de valence et excitations de cœur

Corrélation fortes et corrélation faibles



150 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **52** laboratoires

Coordinateur : Francesco Sottile (LSI) | francesco.sottile@polytechnique.edu

PROSPECTIVES

TECHNIQUES EN TEMPS RÉEL

Le développement de techniques en temps réel (par opposition au domaine des fréquences en réponse linéaire), en particulier dans le cadre des théories de la fonction de Green, a été l'un des résultats récents de la communauté des excitations électroniques. Les membres du GDR REST sont très impliqués dans ces développements importants afin de contribuer à expliquer des expériences passionnantes réalisées récemment.

AU-DELÀ DES APPROCHES PERTURBATIVES

Les développements conçus dans le cadre du GDR REST permettent aujourd'hui d'aller au-delà de la théorie des perturbations au premier ordre (en termes de potentiel externe, d'écrantage, etc.), et donc de s'attaquer à des systèmes plus compliqués, ou à des excitations complètement nouvelles (satellites en photoémission, par exemple). Un tout nouveau scénario s'ouvre donc dans ce domaine, qui nécessite une investigation théorique profonde à un niveau très fondamental.

VERS DE NOUVELLES SPECTROSCOPIES

Le développement *ab initio* de la fonction d'écrantage au-delà de l'approximation dipolaire et avec l'inclusion d'effets excitoniques a ouvert la voie à de nouveaux effets (satellites excitoniques en photoémission), à de nouvelles spectroscopies (diffusion inélastique cohérente des rayons X), et surtout à de nouvelles idées (comme la condensation d'excitons) à exploiter dans un avenir proche par l'ensemble de la communauté REST.

DÉFIS AMENÉS PAR DE NOUVELLES EXPÉRIENCES

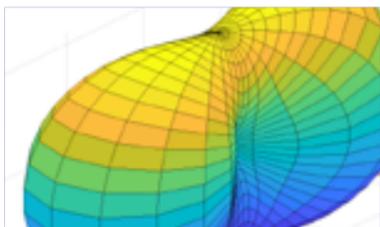
Les quatre dernières années ont été témoins d'énormes progrès du côté expérimental. Nouvelles directions, stratégies et investissements vont influencer largement le développement de la théorie.

L'interaction laser-matière a été largement étudiée dans les dernières décennies, en particulier dans les atomes et les molécules. En revanche, ce n'est clairement pas le cas pour un cristal. Jusqu'à très récemment, il n'était pas possible de laisser un solide interagir avec des lasers puissants sans détruire l'échantillon. Ce n'est qu'en 2011 que l'on a pu observer la génération d'harmoniques élevées dans un solide de ZnO, ouvrant de toutes nouvelles possibilités. Ce champ passionnant doit être abordé de plusieurs côtés et nécessite une communauté variée et compétente (plutôt qu'un groupe) pour allier compréhension et efficacité.

La nécessité d'une contrepartie théorique à de nouvelles expériences plus complexes aura une importance cruciale dans quelques années, lorsque la nouvelle génération de synchrotrons verra la lumière partout dans le monde. En fait, des synchrotrons importants fermeront (à partir de 2019) pour un « upgrade » (ESRF, Spring8, Argonne, etc.). L'objectif : acquérir une résolution, une cohérence et par conséquent, une capacité sans précédent à effectuer des découvertes et des analyses nouvelles et passionnantes.

GDR THEMS - DYNAMIQUE QUANTIQUE DANS LES SYSTÈMES MOLÉCULAIRES

L'objectif du groupement de recherche **Dynamique quantique dans les systèmes moléculaires (THEMS)** consiste à développer des approches théoriques raffinées et performantes afin de répondre aux défis scientifiques posés par la physico-chimie en milieu froid et ultra-froid, l'interaction avec des champs intenses, l'information quantique, la nanophysique, l'environnement, et la biophysique. THEMS s'emploie aussi à susciter des initiatives de formation en direction des jeunes chercheurs-euses, à renforcer et stimuler les collaborations entre les physiciens-ennes théoriciens-ennes, ainsi qu'à maintenir le lien indispensable avec les développements expérimentaux.

