



INP

**LES GROUPEMENTS
DE RECHERCHE
DE L'INSTITUT DE
PHYSIQUE EN 2022**



TABLE DES MATIÈRES

Édito	3
ADN&G - Architecture et dynamique du noyau et des génomes	4
BIOCOMP - Implémentations matérielles du calcul naturel	6
CHALCO - Matériaux chalcogénures : Recherche, Développement et Innovation	8
COHEREX - Science with coherent X-rays at 3rd and 4th generation synchrotron sources	10
COMPLEXE - Contrôle des ondes en milieu complexe	12
ELIOS - Effets non-linéaires dans les fibres optiques	14
EMIE - Edifices moléculaires isolés et environnés	16
GAZ QUANTIQUES	18
HoWDi - Hétérostructures de van der Waals de matériaux de basse dimensionnalité	20
HPERO - Halide perovskites	22
IAMAT - Intelligence artificielle en sciences des matériaux	24
IDE - Interaction, désordre, élasticité	26
IQFA - Ingénierie quantique, des aspects fondamentaux aux applications	28
ISM - Interfacial soft matter	30
LEPICE HDE - Lasers énergétiques et intenses et plasmas sous conditions extrêmes	32
MecaQ - Optomécanique et nanomécanique quantiques	34
MEETICC - Matériaux, états électroniques, interactions et couplages non-conventionnels	36
MESO - Physique quantique mésoscopique	38
NANOPERANDO - Structure et dynamique des matériaux dans leur environnement « réel »	40
NS-CPU - Nanosciences en champ proche sous ultra vide	42
Or-nano - L'or nanométrique	44
P&O - Polymères et océans	46
REST - Rencontres de spectroscopie théorique	48
THEORIE & CLIMAT - Défis théoriques pour les sciences du climat	50
UP - Ultrafast phenomena	52
XFEL - Sciences avec les XFEL	54



Thierry Dauxois,
directeur 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 et chercheuses, enseignants-chercheurs et enseignantes-chercheuses, (post)

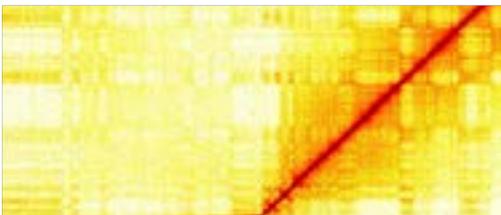
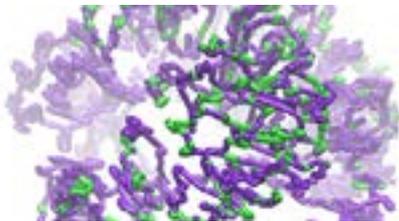
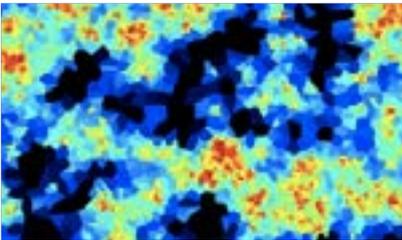
doctorants et (post)doctorantes, ingénieurs et ingénieures relevant d'unités du CNRS, ainsi que des partenaires institutionnels tels que les universités, le CEA, l'Inserm, l'INRAé ou l'Ifremer, et des industriels. Les principales missions d'un GDR consistent à animer une communauté thématique souvent pluridisciplinaire, avec la volonté de s'ouvrir à de nouveaux partenaires, de développer les échanges entre scientifiques au sein du réseau de laboratoires impliqués, et de mettre en place des projets scientifiques aux échelles nationale, européenne ou internationale. Il est sur ce point tout-à-fait possible d'intensifier la collaboration des communautés scientifiques des GDR avec les industriels, via la constitution d'un « club des partenaires » qui, au sein d'un GDR, permet une meilleure connaissance mutuelle et l'identification de sujets de recherche communs.

Le travail des GDR en 2021 a été encore affecté par la crise sanitaire, rendant plus difficile les rassemblements et réunions en présentiel : je tiens à remercier sincèrement les porteurs et porteuses des GDR pour leurs efforts continus afin de maintenir l'animation des communautés scientifiques dans ce contexte, et remercie également celles et ceux qui rejoignent l'aventure GDR. 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 ou du monde industriel, de rejoindre ces GDR en les enrichissant de leurs expertises complémentaires.

GDR ADN&G

ARCHITECTURE ET DYNAMIQUE NUCLÉAIRES ET GÉNOMES

La mission du groupement de recherche **Architecture et dynamique nucléaires et génomes (ADN&G)** 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&G 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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Emanuelle Fabre (GenCellDi)
et Jean-Marc Victor (LPTMC)

PROSPECTIVES

Le groupement de recherche Architecture et dynamique nucléaires et génomes (CNRS GDR ADN&G) 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 ?

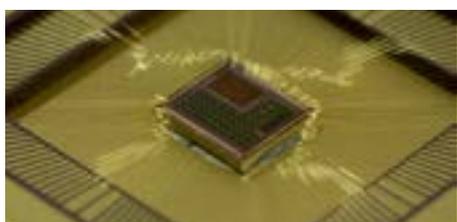
Au défi scientifique immense que représente la compréhension de l'organisation nucléaire physiologique et de ses pathologies, s'ajoute un autre défi – celui du soutien des équipes concernées face à la concurrence internationale. Une collaboration dédiée à la même thématique, soutenue financièrement par le 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 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 Saïghi (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.

ÉCONOMIQUES

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 microélectronique 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).

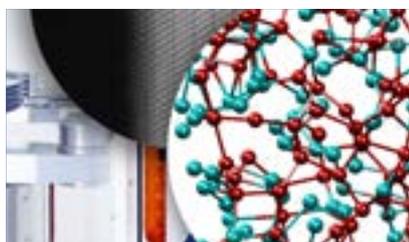
MODÈLES

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 CHALCO

MATÉRIAUX CHALCOGÉNURES : RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION

La mission du groupement de recherche **Matériaux chalcogénures : recherche, développement et innovation (CHALCO)** est de rassembler la communauté pluridisciplinaire travaillant au meilleur niveau international sur les matériaux chalcogénures. Le GDR CHALCO vise à créer une structure à l'échelle nationale permettant de recouvrir les différents champs disciplinaires des matériaux chalcogénures et promouvoir les interactions et les échanges au sein de cette communauté. Cela passe par un maillage vertical allant de la recherche fondamentale aux applications et transverse en regroupant les quatre axes technologiques identifiés autour de ces matériaux : les applications mémoire/neuromorphique, optique/photonique, thermique/énergétique et spin-orbitronique. La mise en relation d'un bout à l'autre de la chaîne de connaissances depuis la recherche fondamentale jusqu'à la production industrielle doit permettre l'émergence de synergies nouvelles conduisant à des solutions innovantes dans tous ces domaines.



7 thématiques

Applications mémoire et neuromorphique

Applications optique et photonique

Applications thermique et énergie

Applications spin-orbitronique

Théorie, design et modélisation

Elaboration des matériaux

Caractérisations avancées

63 groupes impliqués
au sein de **30** laboratoires

Coordinateur : Jérôme Gaudin (CELIA) | jerome.gaudin@u-bordeaux.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Andrea Piarristeguy (ICGM), Virginie (ISCR), Benoît Cluzel (ICB), Pierre Noé (LETI), Françoise Hippert (LMGP)

PROSPECTIVES

POUR LES APPLICATIONS MÉMOIRE/NEUROMORPHIQUE :

Les défis résultent de la volonté européenne de développer la filière technologique des mémoires à changement de phase (PCM) embarquées dont les conditions de fabrication, d'opération ainsi que les capacités de rétention (spécifications) sont plus contraignantes que celles demandées aux mémoires « standalone » développées avec succès à partir de l'alliage à changement de phase $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Quasiment toutes les propriétés utiles dans les dispositifs trouvent directement leurs origines dans les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques du matériau déposé en couche mince et activé par effet Joule au sein d'un dôme de quelques dizaines de nanomètres de rayon. Il s'agit donc d'étudier, de développer, d'optimiser et de qualifier des matériaux et des procédés permettant d'atteindre ces spécifications. Par ailleurs les mémoires PCM sont au cœur de la thématique neuromorphique car considérées comme l'une des technologies les plus prometteuses pour le développement des dispositifs de demain.

POUR LES APPLICATIONS OPTIQUE/PHOTONIQUE :

Les applications couvrent le développement de nouveaux composants photoniques aux fonctionnalités améliorées pour l'optique moyen infrarouges, l'optique non-linéaire, l'optique adaptative et le calcul photonique. Dans ces domaines les défis à relever passent par :

- Formuler de nouveaux matériaux massifs et/ou nanométriques aux propriétés optimisées ;
- Développer de nouveaux moyens de synthèse, de croissance et de mise en forme ;
- Modéliser les propriétés multiphysiques des matériaux chalcogénures en implémentant des approches de type *machine learning* ;
- Mettre en œuvre des simulations numériques dans le régime harmonique pour les situations linéaires, dans le régime temporel pour prendre en compte les non-linéarités.

