

# Physique en régimes extrêmes

## RÉSUMÉ

Les régimes extrêmes sont un outil puissant de compréhension de la matière, un terrain propice aux découvertes, le catalyseur d'applications technologiques ainsi qu'un formidable défi intellectuel et technique.

Dans la prochaine décennie, les phénomènes ultrarapides (picoseconde à attoseconde) seront à même de sonder les échelles spatiales du nm — voire les objets nanométriques uniques — tout en gardant une sensibilité quantique aux relaxations des quasi-particules. L'enjeu pour 2030 est de contrôler de manière cohérente les propriétés de la matière via des impulsions multiples exerçant en multi-échelles (notamment au THz non-linéaire).

Trois axes se dégagent dans le domaine de la cryogénie : les plus basses températures aideront à repousser les frontières de la connaissance (fluides quantiques, résonateurs électromécaniques, interaction électron-noyau, etc.), l'association à d'autres conditions extrêmes se généralisera pour comprendre les matériaux quantiques et de nouvelles plateformes visant des puissances frigorifiques extrêmes émergeront pour l'ordinateur quantique (et toute l'ingénierie associée).

Les progrès des dispositifs continus et pulsés de champs magnétiques intenses bénéficieront à l'astrophysique de laboratoire, la magnétohydrodynamique ou la magnétoscience. Couplés à d'autres variables extrêmes et/ou à des sondes de plus en plus sophistiquées (images optiques, microscopies de champ proche, électronique haute fréquence, techniques ultra-rapides), ces progrès impacteront fortement la recherche sur les matériaux quantiques. Les nouvelles bobines en supraconducteurs à haute température promettent de réduire le volume des tokamaks pour la fusion thermonucléaire, mais permettront aussi des expériences novatrices à temps de comptage très long en matière condensée ou en physique des particules (recherche de matière noire notamment).

La physique des lasers intenses promet de nombreuses évolutions à l'horizon 2030. Grâce à l'installation laser femtoseconde Apollon, fiabilisée, poussée jusqu'à des puissances crête de 10 PW et couplée à de nouveaux types d'accélérateurs, les processus fondamentaux de l'électrodynamique quantique comme la création de paires électrons-positons ou d'autres particules/interactions dans le vide pourront être étudiés expérimentalement et être confrontés aux différentes théories de strong field

quantum electrodynamics. Associer des lasers de haute énergie dont la durée d'impulsion est plus longue ( $> 1$  kJ-ns) à des diagnostics innovants (souvent produits à partir de sources issues d'Apollon, des XFEL, des synchrotrons ou par des lasers de haute énergie) permettra d'étudier les chocs radiatifs et les processus d'accrétion et d'éjection propres à l'astrophysique-plasma mais aussi en physique des très hautes pressions ( $> 10$  Mbar) à des températures de l'ordre de 10 000 K. Cela donnera accès à l'étude des matériaux des intérieurs exo-planétaires ou des propriétés remarquables de la matière dans des domaines encore inexplorés. À plus basse température, les hautes pressions resteront l'apanage des enclumes de diamant, qui seront de plus en plus associées à des diagnostics performants (XFEL, synchrotrons, etc.). Les installations laser de très haute puissance seront aussi un outil privilégié pour explorer et fiabiliser de nouveaux accélérateurs de particules (électrons/ions/neutrons) et sources de rayonnement compactes avec des propriétés uniques, pouvant notamment être utilisés dans des installations laser hybrides combinant 10 PW-fs et 10 kJ-ns. Pour la fusion (par confinement magnétique, FCM, ou inertiel, FCI), des progrès viendront notamment du développement de nouveaux diagnostics, entre autres pour comprendre les conditions des interactions aux bords (FCM), l'absorption anormale (FCI) ou les instabilités hydrodynamiques et les turbulences.

# Physique en régimes extrêmes

## QU'EST-CE QUI EST EXTRÊME ?

Si presque toute recherche en physique peut revendiquer une dimension extrême (e.g. sensibilité des mesures, capacités de calculs), nous nous concentrons ici sur les conditions extrêmes de température, de champ magnétique et électrique, de pression et de résolution temporelle, impliquant en général des moyens expérimentaux conséquents, mais non spécifiques à un sujet de recherche. Ainsi, la physique des atomes froids, discutée dans d'autres ateliers, n'est pas reprise ici. Certains grands instruments (bobines de champ magnétique, lasers de puissance ou à électrons libres) produisent de façon évidente des conditions extrêmes. Ces régimes extrêmes recouvrent une multitude de domaines de la physique avec des motivations et des pratiques très diverses. L'extrême qui est bien sûr consubstantiel aux plasmas peut aussi contribuer à révéler des phénomènes inédits (e.g. phénomènes hors-équilibre ou nouveaux états électroniques), à élucider les propriétés complexes de matériaux quantiques ou à reproduire en laboratoire des phénomènes géophysiques ou astrophysiques. Dans nombre de cas, l'extrême résulte de la combinaison de plusieurs paramètres.

## PHÉNOMÈNES ULTRARAPIDES (PS À AS) OU LA PHYSIQUE HORS-ÉQUILIBRE (HEQ)

Résoudre temporellement les changements structuraux et électroniques, les échanges d'énergie ou les mouvements mécaniques dans la matière HEQ, a deux objectifs entremêlés : comprendre les propriétés d'une matière HEQ et contrôler son évolution sur les temps caractéristiques des couplages entre les degrés de liberté (électron, phonon, polaron, magnon, etc.). Le point clef est l'utilisation d'un stimulus de durée plus courte que ces temps de couplage, afin d'assurer une mise en phase des dynamiques des (quasi) particules excitées : on parle alors de dynamique cohérente, à même d'engendrer aux échelles macroscopiques des modulations ou changements ultra-rapides des propriétés physiques. Les phénomènes ultra-rapides, allant de l'attoseconde (as) à la picoseconde (ps), apparaissent donc dans une multitude d'objets d'étude. Les détections les plus sensibles sont étendues au domaine temporel en combinant plusieurs impulsions lumineuses ultracourtes (le plus souvent  $< 100$  fs) : les impulsions pompe amenant le système HEQ et les impulsions sonde permettant de caractériser cette matière après un délai variable. Ces expériences pompe-sonde résolues en temps (EPSRT) révèlent les cohérences

et leurs déphasages ou pertes par couplage (relaxation d'énergies, transfert de populations, sous-systèmes). Les EPSRT dépendent des innovations en sources de lumière (durée/taux de répétition/flux/gamme spectrale/polarisation/moment angulaire orbital) développées au sein des laboratoires, mais aussi de grands instruments (XFEL/ELI/synchrotrons). Les objets d'étude sont très divers : des nano objets uniques, des matériaux 2D, interfaces ou protéines.

- **La spectroscopie THz** fait la jonction entre l'optique ( $> 10$  THz) et l'électronique ( $< 0.1$  THz). L'émission THz (e.g. déclenchée optiquement) ou l'excitation par un champ THz pulsé donnent accès de manière unique aux dynamiques des particules et processus de basse énergie dans les solides (phonons, plasmons, polaritons, spin, magnons, conversion spin-charge...). Ce faible quantum d'énergie THz (quelques meV) permet de sonder ou d'agir directement sur les interactions avoisinant le niveau de Fermi. Par exemple, l'excitation résonante de magnons dans les isolants reste un enjeu pour une spintronique sans effet Joule. **Les sources THz intenses à développer** ( $> 100$  kV/cm) permettraient le contrôle et l'exploration de nouveaux états dont la physique sous-jacente est encore peu comprise : phononique non-linéaire (PNL) dans des matériaux polaires, ferroïques et multiferroïques (incluant les changements de phase structuraux ou la création de brisures de symétrie) et PNL pour la manipulation des états supraconducteurs et des systèmes quantiques 2D comme les hétérostructures pour exciter des phonons sélectivement — en polarisation et en fréquence — et ce simultanément à une photoexcitation électronique. Les impulsions THz intenses permettent aussi d'explorer les non-linéarités et la génération d'harmoniques dans les matériaux quantiques. Tout ceci nécessite des développements de THz intenses de plus haute cadence, plus sensibles et présentant un meilleur contrôle spectral. Développer des optiques pour manipuler les moments angulaires de spin et orbital des faisceaux pulsés THz permettrait d'étudier la chiralité et les échanges de moments angulaires.