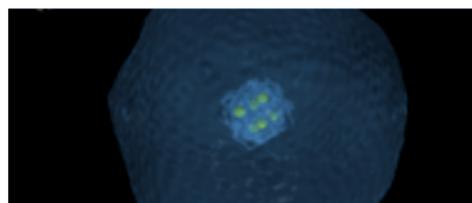
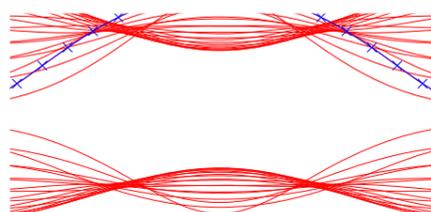


3 thématiques

Systèmes moléculaires isolés

Systèmes moléculaires en présence de champs électromagnétiques intenses

Systèmes moléculaires environnés



75 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **25** laboratoires

Coordinateur : Thierry Stoecklin (ISM) | thierry.stoecklin@u-bordeaux.fr

Coordinatrice et coordinateur adjoints : Nadine Halberstadt (LCAR) et Olivier Dulieu (LAC)

PROSPECTIVES

Les méthodes théoriques de la physique atomique et moléculaire et de la physico-chimie sont employées dans une grande variété de contextes qui impliquent la connaissance de la structure et de la dynamique de systèmes quantiques à nombre fini (de deux à plusieurs dizaines) de corps isolés en phase gazeuse, soumis à des champs électromagnétiques externes, ou encore influencés par leur environnement.

Le développement des théories et modèles ainsi que l'accroissement continu des moyens de calcul informatique qui l'accompagne permettent de traiter de plus en plus précisément la dynamique du système complexe à N-corps (composé typiquement de quelques noyaux et électrons) que constitue un édifice moléculaire isolé. Mais l'environnement dans lequel ces molécules sont plongées induit une complexité supplémentaire le plus souvent hors de portée de ces méthodes. La complexité de ce type de systèmes réside non seulement dans le nombre de particules impliquées, mais aussi dans la diversité des interactions mises en jeu, la présence des effets quantiques, l'effet d'un environnement et la spécificité de la réponse du système à l'excitation par des impulsions lumineuses externes.

Le traitement de ces problèmes requiert la mise en œuvre de méthodes théoriques et le développement de modèles originaux et très variés, ainsi que de logiciels originaux et l'utilisation de programmes commerciaux. C'est le défi scientifique qui rassemble les acteurs du GDR THEMS, qui se résume au travers de plusieurs questions :

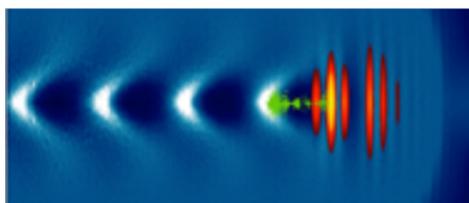
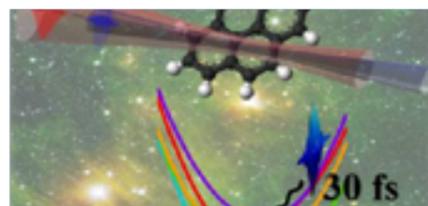
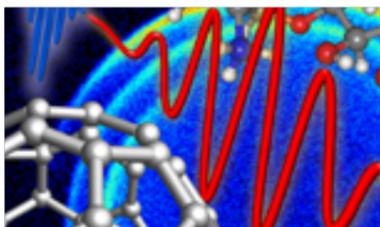
- Dans quelle mesure la connaissance précise des systèmes quantiques à petit nombre de corps peut-elle être transférée à des systèmes à N-corps ?
- Quel équilibre doit être trouvé entre les approches « tout quantique », et les approches classiques ou semi-classiques ? Dans quelle mesure ce changement de paradigme est-il associé à une taille particulière du système étudié ?
- Quel renouveau peut-on espérer des méthodologies établies parfois depuis de nombreuses années, et qui ont bénéficié continuellement des développements des capacités de calcul ?