POUR LES APPLICATIONS THERMIQUE/ÉNERGIE :

Ce champ thématique recouvre plusieurs domaines que sont la thermoélectricité, le photovoltaïque et les batteries :

- Thermoélectricité : identifier des matériaux qui visent la réduction de la conductivité thermique (dopage/phase/nanostructuration). Optimiser le facteur de puissance en jouant sur les propriétés électroniques (pour induire des processus de dégénérescence de bandes, anisotropie, anharmonicités élevées...) par dopage, alliage et/ou substitution. Développer des composants flexibles en couches minces à partir de matériaux de basse dimensionnalité, nanostructurés ou fonctionnalisés par dopage ;
- Photovoltaïque : développer des cellules solaires à base de matériaux chalcogénures moins toxiques et plus écologiques qui permettraient de remplacer les cellules solaires commerciales à couches minces constituées de matériaux toxiques comme CdTe ou rares comme le CIGS (alliages CuInGaSe) ;
- Batteries : développer des batteries tout-solide à base de chalcogénures vitreux, vitro-céramiques et cristallisés présentant des conductivités ioniques les plus élevées possibles (diamètre à 10^{-4} – 10^{-3} S.cm⁻¹ à température ambiante). Obtenir de bonnes interfaces solide/solide entre la matière active et l'électrolyte. Assurer la stabilité chimique et électrochimique des matériaux des anodes et cathodes.

POUR LES APPLICATIONS SPIN-ORBITRONIQUE :

Le couplage spin-orbite permet d'interconvertir des courants de charge en courant de spin et vice versa. Deux types d'effets sont possibles, l'effet Hall de spin (obtenu généralement dans le volume des matériaux), et l'effet Rashba-Edelstein (obtenu généralement aux surfaces et/ou interfaces). Les principaux défis sont :

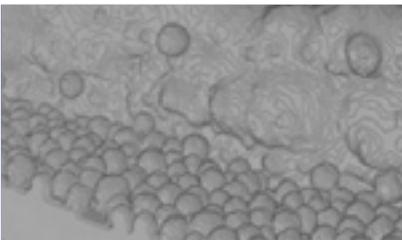
- Mesurer des propriétés pour l'interconversion courant de charge/courant de spin, afin de sélectionner les meilleurs matériaux chalcogénures pour ce type d'applications ;
- Intégrer les meilleurs candidats identifiés dans des dispositifs à couple de transfert de spin ou à des dispositifs basés sur une lecture spin-orbite.

GDR COHEREX

SCIENCE WITH COHERENT X-RAYS AT 3RD AND 4TH GENERATION SYNCHROTRON SOURCES

La mission du groupement de recherche **Science with coherent X-rays at 3rd and 4th generation synchrotron sources* (CohereX)** est de rassembler la communauté française utilisant le rayonnement X cohérent, couvrant des domaines de recherche allant des systèmes biologiques aux structures magnétiques, électroniques, et jusqu'à la dynamique de la matière, en passant par les matériaux fonctionnels et ceux du patrimoine culturel. CohereX a pour but de partager les savoir-faire et de promouvoir le développement de nouvelles études innovantes et des approches d'analyse de données, en lien en particulier avec les opportunités uniques offertes par les mises à jour des sources synchrotron extrêmement brillantes.

**La science avec les rayons X cohérents dans les sources synchrotron de 3^{ème} et 4^{ème} génération*



8 thématiques

Matériaux fonctionnels (ferroélectriques, magnétiques, batteries, ...)

Matériaux du patrimoine culturel

Systèmes biologiques

Bio-minéraux et matériaux biomimétiques

Fluctuations dynamiques dans les matériaux complexes

Rayons X cohérents aux hautes énergies

Big data et gestion de données

Apprentissage automatique pour l'analyse de données

100 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **28** laboratoires

Coordinateur : Thomas Walter Cornelius (IM2NP) | thomas.cornelius@im2np.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Julio Cesar da Silva (Institut Néel),
Beatrice Ruta (ILM)

PROSPECTIVES

L'amélioration continue de la brillance et du flux cohérent des sources synchrotron modernes a conduit à l'émergence de nouvelles techniques capables de sonder certaines propriétés physiques et chimiques de la matière. Les installations synchrotron existantes subissent des mises à jour d'envergure, les transformant en sources dites extrêmement brillantes. L'augmentation du flux cohérent accessible améliore de façon significative la sensibilité et aide à atteindre des hautes résolutions spatiales, potentiellement jusqu'à la résolution atomique. De même, le plus grand flux cohérent disponible aux hautes énergies, présentant donc un fort pouvoir de pénétration de la matière, devrait faciliter l'étude d'échantillons plus larges ou dans de véritables environnements de travail. Il permettra également d'augmenter la résolution temporelle, rendant possible la mesure à des échelles temporelles plus courtes.

Favoriser la discussion entre les membres experts de différentes techniques de rayons X (RX) cohérents conduira à une utilisation plus efficace des nouvelles opportunités sur ces sources extrêmement brillantes et soutiendra la communauté française dans un environnement international très concurrentiel. Ces échanges ouvriront la voie à des études innovantes de la structure et des défauts de matériaux fonctionnels (ferroélectriques, magnétiques) et permettront de développer de nouvelles approches *in situ* et *operando* pour étudier la catalyse et l'électrochimie à l'échelle nanométrique pour le développement de batteries. Ils aideront également l'exploration de divers phénomènes physiques tels que les dommages dans les alliages d'aluminium (pour les applications aéronautiques) au niveau submicronique et de fournir une caractérisation multi-échelle 3D de nouveaux procédés de fabrication à partir de dispositifs *operando* mimant le processus.

De plus, l'imagerie biologique en profitera pour éventuellement fournir des informations quasi-histologiques sur les tissus *post-mortem* donnant des informations importantes sur les structures 3D d'organes intacts ou de tissus pathologiques. Des recherches innovantes sur le comportement thermo-hygro-mécanique multi-échelle des matériaux en fibres de cellulose naturelles, l'interaction fluide/structure lors du traitement des matériaux composites et la surveillance du comportement des systèmes à haute fréquence ainsi que sur des fluctuations dynamiques dans des matériaux complexes avec une résolution temporelle sans précédent deviendront possibles.

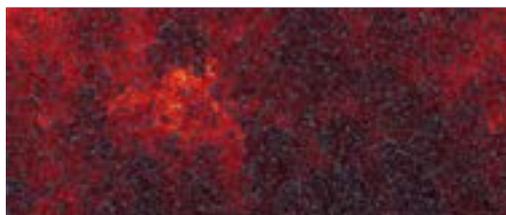
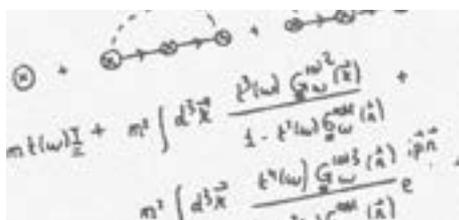
Un défi pour les années à venir est la gestion et le traitement de la grande quantité de données collectées lors des expériences. Il est essentiel que la communauté se rencontre et discute de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique afin de développer de nouveaux algorithmes convolutifs basés sur les réseaux de neurones pour l'analyse de données.

De nos jours, les techniques de RX cohérents sont des méthodes de niche. Le regroupement de la communauté augmentera considérablement sa visibilité. Le GDR est ouvert aux non-spécialistes pour favoriser l'interaction avec d'autres communautés et le développement de nouvelles expériences et approches d'analyse de données et pour faire sortir des rayons X cohérents du confinement et en faire à terme un outil standard pour l'imagerie et l'étude de la matière. Ce GDR est également important en vue d'une éventuelle mise à jour de la source synchrotron française SOLEIL et des lignes de lumière françaises CRG au synchrotron européen ESRF.

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 à long terme 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 et les chercheuses 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, que ce soit au niveau fondamental ou appliqué avec le désir de stimuler les relations entre les différents acteurs académiques et industriels français.

10 thématiques



Fibres optiques et télécommunications par fibres optiques

Optique intégrée

Effets non-linéaires

Solitons, instabilités de modulation

Ondes scélérates, supercontinuum

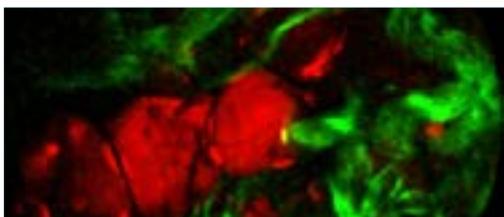
Processus paramétriques, effets Brillouin et Raman

Amplificateurs fibrés, lasers fibrés

Impulsions courtes

Caractérisation de dynamiques complexes

Applications en biophotonique



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

CLUB DE PARTENAIRES

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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Hervé Rigneault (Institut Fresnel),
Christophe Finot (LICB), 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 elle 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.

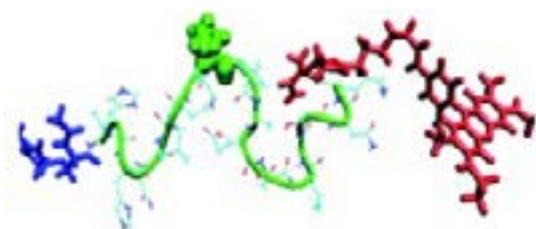
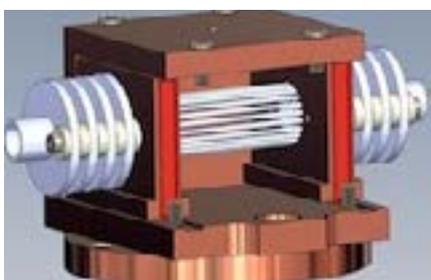
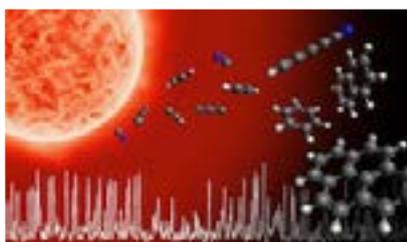
En parallèle, l'étude des effets non-linéaires dans les structures photoniques intégrées est un domaine de recherche en pleine expansion. D'une part le fort confinement du champ dans des guides d'onde éventuellement nanostructurés permet une exaltation des effets non-linéaires. D'autre part l'intégration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

Toutes ces avancées s'inscrivent dans le cadre de travaux de recherche soit très fondamentaux, avec par exemple la génération de triplets de photons, ou alors très appliqués avec la génération de sources lasers ultra-stables pour le référencement de précision ou la détection de polluants, avec donc un fort impact sociétal. Le but est de créer une synergie entre les différents acteurs français du domaine.