- **EPSRT dans les hétérostructures** : En photonique, comme en photocatalyse, suite à la photoexcitation, l'objectif est la séparation spatiale ultrarapide des charges (électron/trou) pour limiter la ré-émission de lumière et ainsi augmenter la migration de charges (cellules solaires ou production de  $H_2$ ). Les EPSRT à base par exemple de STM, ARPES, EELS, TEM seraient donc à privilégier pour suivre et optimiser cette migration dans des hété-

rostructures hybrides-2D où de nouveaux couplages spin-vallée émergent aux interfaces, caractérisées par des désaccords de maille, de nouveaux écrantages électroniques et effets de confinement. Les outils à développer sont des détecteurs optiques 2D ultra sensibles/rapides (ps) à des rayonnements de longueur d'onde supérieure à  $1.5 \mu\text{m}$ , ainsi que des échantillons encapsulés de grandes dimensions ( $> 100 \mu\text{m}$ ). Ces développements seront des atouts pour étudier dynamiquement le rôle de la symétrie cristalline, des défauts et leurs implantations à façon dans ces nouvelles hétérostructures de feuillets de van der Waals. Un réel défi émerge pour réaliser des excitations sélectives, sur états topologiques, ou sur matériaux 2D neuromorphiques par THz intense.

- **Femtomagnétisme** : Après 30 ans d'étude, il subsiste toujours des zones d'ombres sur les processus sous-jacents au femtomagnétisme. Grâce à l'élaboration d'**hétérostructures** maîtrisée à l'échelle atomique, une électronique de spin ultrarapide ( $\sim 100$  fs) est en plein développement. Les besoins de caractérisation préalable des propriétés magnétiques de ces échantillons et de couplage d'EPSRT pour accéder aux multi-échelles spatiales deviennent cruciaux. Progresser exige des caractérisations structurales, électroniques et magnétiques ultra-rapides. Les EPSRT de STM, ARPES-X résolu en spin et XMCD, notamment aux seuils L et M des métaux de transitions et terres rares, des détecteurs 2D ultra-rapides, mais aussi l'élaboration de **nouvelles hétérostructures aux interfaces optimisées**, faciliteront la compréhension des états transitoires magnétiques liés aux couplages électron-phonon/champ cristallin-magnon/spin-orbite. Ces développements permettront d'aborder l'**attomagnétisme**. L'excitation en X mous ou XUV des électrons de fortes corrélations magnétiques, ou encore l'holographie X résolue en temps sont aussi envisagées. Le développement des EPSRT sur synchrotrons-ps et l'European-XFEL permettra une systématisation de ces études du magnétisme dynamique.

- **EPSRT dans les matériaux** : L'étude des dynamiques fs-ps dans les matériaux trouve un bain de jouvence avec les sources XFEL. Très intense, cette sonde permet par diffraction X cohérente de visualiser l'évolution temporelle de corrélation d'ordre local. Les stations expérimentales convergent vers une fiabilisation et un niveau de maturation bienvenus avec des détections couplées (absorption, émission, diffraction), donnant simultanément accès aux dynamiques de transfert de charge (XAS), aux états d'oxydation, aux états de spin (XES) et à leur couplage avec la relaxation structurale (EXAFS & XRD). Ces sources vont évoluer vers les très hautes énergies (70-100 keV) pour sonder des matériaux plus denses. Les principales avancées récentes concernent les transitions photoinduites de magnétisme, les effets photostrictifs et leur lien avec la polarisation dans les multiferroïques, les transitions de phase photoinduites affectant les propriétés de transport, mais aussi les dynamiques de transition de phase, de microstructure et plasticité, de dissociation et dismutation en **sollicitations ultra-rapides de pres-**

sions et de températures extrêmes. Les systèmes se révèlent être inhomogènes spatialement de par la présence de domaines polaires/magnétiques ou la coexistence de phases présentant des ordres électroniques distincts. Ainsi, la résolution spatio-temporelle des sources de rayons X (aujourd'hui  $\mu\text{m}/\text{fs}$ ) devra tendre vers le **nm/fs**. Une nouvelle ingénierie des domaines est possible *via* l'étude dynamique des déformations structurales et électroniques *in situ* avec de possibles couplages/écrantages entre électron, spin, phonon, pour modifier les propriétés. L'idée est d'**agir sur les matériaux en temps réel (fs-ps) avec un contrôle par un THz non-linéaire** et un suivi par une EPSRT optique/rayons X. On pourrait ainsi visualiser l'importance des symétries locales ou encore des modes polaires, ou simplement libérer l'énergie en pressurant les phonons pertinents. Les nouvelles sources et détecteurs associés permettront de déterminer les conditions HEQ pertinentes des diagrammes de phase à l'équilibre et d'explorer **les diagrammes de phase dits dynamiques**. En s'appuyant sur ces dynamiques microscopiques, l'enjeu majeur est de traiter des problématiques multi-échelles spatiales et temporelles : des propriétés durables des matériaux peuvent-elles être produites en exploitant leurs propriétés physiques ultra-rapides et microscopiques ?

- **En plasmonique ultrarapide**, les enjeux sont de différents ordres. La dynamique de la réponse optique de nano-objets complexes (en composition, forme, assemblage, organisation spatiale) et/ou constitués de nouveaux matériaux plasmoniques (thermochromes à phase métallique, oxyde d'indium et d'étain — ITO, nitrure de titane — TiN, graphène...), présentant des modes plasmon localisés sur des plages spectrales au-delà du visible, est encore mal connue. Par ailleurs, des impulsions  $< 10$  fs permettraient de mieux appréhender les propriétés d'un gaz d'électrons chauds HEQ et de **mieux comprendre les couplages de ces nano-objets avec leur environnement**. Le champ proche exalté fournit en effet une signature ultrarapide de l'environnement direct des nano-objets : gradient de température, état d'oxydation, présence d'autres objets, transfert électronique. Les échanges d'énergie aux interfaces alors induits font de la dynamique optique des nano-objets plasmoniques une sonde permettant d'accéder simultanément aux propriétés mécaniques, optiques et thermiques à l'échelle du nm, dont la compréhension est encore incomplète. Cette dynamique ouvre des perspectives originales pour la conception de nouveaux capteurs rapides à interrogation optique. La sensibilité des modes plasmons et de leur dynamique à un grand nombre de paramètres (morphologie et nature des nano-objets, caractéristiques de la lumière) offre autant de degrés de liberté pour optimiser cette détection. Les couplages entre nano-objets plasmoniques et leur environnement pourront aussi être explorés en EPSRT de TEM/PEEM ou encore de XRD. Les questions encore ouvertes à ce jour, sont **le couplage spin-plasmon et les aspects cohérents ( $< 5$  fs) de l'oscillation collective électronique à la résonance**.