Enfin, notre champ de recherche tout entier commence à explorer un changement de paradigme en programmation résultant de l'extension des ordinateurs parallèles basés sur GPU ou localisés dans les centres de calcul. En particulier, il n'est pas garanti que la mise à disposition des ressources informatiques actuellement nécessaires à la thématique (méthodes peu parallélisables, mémoire partagée, etc.) demeurent pérennes dans les centres de calcul. Le développement de l'intelligence artificielle et l'apparition attendue d'un ordinateur quantique sont deux autres grandes sources d'évolution futures de nos disciplines que nous espérons accompagner en proposant notamment des formations appropriées dans chacune de nos thématiques.

GDR UP - ULTRAFAST PHENOMENA

La mission du groupement de recherche **Ultrafast phenomena*(UP)** est de rassembler la communauté française des expérimentateurs et théoriciens qui étudie la matière dans tous ses états à des échelles de temps ultracourtes : attoseconde, femtoseconde, picoseconde.

* Phénomènes ultrarapides



7 thématiques

Sciences Attosecondes

Systèmes en phase gazeuse, de l'atome à la molécule complexe

Femtochimie et Femtobiologie en phase condensée

Dynamique ultrarapide dans les Matériaux et les Nanostructures

Sources secondaires de rayonnement : photons, électrons, protons

Instrumentation & Données

Communication

500 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **50** laboratoires

Coordinateur : Franck Lépine (ILM) | franck.lepine@univ-lyon1.fr
Coordinateur adjoint : Lionel Poisson (LIDYL) | lionel.poisson@cea.fr

PROSPECTIVES

DES SOURCES COMPACTES DE RAYONNEMENTS ULTRABREFS

La communauté des phénomènes ultrarapides est en forte évolution notamment en raison de l'émergence de nouvelles sources laser et des sources secondaires qui en découlent. Ces dernières, très compactes, possèdent des performances remarquables qui permettent de renouveler les moyens de sonder la matière et d'envisager des expériences complexes, à l'échelle du laboratoire. L'interaction laser-matière permet le développement de sources secondaires ultrabrèves très variées : (i) sources de particules femtoseconde (électrons, protons) pour des applications en imagerie ultrarapide ou dans le médical (radiobiologie), mais aussi (ii) sources de rayonnement UV-X attoseconde ou source de rayons X femtoseconde, pour les études de la matière dense et chaude par exemple. Plus globalement, l'émergence de sources haute-cadences (kHz et MHz) explorant une large gamme spectrale allant du THz aux rayons X, est cruciale pour nombre d'applications. Avec des groupes de recherche et des industriels de tout premier plan, la France a les atouts pour compter dans ce domaine.

LA PHYSIQUE ATTOSECONDE : L'ACCÈS AUX ÉCHELLES DE TEMPS ULTIMES

La physique attoseconde est un domaine dans lequel la France est un des pionniers et leaders. Un des enjeux actuels est la compréhension de la dynamique de petits systèmes quantiques aux échelles de temps sub-fs qui va nécessiter le développement d'expériences où toutes les particules sont mesurées en coïncidence, donnant accès à des mesures de très haute précision (dynamique de cohérence, phases quantiques de diffusion électronique). Le domaine évolue également vers l'étude d'objets complexes (biomolécule, complexe moléculaire). Là aussi le rapprochement des intérêts des communautés sera essentielle. Après un essor particulièrement fécond en matière diluée, les sciences attosecondes abordent désormais la matière condensée pour s'intéresser à la phase solide (topologie), ou liquide (solvatation). Le futur s'inscrit dans une interdisciplinarité accrue et il apparaît déjà des liens avec l'astrochimie (stabilité des HAP en milieux interstellaires) ou la biochimie (transfert de charge, chiralité). La possibilité récente de générer des impulsions attosecondes aux LEL (FERMI, LCLS, XFEL) ouvre égale-

ment de nouvelles opportunités à saisir. Avec la complexité croissante des protocoles expérimentaux et des systèmes étudiés, de nouvelles méthodes théoriques se développent, à la fois pour aider à l'interprétation des mesures mais aussi pour préparer en amont les expériences.