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 tailles et de complexités 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 de 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

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

Coordinateur : Pierre Çarçal (ISMO) | pierre.carcabal@universite-paris-saclay.fr

Coordinatrice adjointe : Aude Simon (LCPQ) | aude.simon@irsamc.ups-tlse.fr, Ha Tran (LMD) | ha.tran@lmd.jussieu.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 tailles, 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. Lorsque la taille et les conditions expérimentales le permettent, les méthodes de spectroscopie à haute résolution permettent l'utilisation des signatures rotationnelles et rovibrationnelles pour caractériser les systèmes modèles de façon particulièrement robuste.

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 (cryogéniques, zéolithes, gels...), 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, la communauté du GDR EMIE étend son domaine d'application vers des disciplines situées au-delà de ses propres frontières.

Dans le domaine des sciences de l'Univers, les membres du GDR EMIE 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 planétaires.

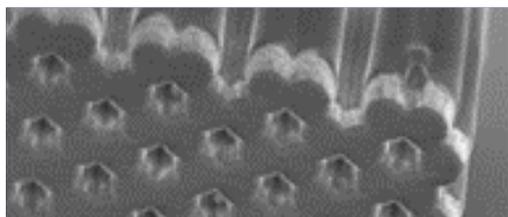
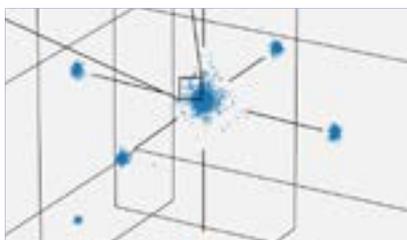
Leur expertise recouvre également l'étude des mécanismes de formation, de croissance ou la réactivité des aérosols, les effets d'environnement, notamment aux interfaces solides/ gaz, jusqu'à la formation et le devenir des polluants.

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, seront développés dans ce domaine également.

En lien avec le domaine de l'énergie, les études des états moléculaires excités peuvent s'appliquer à la dynamique de molécules photo-réactives. Les membres du GDR EMIE envisagent aussi d'aborder des questions concernant notamment la stabilité des hydrates de gaz et des molécules d'asphaltènes environnées.

GDR GAZ QUANTIQUES

La mission du groupement de recherche **Gaz quantiques** est de réunir la communauté des gaz quantiques au sens large en incluant la communauté des fluides quantiques de lumière à celle des atomes ultra-froids. Ces domaines partagent l'étude du même type de problèmes souvent issus de la matière condensée mais avec une approche commune de simulation quantique avec des systèmes artificiels parfaitement contrôlés et caractérisés. Les avantages et les inconvénients expérimentaux des différents systèmes permettent une complémentarité entre les études et le domaine dans son ensemble est caractérisé par un lien théorie-expérience fort. Le GDR fera une part importante aux progrès techniques, à la fois expérimentaux et théoriques, offrant ainsi des espaces de discussion et de formation cruciaux pour rester à la pointe du domaine.



9 thématiques

Métrologie

Interférométrie atomique

Gaz/fluides quantiques

Superfluidité

Transport

Topologie

Corrélations quantiques

Magnétisme quantique

Dynamique hors équilibre

220 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **28** laboratoires

Coordinateur : Thomas Bourdel (LCF) | thomas.bourdel@institutoptique.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Carlos Garrido Alzar (SYRTE), Mathilde Hugbart (INPHYNI), Anna Minguzzi (LPMMC, Grenoble)

PROSPECTIVES

Les gaz quantiques sont un sujet de recherche relativement ancien, avec l'obtention d'un condensat de Bose-Einstein en 1995. Depuis, le sujet a atteint un degré important de maturité et est en évolution constante avec, dans les années 2000 des résultats marquants sur la superfluidité des condensats, les condensats en dimension réduite ou la superfluidité fermionique. En parallèle, les horloges atomiques en fontaine permettent de mesurer le temps de façon inégalée.

Dans les dernières années, le degré de contrôle des systèmes d'atomes ultrafroids n'a cessé de progresser rapidement avec des avancées technologiques importantes. Ces avancées concernent aussi le monde industriel. On peut citer la société Lumibird pour les lasers, Thalès, l'ONERA et Muquans pour les senseurs atomiques (horloges, accéléromètres), Pasqal pour le calcul ou la simulation quantique. Dans les laboratoires académiques, ces avancées permettent d'aller vers des mesures métrologiques à des précisions toujours plus grandes. On peut par exemple citer les développements impressionnants des horloges optiques, mais aussi plus généralement de l'interférométrie atomique permettant par exemple la mesure de certaines constantes fondamentales ou des forces inertielles.

Ces avancées ont aussi permis de créer des expériences toujours plus complexes de façon contrôlée et les gaz ultra-froids sont devenus de véritables simulateurs quantiques modèles grâce à leur polyvalence. On peut maintenant se placer dans des situations expérimentales d'intérêt pour la matière condensée, dont la description précise est un défi à la fois pour la théorie et même pour les simulations numériques à cause des corrélations quantiques. On peut citer les avancées récentes dans les domaines des propriétés topologiques avec des liens par exemple avec la physique du graphène, du magnétisme quantique avec la réalisation de systèmes à symétrie $SU(N)$ avec le degré de spin et la condensation d'atomes avec un fort dipôle magnétique (chrome, dysprosium), de la physique hors équilibre avec les mécanismes de type

Kibble-Zurek, etc. De façon concomitante, les dernières années ont vu l'émergence des fluides quantiques de lumière. Il s'agit de systèmes où les photons interagissent entre eux grâce à un milieu non-linéaire. On peut citer les photons se propageant dans une vapeur atomique, les photons se propageant dans un milieu photoréfractif ou les gaz de polaritons (qui sont des particules mi-exciton mi-photon dans des microcavités semiconductrices planaires). De telles expériences ont par exemple permis de mettre en évidence la superfluidité. On peut même structurer le milieu pour modifier le potentiel sous-jacent et ainsi, entre autres, étudier des systèmes sur réseau ou des systèmes topologiques. Les systèmes ainsi créés sont finalement proches des systèmes de gaz quantiques ultrafroids et sont décrits par les mêmes outils théoriques, tout en ajoutant des ingrédients supplémentaires tels que la dissipation qui est intrinsèque dans ces systèmes. Les liens entre ces deux communautés sont en train de se renforcer et il est naturel de les réunir dans un GDR commun.

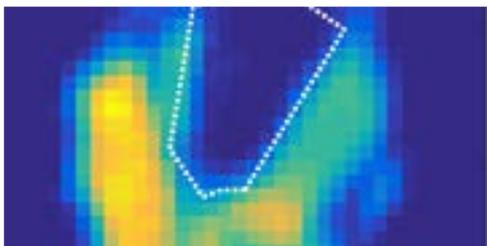
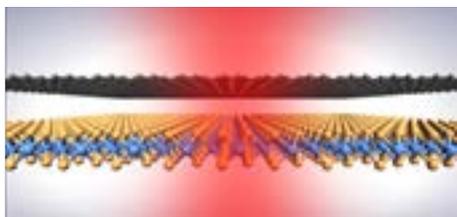
LES ACTIONS DU GDR

Les actions du GDR seront focalisées sur deux événements annuels : une réunion regroupant l'ensemble de la communauté et l'organisation d'une école prédoctorale de deux semaines aux Houches. L'objectif de la réunion annuelle sera de maintenir l'ambiance de coopération, d'entraide qui existe déjà dans la communauté et de favoriser l'émergence de nouvelles directions de recherche et/ou de collaborations. L'école prédoctorale des Houches dans le domaine des atomes froids est très reconnue y compris à l'international. Son champ thématique sera élargi aux fluides quantiques de lumière. Elle offre aux étudiants une solide formation de base et la création d'un réseau à l'international dès le début de leur thèse. Le GDR pourra aussi financer d'autres événements ponctuels (colloques scientifiques, réunions scientifiques entre étudiants, actions de vulgarisation scientifique...).

GDR HoWDi

HÉTÉROSTRUCTURES DE VAN DER WAALS DE MATÉRIAUX DE BASSE DIMENSIONNALITÉ

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

Optique, excitonique, photonique

Magnétisme, spintronique, corrélations électroniques

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

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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Stéphane Berciaud (IPCMS),
Johann Coraux (NEEL) et 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 de 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 semi-conducteurs. 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 de 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 où 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 semi-conducteurs 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.