• **La photobiologie ultrarapide** cherche à comprendre le fonctionnement intime du vivant, mais elle est aussi une inspiration continue pour l'élaboration de (nano) matériaux synthétiques à la photoréactivité exacerbée pour la photo-catalyse, les photo-moteurs moléculaires, l'optogénétique ou encore la bioimagerie. Les EPSRT-optiques y sont développées pour révéler les transferts d'énergie/signal électronique ou vibrationnels d'un chromophore niché au sein de biomacromolécules vers l'échafaudage protéique puis vers l'environnement, tandis que la C-RT en X sur des microcristaux permet de visualiser les changements structuraux cohérents. **Une approche multimodale (optique-RT, C-RT en X, théorie) de résolutions fs/nm sur des biomolécules uniques dans leur milieu naturel**, permettrait de comprendre la complexité des multiples étapes qui sous-tendent cette photoréactivité, pour mieux aborder la globalité des réactions biochimiques, y compris des réactions non-photodéclenchables. Des axes souhaitables sont le développement de plateformes multi-échelle pour l'étude *in vitro* et *in vivo* des cohérences et coopérativités menant aux fonctionnalités biologiques, le suivi spatial de H/H<sup>+</sup> au sein des macromolécules, et la prédiction de mutations de protéines permettant de contrôler leur photoréactivité.

• **Les microscopes en transmission ultrarapide (UTEM, <400 fs)** en développement vont s'ouvrir progressivement aux utilisateurs. Ces instruments uniques combinent les échelles nm et fs pour résoudre spatialement presque toutes les dynamiques discutées ci-dessus. Leur atout est leur capacité à sonder directement plusieurs degrés de liberté en combinant les différentes techniques disponibles sur le même instrument (imagerie, diffraction, spectroscopie, holographie). Du fait du faible nombre d'électrons sonde disponibles, les efforts actuels se focalisent sur la mise en œuvre de (I) détection plus efficace (caméra à détection directe) des quelques électrons sonde de 100-300 keV, (II) optimisation du signal (acquisition de piles d'images, réaligement post-acquisition), et (III) stabilisation active des faisceaux électroniques permettant d'accroître significativement les durées d'acquisition pour atteindre l'heure. Ces améliorations ouvriront la voie à l'imagerie, la diffraction et l'holographie électronique-RT ainsi qu'à la détection de l'émission de lumière dans le microscope électronique (cathodoluminescence RT). Ainsi, explorer l'évolution temporelle des propriétés chimiques, électroniques, mécaniques, magnétiques de nano-objets ou d'interfaces, et cartographier les champs magnétiques et électriques générés dans les échantillons sera possible. L'autre axe de développement est la mise en forme spatiale et temporelle de ces impulsions électroniques fs en faisant interagir les sondes électroniques avec un faisceau laser mis en forme. Une perspective de ces techniques est la **génération d'impulsions électroniques as dans un UTEM**.

Les tomographes atomiques par émission de matière seront poussés pour sonder la matière en quantité extrêmement faible (ppm) par évaporation laser avec des impulsions fs-UV-XUV-THz dissociant efficacement les

fragments moléculaires. Une analyse chimique tridimensionnelle structurale **subnanométrique**, capable de détecter des traces d'élément, est alors possible.

• **Les EPSRT de phase diluée** explorent à l'échelle moléculaire comment les dynamiques peuvent être contrôlées par les champs électriques oscillant d'impulsions fs dans une large gamme de moments angulaires et longueurs d'onde. Des révolutions technologiques (capteurs, GPU, IA...) permettent d'aborder des problématiques plus complexes comme les dynamiques d'interférences, d'enchevêtrements et corrélations quantiques, ou de contrôle cohérent. Les sources laser intense à base de titane-saphir (0.1-10 kHz) seront complétées par **les sources fibrées de plus hautes cadences (30 kHz-2 MHz)**, à base d'yttrium de défaut quantique plus faible, pour augmenter drastiquement la puissance moyenne émise. Cette haute cadence ouvre vers **des EPSRT multi-paramétrées** en phase diluée, comme la spectroscopie 2D-UV sensible aux cohérences en sus des populations. Ces développements permettent une interdisciplinarité accrue sur des thématiques d'astrochimie, de chimie, de biologie ou de matériaux, en étudiant sous forme diluée des agrégats, des complexes chimiques, des nanograins isolés et des microjets liquides. L'objectif est toujours de comprendre les premières étapes de photoconversion de l'énergie. **Les expériences aux échelles as** (échelle des temps des dynamiques électroniques à l'ångström) ont marqué les 15 dernières années. Grâce à ces lasers haute-cadence fibrés, les sources as stables entre de 30-300 eV devraient devenir commercialisables pour la caractérisation X-RT et seront **combinées aux grands instruments comme les XFEL**. Enfin, les spectroscopies as seront déployées pour manipuler les propriétés électroniques, à **l'échelle du cycle optique**, créer des états quantiques de la lumière et de la matière ou encore observer et contrôler des transitions de phase.

La compréhension de toutes ces signatures temporelles requiert le développement d'approches phénoménologiques et de calculs mésoscopiques de plus en plus performants. Transversalement à ces diverses EPSRT, les supports théoriques décrivant les dynamiques HEQ couplant les degrés de libertés électroniques et structuraux, activées de manière cohérente ou incohérente dans des interfaces et hétérostructures doivent encore être fortement renforcés.

## LES IONS MULTICHARGÉS

Les ions multichargés et/ou de hautes énergies soumettent la matière à des champs EM > 10<sup>12</sup> V/m et < 10 as. **Pour les interactions en milieux dilués** (molécules, agrégats, nanoparticules), les questions sont : qu'apprend-on des collisions ion-ion quand la perte d'énergie des ions est maximale? Contrôler le nombre d'électrons sur chacun des partenaires de la collision permettra de cartographier la dynamique quantique à N-corps de ce régime de collision. Comment approfondir notre connaissance sur la stabilité et la dynamique de fragmentation après ex-

citation/ionisation induite par des ions de vitesses allant de quelques dixièmes à quelques unités atomiques? Les agrégats moléculaires une fois ionisés et excités peuvent être le siège d'une certaine réactivité. Quelles sont alors les nouvelles espèces moléculaires? **En matière dense**, l'effet du champ extrême, induit par le passage du projectile, conduit à des mécanismes inédits de dynamiques atomiques et à une typologie d'endommagement unique par traces d'ions lourds. Ce type d'irradiation (incluant des irradiations multifaisceaux) a des applications multiples (hadronthérapie, astrochimie, industrie nucléaire, électronique, nanotechnologies, FCI...). Pour mieux cerner les dynamiques de ces traces atomiques, une vraie rupture expérimentale est nécessaire par exemple par **des approches de type EPSRT**. Comment élargir l'utilisation des ions pour contrôler ou sonder la matière? Le développement de **nano/micro faisceaux** pour les **techniques d'analyse ou de gravure** et la meilleure compréhension des **mécanismes de création de défauts** ouvriront la voie à la synthèse de matériaux aux propriétés nano-contrôlées.

## PHYSIQUE ATOMIQUE DES PLASMAS

La physique atomique des plasmas décrit des processus élémentaires qui permettent à la fois de comprendre les propriétés du plasma, mais surtout d'interpréter des observables en termes de paramètres utiles (densité, température, champs EM). Ces données atomiques sont évidemment essentielles en astrophysique. Pour les plasmas issus des expériences menées auprès des grands instruments (e.g. FCM, FCI, XFEL, lasers de puissance), elles conditionnent à la fois la conception de diagnostics spectroscopiques judicieux et la pertinence de simulations numériques souvent lourdes. En appui aux développements en cours et pour pousser vers des conditions encore plus extrêmes, la communauté fait face à des configurations inédites et encore peu explorées.