LES SYSTÈMES MULTI-ÉCHELLES ET HÉTÉROGÈNES EN PHOTOCHEMIE ET PHOTOBIOLOGIE

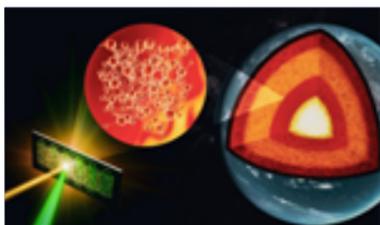
L'enjeu ici est de comprendre les architectures moléculaires photo-actives de complexité croissante mettant en jeu une succession d'actes élémentaires photo-induits impliquant des échelles spatio-temporelles multiples (commutation de protéines fluorescentes, transfert de ligands dans les hémoprotéines, photo-actuation et assemblage supramoléculaires photoactifs, etc.). De nouvelles approches liées à l'interaction de molécules aux interfaces de solides métalliques ou semi-conducteurs se développent également, en lien avec la photocatalyse, la plasmonique chimique, le photovoltaïque. L'arrivée à maturité des techniques de spectroscopie ultrarapide multidimensionnelle (IR, UV) ouvre de nouvelles perspectives pour étudier ces systèmes complexes.

NANOPHYSIQUE (HAUTEMENT) NON-LINÉAIRE ET OBJETS HYBRIDES

L'emploi conjoint de sources optiques femtosecondes traditionnelles, de sources THz et de rayons X impulsives permet d'aborder de nombreux phénomènes physiques hors-équilibre et non-linéaires. De nouveaux matériaux montrent des dynamiques ultra-rapides et non-linéaires impliquant les électrons, les spins et les phonons. Citons les propriétés remarquables des multiferroïques, des hétérostructures de type Van der Waals (matériaux 2D) ou bien la conversion spin-charge dans les nanostructures hybrides. Ces phénomènes alimentent les avancées dans les domaines de l'électronique et spintronique, la plasmonique ou le photovoltaïque. À noter que ces progrès sont possibles grâce au développement constant de nouvelles techniques comme les sources d'électrons déclenchées par ionisation de nanopointe sous laser femtoseconde, les expériences de photoémission et de microscopie électronique résolues en temps développées au sein de nos laboratoires français.

GDR XFEL - SCIENCE AUTOUR DES XFEL

La mission du groupement de recherche **Science autour des XFEL (XFEL)** est de fédérer la communauté française des chercheurs impliquée dans l'utilisation des lasers à électrons libres (FEL) émettant dans le domaine des rayons X. À l'interface de la physique, de la chimie et de la biologie, le GDR XFEL vise à partager les savoir-faire et à maintenir la communauté à jour sur l'évolution rapide des possibles dans ces installations.



5 thématiques

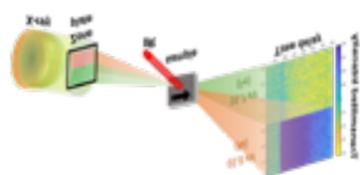
Physique de la Matière Condensée

Atomes et Molécules en phase diluée

Haute densité d'énergie

Photochimie

Biologie structurale



120 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **35** laboratoires

Coordinateur : Marc Simon (LCPMR) | marc.simon@sorbonne-universite.fr

Coordinateur adjoint : Jacques-Philippe Colletier (IBS) | jacques-philippe.colletier@ibs.fr