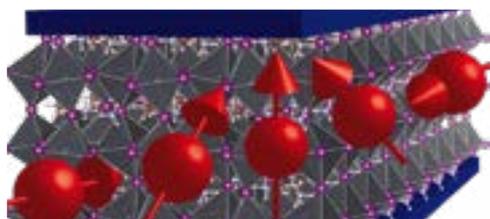
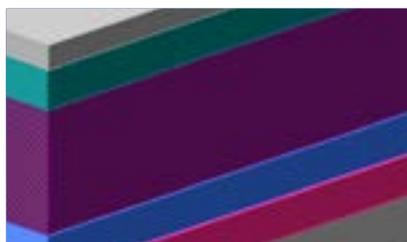
Plus généralement, les hétérostructures de van der Waals permettent de concevoir de nombreux dispositifs modèles (sources de photons uniques, diodes électroluminescentes, photodétecteurs, jonctions tunnel magnétiques, etc.), dont le fonctionnement microscopique est contrôlable par un paramètre extérieur (contrainte mécanique, champ électrique, etc.). 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 maille, phases électroniques et magnétiques variées, interactions coulombiennes exaltées, pseudospin de vallée) pour obtenir de nouvelles fonctionnalités absentes dans les matériaux déjà connus.

GDR HPERO

HALIDE PEROVSKITES

Le groupement de recherche **Halide perovskites* (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.

* *Pérovskites Halogénées*



6 thématiques

Ingénierie chimique du matériau

Etudes structurales et défauts

Propriétés physiques

Interfaces

Photovoltaïque

Développements émergents

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

Coordinatrice : Emmanuelle Deleporte (LuMIn) | emmanuelle.deleporte@ens-paris-saclay.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : J. Bouclé (XLIM), T.T. Bui (LPPI), Z. Chen (LPEM), J. Even (FOTON), R. Gautier (IMN), S. Pillet (CRM2).

PROSPECTIVES

Les pérovskites hybrides halogénées ont marqué une percée pour le photovoltaïque au début 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 multicristallins 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 sous peu des rendements records de plus de 30 % (29,8 % a été atteint en 2021 avec une cellule tandem silicium/pérovskite).

Ces rendements records étant obtenus sur des cellules de petites surfaces, une mise à l'échelle des procédures de fabrication est un enjeu important, d'autant plus que les technologies de dépôt des couches, à température ambiante et en solution, sont à priori bien adaptées. L'ingénierie des interfaces est aussi devenue un thème prépondérant depuis quelques années pour toutes les filières photovoltaïques (cellules solaires 3D, 3D/2D, à îlots quantiques ou en tandem sur silicium) basées pour l'essentiel sur des films minces.

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 et optimiser 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 com-

munauté internationale s'est également tournée vers les édifices nanométriques comme les îlots quantiques. Ainsi, le champ des perspectives pour les pérovskites halogénées s'étend de façon considérable avec :

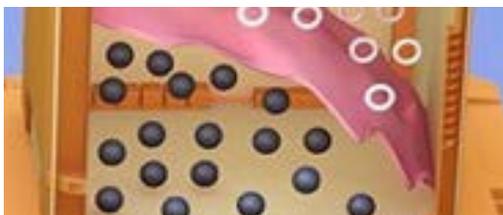
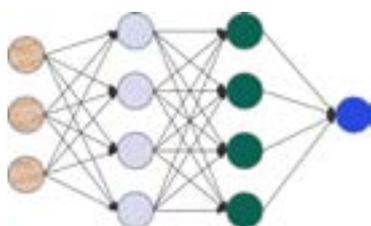
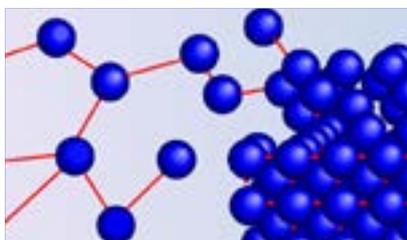
- un champ très large d'exploration pour l'ingénierie chimique et structurale : mise en forme (cristaux, films minces, nanostructures), dopage, exploration de nouveaux cations, substitution du plomb, encapsulation, couches d'interfaces dans les dispositifs ;
- des applications très diversifiées, certaines déjà bien engagées telles que LEDs, microlasers, détection des rayonnements ionisants, d'autres encore émergentes : stockage de l'énergie, thermoélectricité, spintronique / spinorbitronique, catalyse et photocatalyse (production d'hydrogène) ;
- des besoins croissants en matière de compréhension des propriétés physiques : informations structurales, nature et rôle des défauts, propriétés optiques (excitons, biexcitons), électroniques, mécaniques, de spin, de transport, interactions avec les phonons (polarons), forte anharmonicité du réseau cristallin, mécanismes physiques et chimiques aux interfaces...

Les études menées au sein du GDR HPERO s'appuient 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, synchrotrons, champs magnétiques intenses, RMN, GENCI). Le développement concomitant de nouveaux matériaux, de nouvelles spectroscopies multi-échelles spatiale et temporelle, de mesures *operando*, ainsi que l'accroissement de la complexité des systèmes poussent les équipes du GDR à tirer avantage des nouveaux outils théoriques tels que le *machine learning*.

GDR IAMAT

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SCIENCES DES MATÉRIAUX

La mission du groupement de recherche **Intelligence artificielle en sciences des matériaux (IAMAT)** est de rassembler les nombreuses équipes et les différentes communautés intéressées par les approches d'intelligence artificielle en science des matériaux (théorique et expérimentale). Le spectre couvre un continuum scientifique entre les développements de l'IA jusqu'aux applications concrètes en science des matériaux. Une des missions clés du GDR est de favoriser les échanges pédagogiques entre les communautés, notamment par des actions transversales, pour promouvoir de nouvelles inspirations et collaborations.



3 thématiques

Machine learning pour la modélisation atomistique et multi-échelle (modèles quantiques, dynamique moléculaire, modélisation mésoscopique et multi-échelle)

Caractérisation à haut débit (collection intelligente des données, accélération du traitement des données, augmentation des données, reconnaissance de caractéristiques)

Design de matériaux et relation structure-propriétés (inverse design, optimisation de données hétérogènes, prédiction de propriétés complexes et/ou non mesurables)

450 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **80** laboratoires

Coordinateur : A. Marco Saitta (IMPMC) | marco.saitta@sorbonne-universite.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Magali Benoit (CEMES), Silke Biermann (CPhT), Jean-Claude Crivello (IMCPE)

PROSPECTIVES

APPRENTISSAGE MACHINE POUR LA SIMULATION

Bien que les calculs atomistiques soient devenus des outils de plus en plus courants en science des matériaux, ils sont intrinsèquement limités par leur coût en temps de calcul ce qui limite les échelles de taille et de temps accessibles. Dans ce contexte, les méthodes de l'apprentissage machine (*machine learning* - ML) sont et seront utilisées pour rechercher des relations non évidentes entre la structure atomique (qui peut être codée à l'aide d'un grand nombre de descripteurs possibles) et la propriété d'intérêt, au sein de bases de données étendues. Grâce à la disponibilité d'énormes quantités de données théoriques de haute qualité issues des calculs de structure électronique, des simulations de dynamique moléculaire et de la modélisation multi-échelle mésoscopique, le ML fournira à la communauté française des outils de rupture en permettant, par l'analyse des données disponibles, la découverte de relations jusque-là inconnues et l'identification de nouveaux matériaux prometteurs.

CARACTÉRISATION À HAUT-DÉBIT

Au cours de la dernière décennie, les progrès des sources de lumière et de particules, de l'optique et des technologies de détection ont conduit à une augmentation spectaculaire du volume et de la qualité des données des instruments de caractérisation expérimentale (diffraction/diffusion, microscopie, tomographie, spectroscopie, etc.). Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour l'analyse chimique combinatoire systématique et les caractérisations *in situ* et *operando* ultra-rapides et/ou spatialement résolues de matériaux et de dispositifs auparavant considérés comme techniquement irréalisables. Cependant, ces avancées ont un coût, lié à la manipulation des méga-données collectées lors de ces expérimentations. Il n'est plus possible d'avoir un retour en temps réel sur la pertinence des données ou leur qualité, et d'effectuer des ajustements à la volée qui permettraient de corriger la stratégie de mesure. Des algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique sont et seront déployés pour relever ce nouveau et conséquent défi soulevé par le criblage de données, et permettront une caractérisation beaucoup plus rapide et plus efficace de nouveaux matériaux.

CONCEPTION DE MATÉRIAUX

La recherche de matériaux innovants aux propriétés structurales, thermodynamiques et fonctionnelles optimales est une quête de l'humanité. Cependant, la découverte

de nouveaux matériaux efficaces reste difficile. L'approche principale de ce type de défi est l'identification des relations structure-propriété et l'aide à la conception avec une composition chimique et une proposition de traitement (thermique, mécanique, physico-chimique ...) du matériau optimales pour une application ciblée.

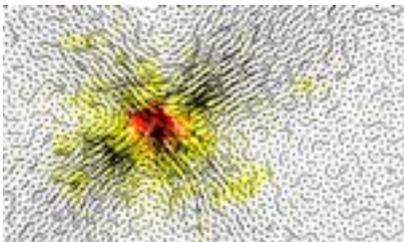
En général, ces relations traitement-structure-propriété-performance (PSPP en anglais) sont loin d'être bien comprises. De plus, la relation scientifique déduite des relations « cause à effet » et l'approche technique avec des moyens contraints tendent à suivre des directions opposées. Pour contourner cette difficulté, différentes approches sont développées, incluant par exemple le criblage à haut débit, la conception inverse ou les algorithmes génétiques d'optimisation. Dans ce contexte, les approches fondées sur l'IA accélèrent le rythme de découverte de nouveaux matériaux. En effet, ces techniques sont en plein essor et sont devenues exceptionnellement attractives pour la prédiction et la conception dans de nombreux domaines de recherche et d'application.