En particulier, l'évaluation correcte de l'émissivité des plasmas de numéro atomique  $Z$  élevé pour optimiser la conversion du rayonnement X dans les cavités (aux parois) en FCI et pour contrôler les pertes radiatives dans les Tokamaks en FCM (tungstène) est cruciale. La présence de champs magnétiques intenses dans les plasmas astrophysiques (Soleil, naines blanches) et dans les plasmas de laboratoire (FCM et FCI, Z-machine) apporte de nouveaux défis dans la modélisation de leurs propriétés radiatives. Pour le calcul de spectres synthétiques en fort champ magnétique et dans les conditions en haute densité d'énergie, ces investigations nécessitent le développement cohérent de modèles de cinétique des populations, d'hydrodynamique, de physique atomique et de profil de raies, couplés à des modèles de transfert radiatif. Ces études doivent pouvoir se dérouler en parallèle d'expériences ayant des résolutions spatiales et temporelles élevées, et sur des plateformes dédiées à la validation de ces modèles. Pour la matière dense et chaude, la pertinence des méthodes combinant dynamique moléculaire quantique et théorie de la fonctionnelle densité est discutable de par leur vision «matière

condensée» et basse température, qui voit les électrons comme un gaz de Fermi-Dirac sur des cœurs ioniques gelés. Avec la température, ces cœurs ioniques devraient déployer toute la complexité de leur structure atomique. De manière plus générale, **le problème de la structure atomique est un problème à  $N$ -corps loin d'être clos** pour les atomes neutres ou faiblement ionisés où le problème des corrélations entre les électrons peut être très important. Les tables de données spectroscopiques utilisées en astrophysique, dans le X-XUV et LIBS, sont loin d'être complètes voire fiables.

## SOURCES ET ACCÉLÉRATEURS PLASMA

Les plasmas sont des outils formidables pour développer de nouveaux types d'accélérateurs et de nouvelles sources de rayonnements ou de particules avec des propriétés uniques, notamment des champs accélérateurs extrêmes surpassant de plusieurs ordres de grandeur ceux des accélérateurs radiofréquences. La physique de ces sources et accélérateurs va de l'interaction d'impulsions laser ou de faisceaux de particules avec des plasmas sous-denses (cible gazeuse) pour les électrons, positrons et la génération de rayons X et gamma via bêtatron et Compton, jusqu'à l'interaction laser-plasma sur cible solide pour les ions, électrons, neutrons et la génération d'harmoniques et d'impulsions attosecondes intenses sur miroir plasma. Cette physique implique généralement des intensités laser très élevées, au-delà de  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>. Cinq familles d'applications potentielles structurent cette recherche: **les applications sociétales et médicales** (e.g. imagerie, radiothérapie flash, radiographie industrielle), **les FEL**, **la QED en champ fort** (voir ci-dessous), **la physique des hautes énergies** (collisionneur de particules) et **les applications scientifiques** (physique nucléaire en condition plasma, astrophysique de laboratoire, expériences pompe as - sonde as, physique atomique en champs extrêmes et ultra-courts, interaction laser-plasma, matière dense et tiède HEQ). Les premières preuves de FEL basés sur l'accélération plasma en 2020 sont un tournant qui annonce des développements majeurs pour (I) descendre en longueur d'onde (de 27 nm à moins d'un nanomètre); (II) atteindre la saturation du FEL; et même (III) implémenter des techniques avancées permettant le contrôle de la cohérence du rayonnement produit. Ce développement de FEL plasma devra être couplé à des progrès sur l'accélération plasma pour atteindre des **brillances et des qualités extrêmes**, de **fortes charges**, de **hautes énergies**, et une **fiabilité accrue**.

Les avancées dans ce domaine ont déjà permis de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces sources, mais les problèmes restant à résoudre vont ouvrir des axes de recherche à l'horizon 2030. Un exemple emblématique est la perspective d'application à un collisionneur: l'accélération d'**anti-particules** dans un plasma est-elle possible et compatible avec les prérequis d'un collisionneur? Peut-on contrôler les instabilités qui peuvent apparaître à des efficacités énergétiques et des qualités élevées? Peut-on réaliser un accélérateur **multi-étage** sans com-

promettre la qualité du faisceau? Le potentiel applicatif **des ions et des neutrons entrerait dans une nouvelle dimension en s'approchant du GeV** et des jets relativistes. Il reste encore à explorer le passage à un régime d'accélération par pression de rayonnement (attendu à ces énergies relativistes), et à élucider les conditions d'existence de régime d'accélération mixte. Avec nos systèmes laser les plus puissants, **quelles intensités extrêmes peut-on générer avec un miroir plasma** par refocalisation des harmoniques et compression temporelle, et **quelle énergie d'électrons peut-on obtenir sur un seul étage** en dépassant les limites dites de diffraction et de déphasage de l'accélérateur laser-plasma? Ces questions sont fondamentales pour comprendre dans quelle mesure ces systèmes laser, sources et accélérateurs pourront répondre aux besoins de l'application QED en champ fort. À ces questions de physique s'ajoutent des questions d'autres natures : les systèmes laser pourront-ils monter en cadence et en puissance moyenne pour satisfaire les besoins de ces applications? À quel gain peut-on s'attendre en déployant des approches d'ingénierie et d'IA pour améliorer le contrôle, la stabilité et les performances? À ce titre, **la R&D laser reste une priorité**, en partenariat avec les industriels, notamment en explorant d'autres technologies (Yb:YAG, OPCPA, post-compression). Les forces françaises en **haute cadence** laser (e.g. projet LAPLACE) doivent permettre le développement pionnier d'approches IA pour les sources et accélérateurs plasma. Enfin, on peut esquisser quelques frontières particulièrement importantes pour 2030 : s'approcher du GeV pour les ions et les neutrons, dépasser les 10 GeV pour les électrons, démontrer une intensification par plusieurs ordres de grandeur par miroir plasma, obtenir des brillances de faisceau surpassant largement celles des sources et accélérateurs conventionnels. De telles avancées auront un impact majeur en ouvrant largement le champ applicatif, tout particulièrement pour l'astrophysique de laboratoire, la QED et le FEL.

Pour atteindre de tels objectifs, les efforts de recherche doivent s'accompagner de développements instrumentaux. Un besoin commun à la plupart des approches est le développement de **cibles avancées**, en se dotant de la capacité de produire de telles cibles à des coûts abordables. Sur les systèmes laser, la première priorité pour être en mesure d'exploiter à leur plein potentiel nos installations est la fiabilisation et la montée en qualité, en métrologie laser, en diagnostics et en fonctionnalités. Un défi majeur sera notamment de garantir un contraste suffisant tout en augmentant les éclairagements laser sur cible solide.

Transverse à toutes les approches de sources et accélérateurs plasma est l'articulation entre physique et ingénierie, et entre expérience et théorie/simulations. Sans s'opposer à l'approche physique discutée ci-dessus, l'aspect **ingénierie** va monter en puissance (e.g. projet PALLAS), pour transformer des preuves de principe en prototype, voire en machine accessible aux utilisateurs, ce qui est au cœur du projet européen EuPRAXIA. La

**démonstration d'une application** des sources et accélérateurs plasma à son plein potentiel, au-delà de la preuve de principe et en dehors du domaine plasma, est un objectif prioritaire pour 2030 afin de valider le potentiel de ce champ thématique.

## ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN CHAMP FORT

Le domaine de l'électrodynamique quantique (QED) en champ fort (SFQED) caractérisé de manière générale par l'interaction entre des champs EM ultra intenses (dits « forts ») et des photons ou de la matière (particules chargées, cible plasma), est en plein essor grâce aux nouvelles installations expérimentales laser de classe  $\geq 10$  PW-fs (telles qu'Apollon), et parfois combinées avec des accélérateurs de particules. Ce régime peu étudié en laboratoire associe simultanément des processus relativistes et quantiques, tous cruciaux pour comprendre fondamentalement l'interaction matière-rayonnement. Grâce à ces nouvelles installations laser, des phénomènes exotiques sont attendus, notamment la création de paires électron/positron, la non-linéarité du vide et la création de matière et d'antimatière dans le vide à partir de photons seuls. Ces phénomènes, prédits théoriquement, sont invoqués pour expliquer le comportement de certains objets astrophysiques méconnus.

Grâce aux moyens de simulations plus performants et aux nouvelles installations, la SFQED possède un fort potentiel de résultats pionniers. Elle pourra tirer profit des méthodes de physique de hautes énergies et de physique des plasmas pour décrire des phénomènes astrophysiques, mais aussi la génération de photons très énergétiques ou de faisceaux de particules inhabituelles. Un des défis principaux est de développer des schémas **s'approchant du champ de Schwinger** (champ seuil des effets SFQED) avec des installations disponibles en combinaison des sources laser, de particules et/ou de rayonnement secondaire (suite à l'interaction entre laser et plasma, laser et faisceau d'électrons, faisceau d'électrons et plasma, harmoniques focalisées, etc.). Ces études pourraient se concentrer sur la génération de photons gamma de très haute énergie et la création de paires électron/positron avec des effets de cascade et/ou avalanche selon le régime de champ électromagnétique accessible par les lasers dépassant les 10 PW-fs. La création d'un plasma de paires et l'étude de son comportement seront en lien très fort avec l'astrophysique et la création de champs magnétiques intenses. Du point de vue théorique, la description des régimes de SFQED non perturbatifs pour des champs allant bien au-delà du champ de Schwinger s'annonce comme un nouveau régime à explorer.

## ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE

En raison de limitations de résolution et de dynamique, les observations astronomiques ne parviennent pas toujours à appréhender précisément toutes les situations



Bancs de condensateurs du LNCMI. © Oliver PORTUGALL

astrophysiques et leurs évolutions. Les avancées dans le développement des lasers de haute énergie (kJ-ns), couplées à l'application des lois d'échelle des systèmes astronomiques, permettent de produire en laboratoire des données inestimables complétant les observations astronomiques et permettant de tester les modèles théoriques. Le foisonnement des résultats récents découle de la possibilité d'adopter une approche paramétrique et reproductible de ces phénomènes astrophysiques. Les exemples incluent, sans s'y limiter : (i) la physique des chocs radiatifs et magnétisés, tels que ceux des vestiges de supernovae ; (ii) l'accélération des rayons cosmiques et les instabilités plasmatiques associées ; (iii) les opacités pour les intérieurs stellaires ; (iv) les processus d'accrétion et d'éjection de matière dans les étoiles nouvellement formées ainsi que dans les étoiles évoluées et les objets compacts ; (v) les instabilités fluides et thermiques ; et (vi) la reconnexion magnétique et la turbulence dans les régimes fortement compressibles. Ces dernières années, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine du couplage laser-plasma et champ magnétique externe, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche sur les plasmas magnétisés, omniprésents dans l'univers. Pour aller plus loin, des diagnostics innovants basés sur des sources secondaires souvent générées par des lasers d'impulsion fs-ps (multi-PW, XFEL) devront être couplés avec des systèmes laser ns de classe kJ. Les outils de modélisation développés en support aux expériences couvrent en partie les régimes cinétiques et magnéto-fluides, mais devront être poussés au-delà. Ces avancées contribueront à améliorer notre compréhension des phénomènes parmi les plus énergétiques de l'univers, tout en aidant la communauté à comprendre et

interpréter les actuelles et futures observations terrestres et spatiales.

## PHYSIQUE DES HAUTES PRESSIONS

La physique des hautes pressions cherche à explorer la matière très condensée à toutes les échelles. Dans des systèmes comportant au moins trois espèces atomiques et même dans des matériaux réputés simples (hydrogène), on ne peut actuellement réellement ni mesurer ni prédire des propriétés telles que le caractère isolant/métal, solide/liquide, la supraconductivité ou le caractère super-ionique dès lors que la pression est de l'ordre du térapascal (1 TPa = 10 Mbar). De nouveaux outils expérimentaux commencent à franchir cette nouvelle frontière de pression. Le défi est de mettre en place des mesures précises sous de telles conditions thermodynamiques.

Une immense révolution scientifique est en cours avec la découverte de nombreuses exoplanètes telluriques de diamètres significativement plus élevés que celui de la Terre. Dans ces objets, les pressions sont typiquement dix fois plus grandes qu'au centre de notre planète (0.36 TPa). Pour cette raison, les propriétés macroscopiques (solide/liquide, métallique/isolant) de leurs matériaux constitutifs restent inconnues. Or ces données seraient nécessaires pour comprendre la formation, l'évolution, et in fine l'habitabilité de ces corps célestes. Ce domaine de pression est également pertinent pour les planètes de type Uranus ou Neptune qui abritent dans leurs manteaux d'énormes masses de glaces à l'état fluide ou solide, sans doute super-ioniques et parfois capables d'entretenir des dynamos magnétiques. Enfin, la compréhension des géantes



gazeuses de type Jupiter ou super-Jupiter, encore plus comprimées, nécessiterait de déterminer le diagramme de phases de l'hydrogène et de l'hélium dans le domaine du TPa. Ces planètes géantes pourraient aussi contenir **des phases condensées encore totalement inconnues.**

L'expérimentation à ces pressions extrêmes permettrait aussi des avancées majeures en physique de la matière condensée par la découverte de nouveaux états électroniques et de phénomènes quantiques (comme la supraconductivité) à des températures inhabituellement élevées ou d'hybridation d'orbitales atomiques de cœur (chimie du keV). L'explosion récente de la **chimie du Mbar** démontre la potentialité des synthèses haute pression de matériaux innovants (super-hydrures, poly-N, clathrates) pour le transport et le stockage d'énergie. Un enjeu majeur sera de développer des méthodes pour stabiliser à pression ambiante ces matériaux métastables. Comme évoqué dans d'autres sections, des progrès dans le domaine des matériaux quantiques viendront du couplage des pressions extrêmes en enclume diamant (DAC) avec d'autres paramètres (basses températures, champs intenses...) et des techniques spectroscopiques de plus en plus sophistiquées.

Plusieurs TPa et quelques milliers de Kelvin peuvent être maintenus dans la matière condensée par une combinaison de chocs et de compressions isentropes, à condition d'utiliser des lasers capables de délivrer des énergies très élevées pendant quelques ns. **Pour atteindre des pressions jusqu'à 1 TPa, il faudra associer un laser de classe kJ-ns à des sources de rayons X-ps/fs et de grande qualité spectrale telles qu'un synchrotron (ps) ou surtout un XFEL.**

Toutes ces avancées ne seront réellement possibles que si la **fabrication de précision des matériaux cibles** utilisés dans ces expériences connaît un progrès important et concerté.