PROSPECTIVES

Les (X)-FEL sont de grands instruments produisant des impulsions de lumière (UV ou X) ultra-brèves caractérisées par une brillance de 9 ordres de grandeur plus élevée que les synchrotrons de quatrième génération. De telles installations sont présentes en Allemagne, aux États-Unis, au Japon, en Italie, en Suisse, en Corée du Sud et bientôt en Chine. La brièveté (5-100 fs), l'intensité (10^{10} - 10^{12} photon/impulsions) et la haute focalisation (0.1-20 μm) des impulsions, ainsi que les gammes étendues d'énergie de photon accessibles (des XUV aux X durs) permettent la réalisation d'expériences innovantes, jusqu'ici impossibles avec d'autres sources de rayonnement. Les thématiques scientifiques concernées vont de la physique de la matière condensée à la géoscience, en passant par l'astrophysique de laboratoire et les plasmas, la photochimie, la physique atomique et moléculaire et la biologie structurale. Les caractéristiques uniques des impulsions lumineuses permettent, dans chacun des domaines évoqués, de réaliser des expériences résolues en temps et d'étudier la dynamique des systèmes jusqu'à des échelles de temps ultra-courtes.

Un nombre grandissant de chercheur-se-s français-es est donc utilisateur des XFEL, avec plusieurs projets internationaux portés par le CNRS, le CEA et les universités.

La communauté XFEL est spécifique, en ce qu'elle rassemble – et parfois pour la même expérience – des physicien-ne-s, des chimistes, des géologues, des astrophysicien-ne-s, des ingénieur-e-s matériaux et des biologistes, tou-te-s motivé-e-s par la conduite d'expériences à la limite des possibles pour répondre à des questions scientifiques restées jusqu'ici sans réponse. Bien que les thématiques scientifiques des utilisateurs XFEL soient très diverses, les verrous expérimentaux rencontrés sont souvent similaires, ce qui explique le développement d'une culture commune, fondée sur l'échange et le développement de méthodes d'acquisitions et/ou d'analyses de données. Le but premier du GDR « Science avec les XFEL » est ainsi la création d'un espace privilégié, qui permette à ces échanges de savoir-faire d'aller au-delà du confidentiel, profitant ainsi au plus grand nombre. Cette fédération des acteurs-partenaires et des savoirs est indispensable pour étendre la communauté et renforcer la compétitivité des équipes françaises.

Le GDR se réunira en plénier une fois tous les 2 ans. Une école sera organisée tous les 2 ans. Des réunions ateliers thématiques seront organisées régulièrement.

Photo de couverture : Prototype de puce Cat-Qubits mise au point par la start-up Alice & Bob qui développe un ordinateur quantique à Qubits à auto-correction (appelé Cat-Qubits). Le qubit est l'unité de stockage de l'information qui indique la force de calcul des ordinateurs quantiques. Alice & Bob a été cofondée en février 2020 par Théau Peronnin, président, issu du Laboratoire de physique de l'ENS Lyon et Raphaël Lescanne, directeur technique, issu du Laboratoire de physique de l'ENS Paris. Elle vise à augmenter considérablement la puissance de calcul avec des Cat-Qubits permettant un calcul quantique tolérant aux pannes et pouvant exécuter n'importe quel algorithme quantique. L'ordinateur quantique sera en effet capable de réaliser des calculs parallèles, en simultané, et avec une extrême rapidité, irréalisables avec les ordinateurs classiques actuels. Ils pourraient révolutionner de nombreux secteurs industriels, de la santé à la chimie, en passant par l'industrie, la sécurité informatique ou encore l'énergie. © Hubert RAGUET / Alice & Bob / LPENS / CNRS Photothèque

INSTITUT DE PHYSIQUE

3, rue Michel-Ange 75016 Paris

inp.cnrs.fr

Conception : Jean-Marc Greneche et Linda Salvaneschi

Impression : CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

Avril 2021