OBJECTIFS : TRANSFERT DE CONNAISSANCES ENTRE DIFFÉRENTES COMMUNAUTÉS, FORMATION DE NOUVEAUX CHERCHEURS

Le GDR IAMAT s'articule autour de deux principaux objectifs : d'une part, élargir la communauté et, d'autre part, partager et transférer, d'une communauté scientifique à l'autre, l'expertise et les savoir-faire communs nécessaires au développement et à l'utilisation de nouvelles méthodes pour concevoir, modéliser, synthétiser et caractériser de nouveaux matériaux grâce aux outils et techniques d'IA/ML. Le GDR sera donc un véritable carrefour de connaissances rassemblant diverses compétences scientifiques et techniques qui contribueront à promouvoir de nouvelles réalisations de rupture.

Le GDR IAMAT vise également à former de nouveaux chercheurs à l'utilisation de ces nouvelles techniques et outils, car ils constitueront la première génération de chercheurs natifs de l'IA en science des matériaux. Cela contribuera à fédérer les communautés, à faciliter les collaborations interdisciplinaires et à maintenir le domaine à jour de l'état de l'art en constante amélioration dans la recherche autour de l'IA/ML en science des matériaux. Nous accorderons une attention particulière à attirer et à former de nouveaux membres - par exemple, de nouvelles recrues ou des personnes dont les sujets pourraient bénéficier de l'utilisation des techniques d'IA/ML.

La mission du groupement de recherche **Interaction, désordre, élasticité (IDE)** est d'animer des collaborations dont le point commun est l'étude de phénomènes où les hétérogénéités jouent un rôle essentiel – tant au niveau théorique qu'expérimental – et bien décrits par le cadre des systèmes élastiques désordonnés. Le but du GDR est de favoriser des échanges entre communautés travaillant sur des systèmes de nature ou d'échelles très différentes bien que décrits dans ce même cadre ; ce, afin de mettre en commun leurs expertises sur les questions ouvertes et d'initier de nouvelles thématiques de recherche.



6 thématiques

Systèmes élastiques désordonnés

Matériaux amorphes sous contrainte

Parois de domaines magnétiques et ferroélectriques

Croissance et propagation de fronts

Plasticité et fracture (avalanches)

Interfaces en biophysique et matière active

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

Coordinateur : Vivien Lecomte (LIPhy) | vivien.lecomte@univ-grenoble-alpes.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Elisabeth Agoritsas (EPFL), Damien Vandembroucq (PMMH)

PROSPECTIVES

CONTEXTE

De nombreux phénomènes physiques sont régis par la présence de désordre. Les exemples vont des matériaux solides (les impuretés régissant la fragilité, le transport), aux structures régulières comme les cristaux ou les mousses (où la dynamique est celle des défauts) et aux systèmes amorphes (dont les inhomogénéités déterminent le comportement mécanique). L'ensemble de ces systèmes ont une propriété commune : le désordre entre en compétition avec des forces d'interaction dites "élastiques", qui contrebalancent les effets du désordre.

OBJECTIFS

La communauté physique française est au premier plan dans l'étude de tels phénomènes, au niveau expérimental et théorique. Ceci est dû à une conjonction particulière : l'étude de la matière molle et la physique statistique en général sont historiquement très développées, et un grand nombre de centres expérimentaux en matière condensée et en mécanique sont très actifs (tant au niveau académique qu'industriel). Par ce nouveau GDR, nous souhaitons fédérer un ensemble de communautés devenues en partie étanches les unes aux autres.

Les thématiques concernées rassemblent des systèmes aussi divers que les lignes et surfaces élastiques conduites hors d'équilibre, le désordre en matière active, les verres structuraux et les paysages d'énergie complexes, ou la mécanique des milieux amorphes. Les progrès théoriques et expérimentaux dans ces domaines se sont effectués parfois en parallèle et sans connaissance mutuelle de ces progrès. Nous voulons proposer des moyens de remédier à cela, par des actions permettant aux chercheurs d'établir des ponts entre leurs sujets de recherche.

PÉRENNISATION

En dehors des rencontres annuelles, le GDR a pour but de soutenir des actions de diffusion et d'animation, grâce au site web et à une liste de diffusion. Pour contribuer à une meilleure représentation du domaine, nous soutenons la vulgarisation (événements, magazines scientifiques, diffusion de la culture scientifique), ainsi que des actions menées au niveau de l'enseignement. Un objectif est d'établir et de maintenir une bibliographie thématique recensant les articles de références et de revue, et de mettre en place un dictionnaire des systèmes désordonnés, recensant par mots clefs les questions et références associées, le but étant de permettre à des communautés différentes de s'entendre.

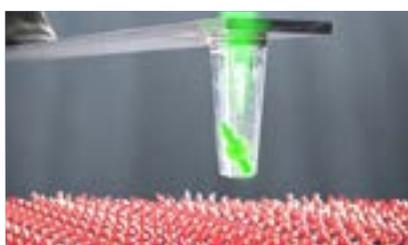
INTERNATIONAL

La recherche menée en France s'effectue en collaboration avec des équipes à l'étranger. Une composante du GDR est constituée de chercheuses et chercheurs en Suisse, à Genève et à Lausanne, qui reflète des partenariats menés de longue date. D'autres équipes en Argentine, en Espagne, en Finlande et en Italie ont aussi d'étroites collaborations sur ces thématiques. Nous souhaitons permettre à la communauté française de faire vivre ces liens internationaux et d'en établir de nouveaux, en menant une veille scientifique.

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

Métrieologie quantique et capteurs

Ingénierie et méthodes transverses

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

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

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

PROSPECTIVES

Les technologies quantiques sont nées il y a quarante ans du croisement entre l'informatique théorique et la physique expérimentale. Les progrès dans le contrôle et la manipulation d'objets quantiques individuels permettent aujourd'hui d'en faire des assemblages de plus en plus complexes et fonctionnalisés. Au-delà d'une meilleure compréhension des fondements de la physique quantique, ces systèmes peuvent permettre le développement de communications sécurisées, d'exécuter des algorithmes plus rapidement que des ordinateurs classiques, de développer des capteurs ultra-sensibles ou encore de reproduire des phénomènes physiques inaccessibles aux observations directes ou aux simulations numériques classiques.

Le challenge du GDR IQFA est d'accompagner ce domaine de recherche qui ne cesse de croître et de se complexifier. Partant de l'optique quantique et de la physique atomique, les objets quantiques manipulés se sont diversifiés, ceux issus de la physique de la matière condensée et de l'électronique fondamentale ayant enregistré des progrès spectaculaires au cours de la dernière décennie. Le nombre de bits quantiques contrôlés dans les systèmes atomiques, les photons ou les circuits supraconducteurs a augmenté d'un ou deux à près d'une centaine, tandis que les communications quantiques sont passées de l'échelle d'un laboratoire à celle d'un pays. La compréhension et la modélisation de ces systèmes de plus en plus complexes ont accru le poids des mathématiques, de l'informatique, et de la théorie du contrôle des systèmes quantiques.

Ce domaine s'est aussi ouvert à la chimie : nécessaire pour l'élaboration de matériaux quantiques, elle est très récemment devenue bénéficiaire du potentiel offert par les simulations quantiques.

Un seuil de maturité scientifique et technologique a également été franchi, rendant des applications commerciales suffisamment crédibles pour susciter l'intérêt de groupes industriels majeurs et faire émerger, *via* des investissements publics et privés, de nouveaux acteurs économiques tissant un réseau d'entreprises innovantes. Cette nouvelle industrie quantique bénéficie pleinement, pour ses recrutements, des compétences et de la polyvalence des doctorants formés dans les équipes participant au GDR IQFA, qui a fait de l'interdisciplinarité et de la formation des jeunes chercheurs ses points forts.

Le GDR IQFA a ainsi pour mission de fédérer autour du langage commun de l'information quantique des chercheurs et chercheuses provenant d'horizons scientifiques différents, tout en maintenant des liens étroits entre la théorie et l'expérience. Dans un contexte de compétition internationale très élevée, tant du monde académique qu'industrielle, il permet à la communauté scientifique française de se rassembler et d'échanger annuellement lors du colloque du GDR. Cet événement est l'occasion de couvrir tout le spectre des technologies quantiques partant de questionnements liés aux fondements de la mécanique quantique jusqu'au développement de dispositifs quantiques commerciaux.

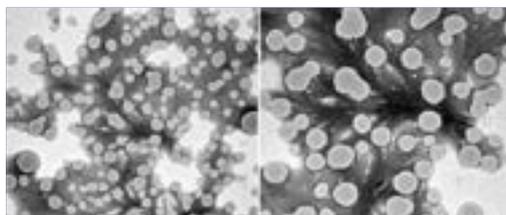
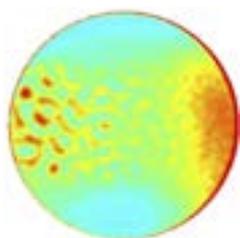
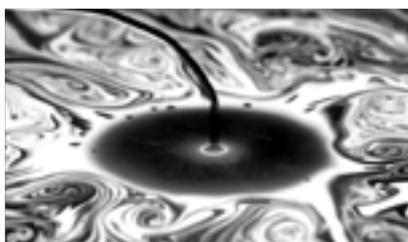
C'est à l'aune de ces évolutions que le GDR IQFA, qui entre dans la dernière année de sa troisième mandature, fera son bilan et préparera son successeur porté par une nouvelle équipe.