En parallèle, la précision numérique des mesures sous haute pression doit fortement s'améliorer, et plus particulièrement la détermination des températures, pour obtenir des diagrammes de phases quantitatifs à partir des énergies libres calculées. Des mesures systématiques de diffraction et diffusion de rayons X pendant la compression laser permettraient des améliorations additionnelles. Les cellules enclumes de diamant ont fait d'énormes progrès en termes de pressions atteintes et de précision des mesures de température. Il reste à améliorer le chauffage laser en DAC, en s'appuyant sur des diagnostics résolus en temps, et à étendre les domaines de pression accessible (du DAC au-delà de 0.4 TPa reste trop exceptionnel). **Cette prospective détermine comme prioritaire la possibilité d'expériences de qualité métrologique jusqu'à 0.5 TPa et quelques milliers de Kelvin en couplant DAC et sources ultra brillantes de rayonnement synchrotron.** Ce domaine étendu de pression et température des DAC permettra un progrès majeur de la thermodynamique des conditions extrêmes.

Sera-t-on pour autant en mesure d'atteindre un état d'équilibre thermodynamique dans le matériau complexe fortement comprimé par laser pendant les quelques ns disponibles après la rampe de compression? **Il n'existe aucune théorie ni modélisation numérique** capable de répondre de manière exhaustive à la question cruciale du comportement de la matière comprimée rapidement lorsque les durées approchent celles du temps de l'équilibre thermodynamique. En couplant des sources X très résolues en temps avec des compressions dynamiques (ns), des DAC dynamiques (ms) et DAC statiques (>1 s), on sera en mesure de suivre les chemins réactionnels et de déformations précis au cours de la compression/chauffage. Avec l'appui de modélisations numériques, une compréhension générale des modes de relaxation de la matière condensée en réponse à des sollicitations à différentes échelles temporelles et à des pressions vraiment extrêmes sera alors envisageable.

## **RECHERCHE FONDAMENTALE DANS LE CONTEXTE DE LA FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL (FCI)**

Une étape extrêmement importante pour la démonstration de la FCI comme source d'énergie a été franchie en 2022 à la National Ignition Facility: dans un schéma dit d'attaque indirecte, l'énergie de fusion produite (3,15 MJ avec point chaud central à 0,5 Tbar et  $T_{\text{ion}} \sim 13$  keV) a dépassé l'énergie de 2 MJ investie par faisceaux laser, soit un gain d'énergie  $G=1,5$  avec la création d'un plasma dans le régime de combustion thermonucléaire. Cette démonstration n'est qu'un premier pas vers la génération d'énergie. La viabilité d'un réacteur à fusion dépend de notre capacité à relever de nombreux défis: **(I) atteindre  $G > 100$ ; (II) augmenter la cadence laser jusqu'à quelques tirs par seconde; et (III) augmenter le rendement laser à plus de quelques dizaines de %.** Cependant, le concept d'attaque directe dans lequel la cible est directement irradiée par les lasers, est préférable pour augmenter les gains cible  $G$ . Différents schémas d'attaque indirecte font l'objet de recherches fondamentales: (I) l'allumage par choc qui utilise une seconde impulsion laser plus intense; (II) l'allumage rapide par ions légers énergétiques qui demande le couplage avec des lasers plus courts (10 ps); ou (III) l'allumage par implosion laser assistée par un champ magnétique externe d'amorçage. Les défis sont **de maîtriser l'interaction laser-plasma, les instabilités hydrodynamiques ainsi que les turbulences associées pour atteindre une reproductibilité des processus d'allumage des combustibles.** À ceci vient s'ajouter le développement de **cibles plus performantes et de matériaux plus résistants** aux conditions extrêmes du réacteur. L'obtention de l'ignition est indispensable pour la production d'énergie, mais elle ouvre également un champ de recherche encore inexploré en physique des plasmas: le **régime de combustion nucléaire.** Les processus fondamentaux de ces plasmas de fusion (dépôt et transport d'énergie, pouvoir d'arrêt des particules rapides) sont encore mal connus.

## RECHERCHE FONDAMENTALE POUR LA FUSION PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE (FCM)

La FCM nécessite le maintien d'un plasma D-T d'une densité de  $10^{20}$  particules/m<sup>3</sup> à une température de  $3.10^8$  K pendant un temps suffisamment long pour permettre aux réactions de fusion thermonucléaires de se produire. Cette température chute à environ  $10^4$  K sur une distance de 2 m dans le tokamak ITER, près de l'enceinte à vide. L'interaction du plasma avec le champ EM et avec ce gradient de pression a des conséquences majeures sur le confinement plasma. Les conditions de bord spécifiques aux tokamaks jouent un rôle crucial dans la physique de l'interaction plasma-paroi. L'un des objectifs de la décennie à venir est **de développer des diagnostics extrêmement précis, accompagnés de modélisations bénéficiant des dernières avancées en calcul de haute performance afin de progresser dans la compréhension des mécanismes en jeu**. Les tokamaks dédiés à la recherche fondamentale (WEST à Cadarache et DTT en Italie par exemple) jusqu'au démarrage d'ITER seront utilisés dans la décennie 2030, pour comprendre l'organisation des modes dans le plasma et l'optimisation du régime d'opération. Les résultats d'ITER conditionneront l'avancée vers un futur réacteur de démonstration, potentiellement plus compact grâce aux aimants HT<sub>c</sub> (certains projets existent déjà aux USA et en Chine). Le développement de ces machines FCM d'accompagnement est primordial également pour maintenir la formation des jeunes chercheurs dans le domaine de la recherche sur l'énergie thermonucléaire (par ex. SPEKTRE à l'IJL, Nancy).

## CHAMPS MAGNÉTIQUES INTENSES

Ce domaine scientifique est intimement lié à la fois aux progrès de l'outil champ magnétique lui-même et à la notion d'extrême qui ne se limite pas à la valeur maximale du champ, mais qui inclut aussi le volume et le temps disponibles voire sa stabilité spatiale et temporelle. Au niveau mondial, le fait majeur est l'arrivée récente de bobines en supraconducteur à haute température critique (HT<sub>c</sub>), qui permettent de générer des champs continus (environ deux fois) plus intenses qu'avec des supraconducteurs bas-T<sub>c</sub> (BT<sub>c</sub>). Si elles n'égalent pas pour l'instant les champs records des bobines résistives ou hybrides, ces bobines HT<sub>c</sub>, insérées dans des bobines BT<sub>c</sub>, atteignent déjà environ 30 T avec tous les avantages de la supraconductivité : stabilité temporelle, durée d'expérience illimitée, très faibles perturbations électriques et mécaniques et surtout bien moindre consommation électrique. Même si la fiabilité de ces dispositifs complexes reste un défi, ces progrès devraient changer la donne dans de nombreux domaines, à l'échelle d'une ou plusieurs décennies. L'exemple le plus médiatique est la **fusion par confinement magnétique** où le gain en champ ( $B$ ) réduit significativement le volume de confinement  $V \propto B^{-4}$ , à puissance de fusion égale. Cela permettrait de construire des machines plus compactes, dont l'intérêt pour la re-

cherche fondamentale est évoqué ci-dessus. En matière condensée, des temps de comptage de plusieurs jours requis par certaines spectroscopies (optique, champ proche, résonance magnétique nucléaire) seront désormais possibles au-delà de 20 T. Un tel aimant HT<sub>c</sub> est en développement et viendra compléter les installations déjà disponibles au niveau national (champs résistifs continus jusqu'à 36 T et 43 T attendus en bobine hybride, champs résistifs pulsés jusqu'à 98,8 T, voire 200 T dans l'installation semi-destructive Megagauss). Les progrès de ces installations, en termes de champ maximal, de volume de champ disponible, de compromis champ maximal/temps de pulse, et de fiabilité vont impacter de nombreux domaines de la physique dans la prochaine décennie.