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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : 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.

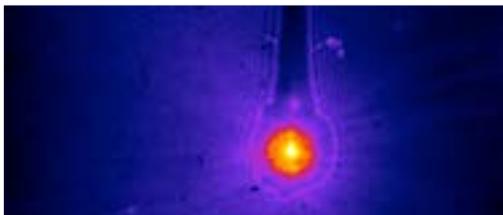
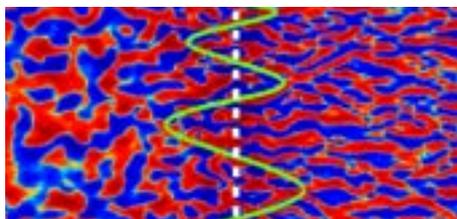
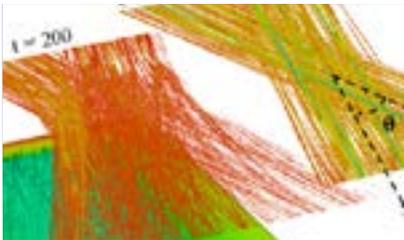
Les interfaces sont, aujourd'hui, en effet au cœur d'une multitude de problèmes complexes dans la science de la matière molle : de la transcription de l'ADN au frottement et à la lubrification, en passant par la régulation de charge et les couches fonctionnelles « intelligentes » nécessitant de nouvelles 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.



6 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

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

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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : 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 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 de la fusion par laser et celui de l'utilisation 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 corrélés portent sur l'évolution de phénomènes comme les instabilités de Rayleigh-Taylor ou les chocs radiatifs.

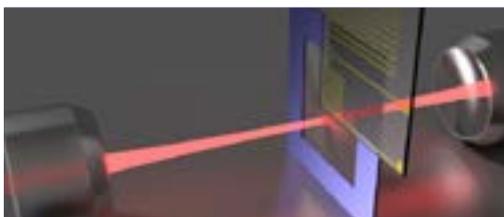
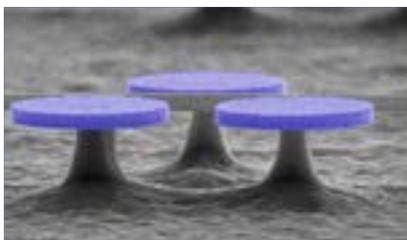
À l'interface entre la physique nucléaire, la physique atomique et la physique des plasmas se trouvent les activités sur les excitations nucléaires par laser, avec l'objectif d'étudier les modifications des états nucléaires dans un milieu ionisé dense et chaud.

Enfin, 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 ces événements encore très rares à des intensités prochainement accessibles sur les installations comme 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

CLUB DE PARTENAIRES

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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : 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 ultra-sensibles 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 qualité 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.

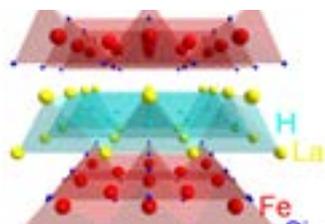
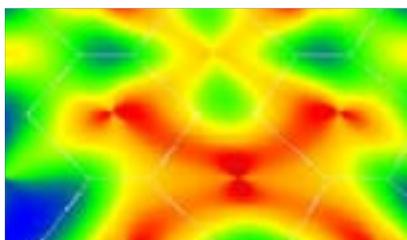
ENJEUX ET DÉFIS FONDAMENTAUX

Les progrès technologiques des systèmes mécaniques ultra-sensibles 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 sensibilité 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 étudient 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 »

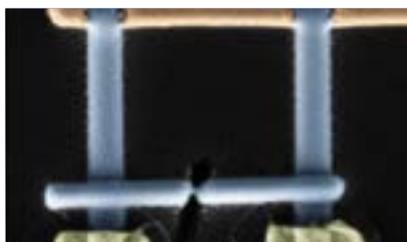
On peut relever le développement des oxyhydrures induisant des états de valence atypiques (Ni^+ , Ru^{2+} , etc.) pouvant conduire à de nouvelles phases, et la prédiction globale de propriétés topologiques, basées sur le groupe d'espace et la théorie des bandes. Enfin, le contrôle des propriétés aux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

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 natures (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.



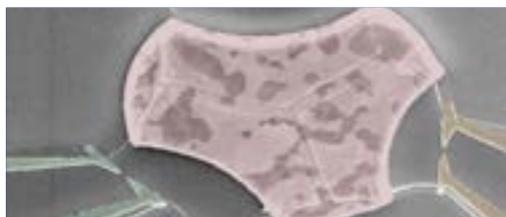
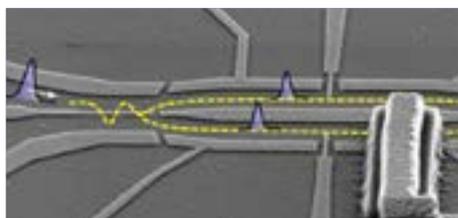
4 thématiques

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.

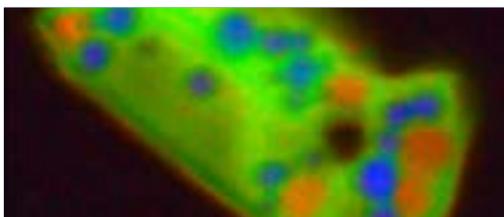
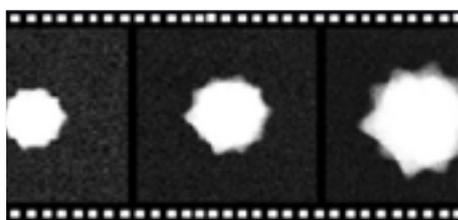
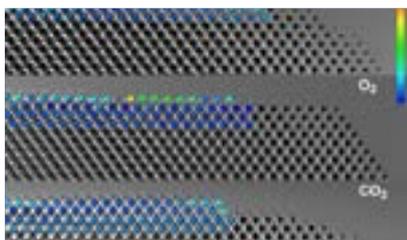
LES DÉFIS

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.

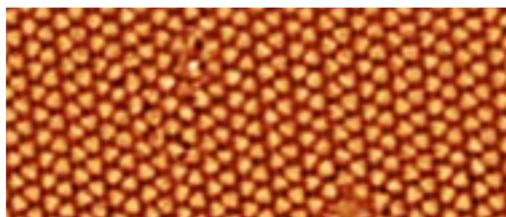
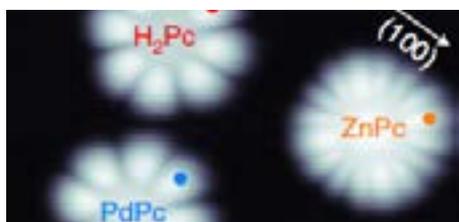
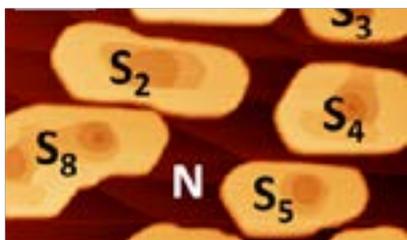
Identifier et débloquent les verrous techniques freinant l'utilisation des techniques environnementales sur certains types d'échantillons. Compte tenu de la diversité et de la complexité des phénomènes observables, il est indispensable de mettre en place des groupes de travail interdisciplinaires qui 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

CLUB DE PARTENAIRES

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

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : 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 (e.g., à 4 K, 77 K, 300 K). Elles permettent d'accéder directement à la topographie de la surface et également 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 (< 10 nm). 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, microscopies à effet tunnel et optique permettent l'observation directe de ces mécanismes. Le développement de techniques impliquant l'utilisation de lasers impulsions 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 dimensionnalité 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 à 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

Les 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 nanométrique ou éventuellement atomique (nc-AFM) et le potentiel de surface (KPFM) lié aux propriétés électrostatiques (dipôles, charges) et électroniques (travail de sortie, dopage, etc.) de la surface et d'un nano-objet unique (une nanoparticule, un nano-îlot, une molécule, un atome, défauts de surface, etc.).

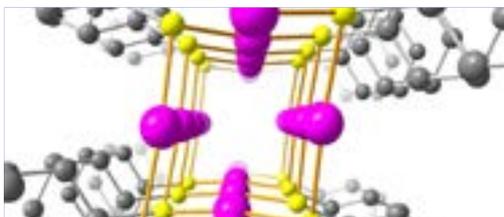
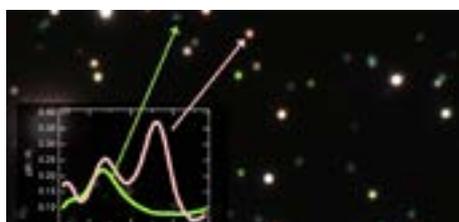
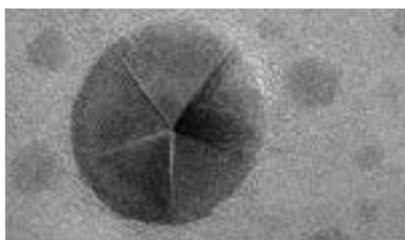
CONCEPTS THÉORIQUES ET OUTILS NUMÉRIQUES

La description des interactions « pointe-surface support » (seule ou avec un nano-objet supporté) comme l'échange, l'électrostatique, le Van der Waals et le magnétisme, est à la base de tous les calculs permettant de prévoir et de reproduire les différentes expériences suivantes réalisables en champ proche : imagerie de la topographie (STM, NC-AFM), spectroscopies d^2I/dV^2 , dI/dZ et dZ/dV (STS) en STM, spectroscopies $\Delta f(Z)$ et $\Delta f(V)$ en NC-AFM aussi bien que des expériences de manipulation d'un atome ou d'une molécule. L'interprétation des données expérimentales va appuyer le développement et la mise à disposition des codes de calcul basés sur la description quantique et/ou semi-classique de ces interactions.

GDR OR-NANO

L'OR NANOMÉTRIQUE ET NANOPARTICULES D'OR

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 complexes à base d'or. Le GDR organise des conférences annuelles en France à caractère pluridisciplinaire et des Discussions Or-nano qui visent à traiter en profondeur un sujet plus ciblé. Un accompagnement et un soutien particulier sont proposés aux doctorants pour mener des actions de vulgarisation afin de sensibiliser le grand public aux recherches issues des laboratoires. Depuis sa naissance en 2006, Or-nano a confirmé son dynamisme en faisant évoluer régulièrement ses thématiques, et vise ainsi à contribuer activement à la pertinence de la recherche française sur la scène mondiale.



9 thématiques

Nanostructures plasmoniques, nano-antennes, modélisations

Physique des électrons chauds et catalyse plasmonique

Nanoparticules pour la nano-électronique et l'électronique moléculaire

Réactivités aux interfaces : biocapteurs, diagnostic en milieu vivant et électrocatalyse

Synthèses de nanoparticules d'or à morphologie contrôlée. De l'objet unique à l'assemblée de particules fonctionnalisées

Nouveaux défis instrumentaux pour la caractérisation de nano-objets uniques : microscopies optique, microscopies X, grands instruments

Propriétés de fluorescence et propriétés magnétiques de l'or dans les complexes et les clusters d'or

Nanoparticules d'or en santé : toxicité, vectorisation, théranostique, applications cliniques

Axe transverse : l'or en histoire des sciences, dans le dialogue sciences-société et dans les objets du patrimoine

400 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **68** laboratoires

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

Coordinatrice adjointe : Hazar Guesmi (ICGM)

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. Beaucoup de thématiques émergentes se situent à la croisée de ces disciplines.

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. Ils correspondent à des états excités dont la durée de vie est finie, de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes. La plasmonique est une voie pour amplifier l'effet des électrons chauds et ouvre un nouveau champ de la physique où se conjuguent optique et physique de la matière condensée. Les nano-systèmes hybrides (métal/semi-conducteur) impliquant des nanoparticules d'or présentent également un grand intérêt à l'heure actuelle notamment pour comprendre l'exaltation de la réactivité chimique au voisinage de ces nano-systèmes en catalyse hétérogène.

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 infé-

rieures 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 la détection.

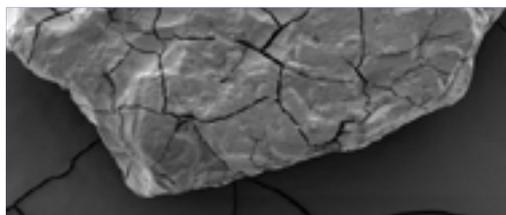
VERS UNE APPLICATION CLINIQUE DES NANOPARTICULES D'OR

À l'inverse de l'or ionique utilisé depuis des décennies en médecine et bénéficiant d'un recul de plus de 70 ans, les nanoparticules d'or en santé demeurent un sujet d'avant-garde dont les travaux et essais, bien qu'en constante augmentation, commencent à peine à parvenir au stade du développement clinique. Le recul et l'expertise acquis ces dernières années par la communauté scientifique Or-nano lui permettent désormais de se tourner vers des recherches résolument interdisciplinaires et translationnelles afin d'aborder des questions d'intérêt clinique.

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 et physiciennes, 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(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : 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 dyna-

mique 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.

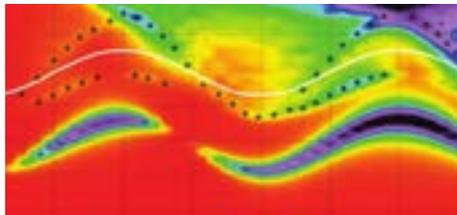
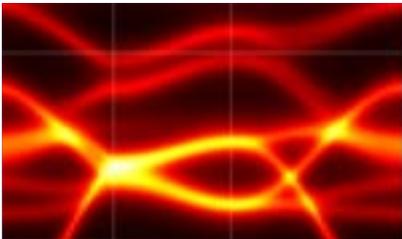
LES PISTES POUR LE FUTUR

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 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 numériciens 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 témoin 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* » (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 THÉORIE & CLIMAT

DÉFIS THÉORIQUES POUR LES SCIENCES DU CLIMAT

La mission du groupement **Défis théoriques pour les sciences du climat (THÉORIE ET CLIMAT)** est de fédérer la communauté des théoricien(ne)s, physicien(ne)s, climatologues, océanographes, atmosphéricien(ne)s, mathématicien(ne)s, informaticien(ne)s, sciences numériques, *machine learning* (apprentissage automatique), qui travaillent sur les sciences du climat. Son but est de développer des outils théoriques et numériques novateurs pour dépasser les limites scientifiques actuelles. Les approches de physique statistique, modélisation de la turbulence, mathématiques, d'apprentissage automatique, permettront d'approfondir la compréhension des mécanismes fondamentaux, améliorer les modèles, et mieux prédire les événements climatiques extrêmes pour réduire les incertitudes sur les impacts du changement climatique. Ce GDR a une vocation fortement interdisciplinaire et implique les chercheurs de plusieurs instituts du CNRS, de nombreux autres organismes français et d'entreprises.



10 thématiques

Dynamique du climat

Dynamique des océans et de l'atmosphère

Machine learning et climat

Mathématiques et climat - Statistique

Mathématiques et climat - Analyse numérique et assimilation de données

Modélisation stochastique

Physique, dynamique non-linéaire et climat

Physique statistique et climat

Turbulence et écoulements géophysiques

Relations entre observations, données et intégration dans les modèles

200 chercheurs et
chercheuses impliqués
au sein de **19** laboratoires

Coordinateur : Freddy Bouchet (LPENSL) | freddy.Bouchet@ens-lyon.fr

Coordinateur(s)/coordinatrice(s) adjoint(es) : Julien Brajard (LOCEAN), Anne Laure Dalibard (DMA), Bruno Deremble(IGE), Davide Faranda (LSCE), Sophie Giffard-Roisin (ISTerre), Corentin Herbert (LPENSL), Claire Ménesguen (LOPS)

PROSPECTIVES

La compréhension et la modélisation de la dynamique du climat et de ses principales composantes, par exemple l'atmosphère, l'océan, la biosphère ou la cryosphère, sont des enjeux majeurs. En effet, ils ont des influences primordiales sur les humains et leurs sociétés, sur les vivants non-humains, et sur l'ensemble de la nature. Comprendre ces dynamiques et leurs évolutions futures est aussi un impératif pour la sauvegarde de notre civilisation, nécessaire pour la caractérisation des enjeux politiques du changement climatique et pour l'analyse scientifique de ses solutions, passant par la gestion des risques et une meilleure compréhension des contraintes physiques permettant d'assurer un développement harmonieux. Ces dynamiques sont de plus directement en lien avec certaines technologies et industries essentielles, telles que la prédiction météorologique, le domaine de l'énergie, ou l'assurance.

Cependant on oublie souvent que la compréhension de ces dynamiques complexes est également un ensemble d'enjeux de science fondamentale. En effet, la plupart des questions clés dans ces domaines ne peuvent trouver de réponses quantitatives précises et satisfaisantes avec l'utilisation des outils scientifiques actuels. Par exemple, la sensibilité climatique, c'est à dire l'augmentation de température lorsque l'on double le taux de CO_2 dans l'atmosphère, est estimée par le dernier rapport du GIEC (AR5) à une valeur comprise entre 1.5 K et 4.5 K, avec une probabilité de 0.66. Le réchauffement climatique apparaît ainsi clair et indiscutable scientifiquement, au niveau qualitatif. Nous voyons cependant que son estimation quantitative est entâchée d'incertitudes importantes.

Ce manque de précision a des implications majeures pour l'analyse des enjeux globaux. L'état actuel de la science est peu satisfaisant malgré des progrès remarquables ces dernières décennies. Pour ce cas spécifique de la sensibilité climatique, aller au-delà, vers une science plus quan-

titative, nécessite des avancées fondamentales dans la dynamique des nuages, de la turbulence des couches limites, dans l'intégration de modèles effectifs dans les modèles de climat. Ces avancées fondamentales ne semblent pas accessibles avec les approches traditionnelles. En revanche, une approche combinant les observations, la modélisation par processus stochastiques et des outils de *machine learning* intégrant l'aspect dynamique pourrait contribuer à résoudre ce défi.