C'est d'abord le cas en **physique de la matière condensée**, et notamment dans le domaine des matériaux quantiques où les champs intenses servent à **comprendre et contrôler** les propriétés magnétiques, électroniques ou optiques. Ici, les progrès concerneront autant les techniques expérimentales que les bobines de champ. L'éventail des expériences va s'élargir aux techniques d'imagerie, optiques ou en champ proche (microscopie par effet tunnel notamment), qui devraient bénéficier de la montée en puissance des bobines HT<sub>c</sub>, ainsi qu'aux spectroscopies résolues en temps (du THz aux rayons X) qui sont adaptées aux champs continus comme pulsés. Les premiers pas très récents de photoémission résolue en angle sous champ, même embryonnaires (0.1 T), démontrent bien toute l'importance de la variable champ magnétique. Les champs (continus et pulsés) vont continuer à se développer dans les **grands instruments** (source de neutrons, synchrotron, laser intense et XFEL) où leur énorme potentiel est encore sous-exploité malgré des résultats déjà probants. Pour certaines mesures (RMN, imagerie optique, caractérisation de câbles supraconducteurs) les champs pulsés ne remplaceront jamais les champs continus, mais ils pourront contribuer à des résultats novateurs. Toutes ces techniques expérimentales vont aussi être associées à des conditions de plus en plus extrêmes de température (cryostats à <sup>3</sup>He ou à dilution <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He) et/ou de pression en cellules à enclume diamant (de quelques dizaines à quelques centaines de GPa).

Ces développements bénéficieront aux sujets à fort potentiel en découverte de nouveaux composés comme les matériaux 2D, les matériaux topologiques ou les supraconducteurs à éléments légers, mais aussi pour tous les états exotiques induits par le champ magnétique : états supraconducteurs spatialement texturés ou réentrants, états liquide de spins (systèmes Kitaev et autres), transitions de phases quantiques vers des états magnétiques ou électroniques inédits. On peut espérer qu'à terme ces systèmes soient compris avec la même précision que les systèmes unidimensionnels où le champ permet un tel contrôle des corrélations électroniques que l'on considère parfois ces systèmes comme des simulateurs quantiques. Enfin, les cuprates HT<sub>c</sub>, dont la supraconductivité peut être détruite en champ intense, sont une thématique encore très limitée par l'intensité du champ. Il ne

fait aucun doute que des progrès sont à prévoir dans les dix ans à venir, par exemple via des mesures de transport en installation Megagauss. À long terme, des champs de plusieurs centaines de Tesla pourraient permettre de contrôler les propriétés de la matière en agissant directement sur la liaison chimique.

Les progrès en termes de champ maximal dans un volume donné ont pour corollaire l'augmentation du volume disponible à champ identique, une dimension essentielle pour certaines recherches fondamentales comme appliquées. On citera notamment l'**astrophysique de laboratoire** où les gains en intensité de champ enrichiront l'éventail des sujets d'étude alors que les gains en volume permettront d'implémenter des outils de diagnostic de plus en plus précis, par exemple via un XFEL. Par ailleurs, des champs résistifs pulsés pourraient venir compléter le schéma de FCI. Les champs continus, eux, sont amenés à être utilisés pour une branche émergente de la **physique des particules**, les très basses énergies, où certains candidats pour la matière noire (axions et particules axion-like) ou pour l'énergie noire (caméléons) pourraient être détectés via leur oscillation quantique avec un photon, induite par le champ (probabilité de détection  $\propto V B^2$  dans un volume  $V$ ).

Si l'apport des champs magnétiques extrêmes est reconnu dans de nombreux autres domaines (caractérisation de câbles supraconducteurs, biréfringence du vide), leur potentiel paraît encore sous-exploité. Par exemple, des métaux liquides, voire des électrolytes transparents en champs extrêmes continus, permettent d'aborder des questions fondamentales de **magnétohydrodynamique** (effet dynamo, ondes d'Alfvén ou magnéto-Coriolis, transition 2D/3D de la turbulence). Les larges volumes permettront aussi de mieux exploiter les gradients de champ, utiles en astro/géophysique de laboratoire, dans les expériences de lévitation qui simulent des conditions de microgravité ou encore en **magnétoscience** à haute température (~2000°C).

## LA PHYSIQUE AU MILLIKELVIN, DITE BASSES TEMPÉRATURES

Les basses températures désignent un domaine de la physique de la matière condensée où des techniques cryogéniques **refroidissent une quantité macroscopique de matière** liquide ou solide. Ceci peut inclure des circuits mésoscopiques lithographiés, un échantillon, sa cellule expérimentale, et souvent une partie de l'équipement de mesure (ex: préamplificateur bas bruit). Ces techniques sont donc distinctes du refroidissement par laser des atomes froids (voire des ions ou nanoparticules piégés optiquement).

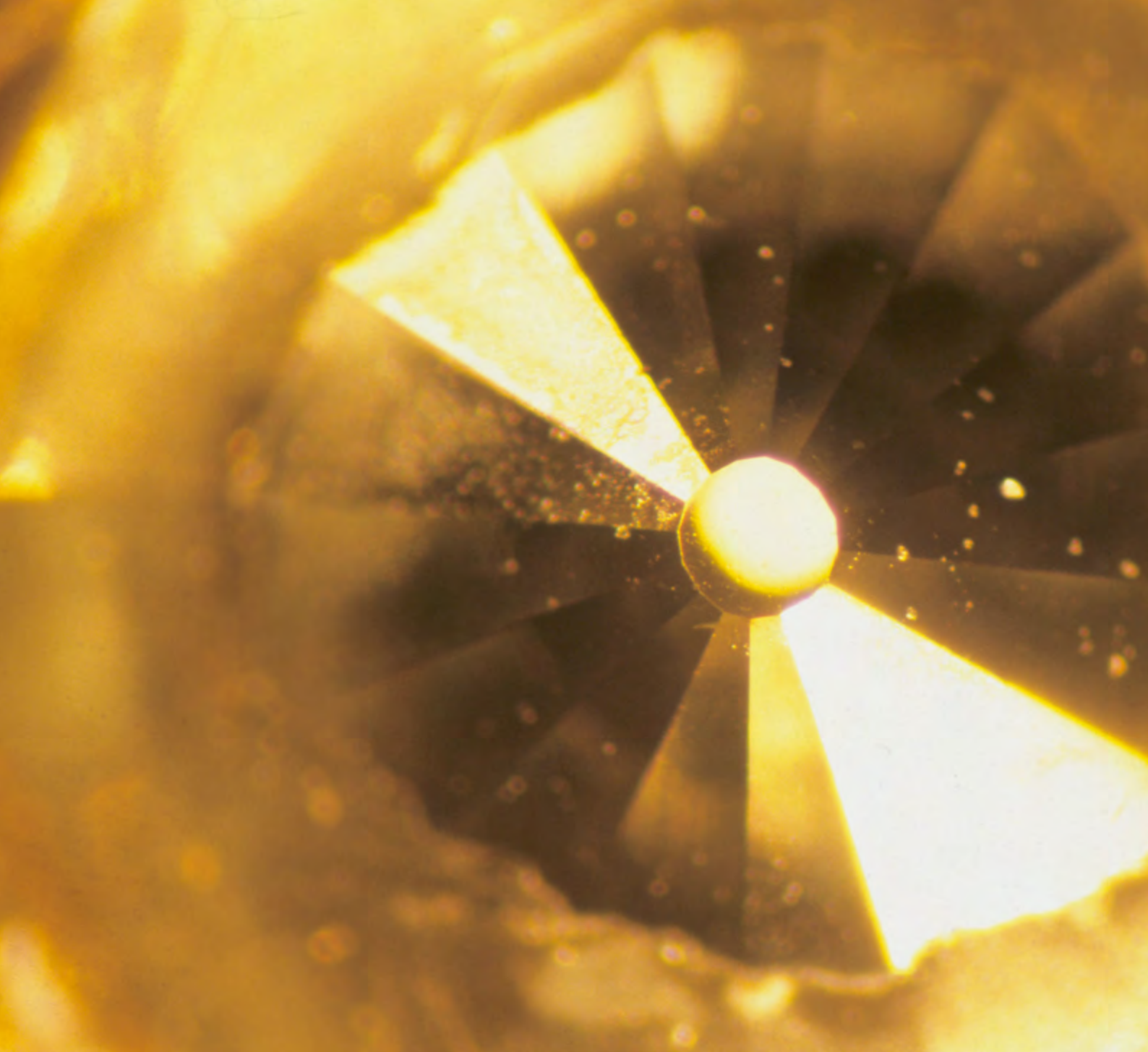
Une forte expertise en cryogénie est présente en France et en Europe (avec de fortes collaborations), ce qui a permis une recherche académique de premier plan à basse température et a aussi mené à un certain nombre de startups, comme Silent Waves récemment en France