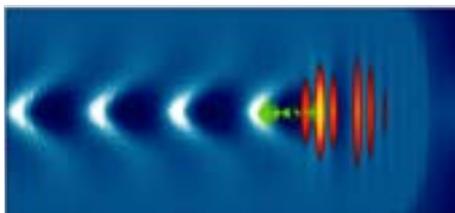
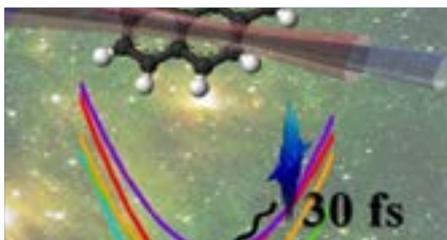
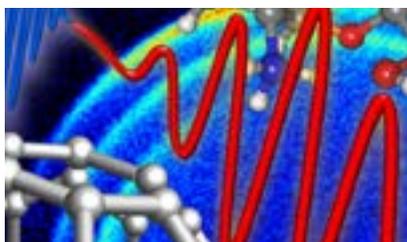
Cet exemple spécifique de la sensibilité climatique illustre la nécessité de développer des outils théoriques, numériques et mathématiques d'une nature nouvelle, en complément des approches traditionnelles. Le GDR va aborder un ensemble de défis de ce type, par exemple :

- Comment intégrer données et contraintes théoriques, en utilisant des approches de *machine learning*, pour construire les nouvelles générations de modèles de climat ?
- Comment réduire les incertitudes sur l'estimation de la sensibilité climatique ?
- Comment concilier des approches de machine learning avec des approches scientifiques traditionnelles ?
- Comment réduire les incertitudes sur l'estimation des probabilités des événements extrêmes ?
- Comment rendre quantitative l'étude des climats du passé et des climats futurs potentiels ?
- Comment construire des modèles effectifs dont les limites sont quantifiées rigoureusement ?

GDR UP

ULTRAFAST PHENOMENA

La mission du groupement **Ultrafast Phenomena (UP)** est d'étudier la matière dans tous ses états (dilué, solide, nanométrique, liquide et plasma) aux échelles de temps ultracourtes (atto, femto et picoseconde). La communauté française des sciences ultrarapides est forte et particulièrement reconnue au niveau international, elle rassemble des capacités expérimentales, de théorie, ainsi que des industriels, de premier plan. Le domaine est en pleine extension grâce aux nouvelles technologies laser (à l'échelle d'un laboratoire ou sur les grands instruments tels que LEL ou ELI) et aux moyens de calcul, qui permettent d'appréhender de nouvelles questions, des plus fondamentales (cohérence quantique) jusqu'aux applications (optimisation de matériaux intelligents). La mission du GDR UP est de stimuler la structuration de la communauté et de réaliser un état des lieux et prospectif de nos activités.



7 thématiques

Sciences attosecondes

Sources secondaires d'électrons, photons et protons

Dynamique des systèmes atomiques et moléculaires en phase gazeuse

Femtochimie - femtobiologie

Dynamique dans les matériaux et les nanostructures

Instrumentation et data

Communication

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

CLUB DE PARTENAIRES

Coordinateur : Franck Lépine (ILM) | franck.lepine@univ-lyon1.fr

Coordinateur adjoint : Lionel Poisson(ISMO) | lionel.poisson@universite-paris-saclay.fr

PROSPECTIVES

DES SOURCES DE RAYONNEMENTS EXTRÊMES : DES GRANDS INSTRUMENTS... AUX SOURCES COMPACTES

L'émergence de grands instruments (LEL ou ELI) délivrant des impulsions UVX et X femto (fs) et attoseconde (as) intenses est un enjeu important pour notre communauté. De manière complémentaire, des sources compactes aux performances remarquables se développent. Elles permettent d'envisager des expériences très complexes et coûteuses en temps, à l'échelle du laboratoire. Il s'agit de sources fs de particules (électrons, protons) pour des applications en imagerie ou de rayonnement X fs pour les études de la matière dense et chaude. Les sources de haute cadence (kHz et MHz) explorent une large gamme spectrale allant des X aux THz (source large bande ou intense). La génération d'impulsions UV-X as avec un contrôle ultime du spectre et de la durée, permettra l'étude de la dynamique à haute résolution temporelle. Le contrôle de l'état de polarisation des impulsions (moment cinétique orbital) est crucial pour le développement de sondes des propriétés de symétrie et magnétique de la matière.

ACCÈS AUX ÉCHELLES DE TEMPS ULTIMES : SCIENCE ATTOSECONDE

La France est un des pays pionniers et leaders en science attoseconde. Un des enjeux actuels est l'étude de petits systèmes quantiques (atomes, petites molécules) pour des mesures de cohérence et d'état quantique, ce qui nécessite le développement d'expériences « complètes », prenant en compte toutes les anisotropies. Le domaine évolue également vers l'étude de molécules complexes (attochimie) en s'intéressant à la réactivité de molécules d'intérêt biologique ou astrochimique, et de manière émergente aux ions moléculaires. Des expériences en matière condensée se développent pour s'intéresser aux matériaux topologiques, corrélés, magnétiques ou 2D. Les nouvelles approches rassemblent absorption transitoire, photoémission résolue en angle, coïncidence, résolution en spin. Avec la complexité des expériences, les développements théoriques *ad-hoc* et un lien fort entre théoriciens et expérimentateurs deviennent plus que jamais indispensables. Ils incluent notamment la description du couplage électron-noyau, la corrélation et les effets non-linéaires.

DES SYSTÈMES MULTI-ÉCHELLES EN PHOTOCHEMIE ET PHOTOBIOLOGIE

L'enjeu est de comprendre les architectures moléculaires photo-actives de complexité croissante (de la molécule organique aux protéines en solution, jusqu'aux assemblages supramoléculaires) en lien avec le fonctionnement du vivant, la photocatalyse ou encore la conversion de l'énergie chimique. Des méthodes spectroscopiques de pointe sur une gamme temporelle et spectrale très large voient le jour (ex : spectroscopie 2D UV-visible et IR, dichroïsme circulaire UV-visible résolu en temps fs et ps) et permettent de résoudre les transformations structurales, les transports de charge et d'énergie à l'échelle atomique. Une compréhension fine de la réactivité de ces structures moléculaires requiert des développements théoriques. Des approches théoriques pour l'étude de la réactivité moléculaire induite par un rayonnement ionisant ultrarapide (lumière ou électrons) se développent en lien avec la radiolyse et les dommages radiatifs.

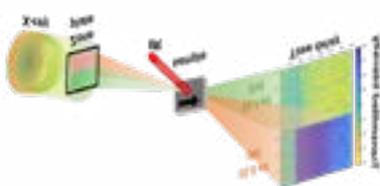
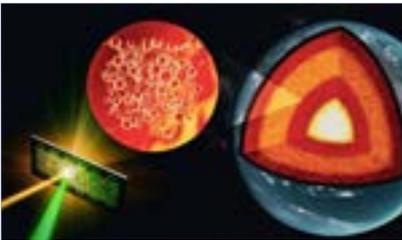
SONDER LA DYNAMIQUE DE TOUTES LES (QUASI-) PARTICULES DANS LES MATÉRIAUX COMPLEXES

L'emploi conjoint de sources optiques femtosecondes traditionnelles, THz et de rayons X pulsées permet l'étude des phénomènes hors-équilibre dans de nouveaux matériaux qui montrent des dynamiques ultra-rapides impliquant les électrons, les spins et les phonons. Des mesures ARPES résolues en temps permettent l'étude de matériaux 2D (ex : dichalcogénures de métaux de transition) ou semimétaux topologiques de Weyl. L'absorption transitoire fs permet l'étude de la dynamique d'exciton dans des matériaux en couche (pérovskites). Des études concernant la dynamique de courant de spin ou de conversion *spin-to-charge* se développent. De nouvelles approches expérimentales combinant microscopie électronique et rayonnement ultrarapide émergent. Des mesures de corrélation entre propriétés optiques et structurales avec une résolution nanométrique deviennent possibles en combinant cathodoluminescence et microscopie électronique (appliquée aux nano-diamants et puits quantiques InGaN).

GDR XFEL

SCIENCE AVEC LES XFEL

La mission du groupement de recherche **Science avec les 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. A 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, en Chine et bientôt au Royaume-Uni et en Suède. Plusieurs de ces machines ont déjà été upgradées. La France est partenaire de la source European XFEL située à Hambourg (Allemagne).

La brièveté (5-100 fs), l'intensité (10^{10} - 10^{12} photons/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 chercheurs et chercheuses français(es) est utilisateur des XFEL, avec plusieurs projets internationaux portés par le CNRS, le CEA et les universités. Ce type de recherche à fort impact nécessite des projets très structurés pour bien répondre aux appels à temps de faisceau très compétitifs.

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, toutes et tous motivés 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.

Photo de couverture : image par microscopie électronique à balayage d'une sphérolite, de taille 10 μm , sur le point de se détacher d'un polymère (acide poly-lactique) après attaque enzymatique. Cette image montre la différence de vitesses d'érosion entre les parties amorphes et cristallines dans le polymère. Elle illustre l'importance de la structure microcristalline d'un plastique lors de sa dégradation en milieu environnemental. © Matthieu George / Laboratoire Charles Coulomb (L2C), Université de Montpellier, CNRS / LabEx NUMEV.

INSTITUT DE PHYSIQUE

3, rue Michel-Ange 75016 Paris

inp.cnrs.fr

Conception : Florent Calvo et Linda Salvaneschi

Impression : CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

Mai 2022