(amplificateurs quantiques). La notion d'extrême en cryogénie ne se caractérise pas simplement par la seule température  $T$ , mais par une combinaison  $T \ll 300$  K avec un champ magnétique  $B$ , une pression  $P$ , ou une certaine résolution de mesure (en temps, en énergie - à la limite quantique par exemple). Les prospectives en cryogénie peuvent se décrire selon trois axes :

— **Technologie habilitante** : qui recouvre les domaines utilisateurs de machines frigorifiques où les sujets de recherches sont déjà matures, avec des technologies cryogéniques commercialement disponibles, mais où un **saut technologique sera nécessaire** pour faire avancer l'ingénierie et l'applicabilité concrète des recherches. C'est typiquement le cas de l'ingénierie quantique. La détection quantique (cryptographie basée sur des photons) demandera des systèmes basse puissance, de mise en froid rapide et très compacts, atteignant des températures de l'ordre du Kelvin (par désaimantation de sels paramagnétiques, par exemple). À l'inverse, les qubits de spin semi-conducteurs demanderont des plateformes très grandes, très puissantes, atteignant 500 mK (e.g. cryostat à circulation de  $^3\text{He}$ ). Enfin les qubits supraconducteurs requièrent aussi des grandes tailles et de fortes puissances, mais des températures de l'ordre de 10 mK (cryostat à dilution « hors normes »). De telles plateformes sont en partie en développement aujourd'hui, en partenariat entre l'académique et le privé, avec de vrais défis technologiques à la clé.

— **Les matériaux quantiques** : un volume important des recherches à basse température s'intéresse à la compréhension fondamentale de la physique (quantique) régissant la matière, sur de nouveaux matériaux, comme les supraconducteurs non conventionnels, les gaz 2D d'électrons dans les semiconducteurs, les états topologiques et excitations exotiques (fermions de Majorana et autres quasi-particules anyoniques), le magnétisme frustré (liquides de spins et verres de spins) ou les ondes de densité de charge. Beaucoup de ces systèmes donnent lieu à des points critiques quantiques (transitions de phases à  $T=0$ ) dont l'étude nécessite de très basses températures, mais aussi d'autres conditions extrêmes comme les forts champs ou les hautes pressions. Les difficultés inhérentes à la synthèse de ces nouveaux matériaux font qu'il est **souvent crucial de faire plusieurs mesures différentes sur le même échantillon**, ce qui rend la mesure également extrême. Le défi sera ici de proposer des systèmes qui soient polyvalents, adaptés aux très petits échantillons (dont la synthèse est souvent un défi), et intégrant de multiples sondes afin d'effectuer simultanément diverses mesures (e.g. transport thermique et spectroscopie), sur le même échantillon. La compatibilité basse température/fort champ ou haute pression, ainsi que celles de différentes techniques de mesure et leur intégration (fenêtre optique et cryogénie, par exemple) nécessiteront de nouveaux développements cryogéniques complexes, souvent spécifiques à chaque niche.

— **Dans le domaine de la cryogénie ultime** (fluides et solides quantiques, systèmes-modèles), les développements vers des températures toujours plus froides vont de pair avec les **recherches les plus fondamentales**



Enclume diamant : facettes et table expérimentale.  
© Richard LAMOUREUX/CNRS Images

**en physique de la matière condensée.** L'étude de l' $^3\text{He}$  superfluide, un système-modèle unique, nécessite des températures records aussi basses que  $100\ \mu\text{K}$  (par désaimantation adiabatique nucléaire), atteintes uniquement dans quelques laboratoires dans le monde. L'étude des propriétés basse énergie des systèmes amorphes est elle aussi conduite jusqu'à ces températures extrêmes, afin de révéler la nature des excitations élémentaires de ces systèmes (systèmes à deux niveaux). Des systèmes-modèles uniques (à base d'hélium, de résonateurs nano-mécaniques ou micro-ondes) permettent de faire le lien entre la physique de la matière condensée et

d'autres branches de la physique : cosmologie (transition de phases de l' $^3\text{He}$ ), gravitation quantique (opto-mécanique ultra-froide), physique des particules (recherche d'axions en cavité supraconductrice), ou encore physique moléculaire (spectroscopie et dynamique de dopants en gouttelettes d' $^4\text{He}$  superfluide). La recherche de nouveaux états exotiques de la matière conduit à descendre toujours plus bas en température, afin de résoudre de nouveaux phénomènes (par exemple l'interaction des électrons avec les spins nucléaires). Implémenter de telles technologies est éminemment complexe, et requiert un savoir-faire tout particulier.



## SIGLES

**ARPES**: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy

**as**: attoseconde

**C-RT**: Cristallographie Résolue en Temps

**DAC**: enclumes de diamant

**D-T**: Deutérium-Tritium

**EELS**: Electron Energy Loss Spectroscopy

**ELI**: Extreme Light Infrastructure

**EM**: ElectroMagnétique

**EPSRT**: Expérience Pompe-Sonde Résolue en Temps

**EXAFS**: Extended X-ray Absorption Fine Structure

**FEL**: Free Electron Laser ou laser à électron libre

**fs**: femtoseconde

**FCI**: Fusion par Confinement Inertiel

**FCM**: Fusion par Confinement Magnétique

**HEQ**: Hors-Équilibre

**IA**: Intelligence Artificielle

**LIBS**: Laser Induced Breakdown Spectroscopy

**LLNL**: Lawrence Livermore National Laboratory

**ns**: nanoseconde

**PNL**: Phononique Non-Linéaire

**PEEM**: PhotoEmission Electron Microscopy

**ps**: picoseconde

**QED**: électrodynamique quantique

**R&D**: Recherche et Développement

**RMN**: Résonance Magnétique Nucléaire

**RT**: Résolu en Temps

**SFQED**: électrodynamique quantique en champ fort

**STM**: Scanning Tunneling Microscope

**TEM**: Transmission Electron Microscopy

**UTEM**: Ultrafast Transmission Electron Microscopy

**XAS**: X-ray Absorption Spectroscopy

**XES**: X-ray Emission Spectroscopy

**XFEL**: X-Ray Free-Electron Laser facility

**XMCD**: X-ray Magnetic Circular Dichroism

**XRC** ou **XRD**: X-ray Crystallography/Diffraction