

Rapport de Conjoncture – Section 03

Section 03 : Matière condensée : structures et propriétés électroniques :

Membres : Jean-Marie GEORGE (président de section), Ricardo LOBO (secrétaire scientifique), Emmanuel BERAUDO, Stéphane BERCIAUD, Michele CASULA, Maria CHAMARRO, Marcello CIVELLI, Johann CORAUX, Sophie DE BRION, Abdeslem FNIDIKI, Sylvie HEBERT, Karine LE HUR, Ivan MAKSIMOVIC, Aurélien MANCHON, François PARMENTIER, Isabelle PHILIP, Cedric ROBERT, Céline ROUX-BYL, Joao SAMPAIO, Fausto SIROTTI

Table of Contents

<i>Rapport de Conjoncture – Section 03</i>	1
1 Introduction.....	3
2 Physique du spin.....	5
2.1 Contexte et Périmètre.....	5
2.2 Tendances et évolution.....	5
2.3 Force, opportunités, faiblesses et points de vigilance	6
3 Sciences des matériaux	7
3.1 Contexte	7
3.2 Familles de solides cristallins dans une perspective historique.....	7
3.2.1 Instrumentation.....	8
3.2.2 Moyens humains.....	8
3.3 Quelques tendances et évolutions récentes	8
3.3.1 Ingénierie de propriétés	8
3.3.2 Matériaux de dimensionnalité basse ou mixte	9
3.3.3 Physique des surfaces	9
3.4 Forces et opportunités, faiblesses et points de vigilance.....	9
4 Physique mésoscopique et information quantique.....	10
4.1 Contexte et périmètre.....	10
4.2 Tendances et évolution.....	10
4.2.1 Physique mésoscopique.....	10
4.2.2 Information quantique	11
4.3 Forces, opportunités, faiblesses et points de vigilance.....	13
5 Physique des états électroniques, des corrélations et interactions.....	14
5.1 Contexte et Périmètre.....	14
5.2 Tendances et évolution.....	14
5.3 Force opportunités, faiblesse et points de vigilance.....	15
6 Optique de la matière condensée	16
6.1 Contexte et Périmètre.....	16
6.2 Tendances et évolution.....	17

6.3	Force opportunités, faiblesse et points de vigilance	17
7	Grands Instruments et Plateformes	19
7.1	Contexte et Périmètre	19
7.2	Rayonnement électromagnétique	19
7.2.1	Sources synchrotron.....	19
7.2.2	Lasers à électrons libres.....	19
7.2.3	Sources laser femtoseconde et attoseconde, génération d'harmoniques.....	19
7.3	Sources de neutrons.....	20
7.4	Champs magnétiques intenses.....	20
7.5	Microscopie électronique	20
7.6	Plateforme de micro/nanofabrication	21
7.7	Tendances et évolution.....	21
7.8	Force opportunités, faiblesse et points de vigilance	22
8	Chercheurs de la section 3	22
8.1	Profil et données statistiques	22
8.2	Perception et répartition des chercheurs dans les thèmes de la section 3.....	24
8.3	Réflexion sur les activités en science des matériaux.....	26

1 Introduction

Le rapport de conjoncture de la section 3 du Comité National de la Recherche Scientifique, à la demande du PDG du CNRS, intervient à mi-mandat avec une année particulière qui a vu l'absence d'évaluation des chercheurs afin de rephaser l'avis de renouvellement des laboratoires avec l'évaluation des chercheurs de ces laboratoires. Ce décalage a été induit par le retard pris par l'HCERES à la suite de la pandémie de COVID19. Le contenu de ce rapport repose sur la connaissance des membres de la section 03 des recherches menées dans son périmètre, sur l'évaluation de la vague E, C et A et sur les projets soumis aux concours CRCN et DR 2022 et 2023. Des précisions supplémentaires ont été obtenues auprès de chercheurs reconnus pour leurs compétences dans des domaines spécifiques.

1.1 Périmètre scientifique

La section 3 est rattachée à l'Institut de Physique (CNRS Physique) et les recherches menées en son sein concernent la matière condensée : structure et propriétés électroniques. Il s'agit principalement de comprendre comment s'organise la matière, comment la structurer à façon et quelles en sont les propriétés particulières qui en résultent sur les éléments constitutifs (électrons et atomes). Une tendance démarrée de longue date vise à s'intéresser aux processus émergents aux échelles réduites et aux temps ultimes et repose sur le développement expérimental de techniques de plus en plus performantes. A titre d'exemple, l'engouement récent pour les propriétés des matériaux 2D de type van der Waals a bénéficié d'outils expérimentaux déjà mis en place dans de nombreux champs thématiques de la matière condensée. Au-delà de l'aspect purement fondamental, la compréhension phénomènes émergents en matière condensée aux petites échelles et la maîtrise de l'élaboration et de la structuration des matériaux visent aussi à découvrir de nouvelles fonctionnalités qui pourront éventuellement répondre à un certain nombre de défis sociétaux. Cette tradition associant recherche fondamentale et orientée, est longue dans le domaine de la matière condensée et les découvertes issues de ce champ de recherche sont utilisés tous les jours et depuis longtemps.

Un peu moins de 300 chercheurs sont affiliés à la section 03. Les recherches dans la matière condensée : structure et propriétés électroniques ne s'arrêtent pas aux portes de la section 03 et une certaine porosité ou recouvrement peut apparaître avec d'autres sections, de façon inhérente à tout découpage. A l'heure où l'interdisciplinarité est mise en avant cela atteste de notre point de vue d'une certaine vitalité. On peut citer en particulier les recouvrements avec la section 08 sur certains développements de preuves de concept (CNRS Ingénierie), avec la section 15 sur un aspect matériaux (CNRS Chimie) et avec les sections 02 (théorie), 04 (optique) et 05 (matériaux) de CNRS Physique. Le périmètre scientifique de la section 03 reste cependant relativement bien défini et les 21 membres de la section réunissent l'expertise nécessaire pour couvrir la diversité scientifique des recherches menées au sein de la section.

Nous avons découpé les activités des chercheurs en grands champs thématiques pour faire ce rapport. Comme tout découpage, il a ses limites et certains recouvrements sont inévitables, certaines recherches pouvant élarger à plusieurs axes. Les champs thématiques que nous avons identifiés sont :

1. Physique du spin
2. Science des matériaux
3. Physique mésoscopique et information quantique
4. Physique des états électroniques, des corrélations et interactions
5. Optique de la matière condensée
6. Grands Instruments et Plateforme.

Les tendances et activités scientifiques menées dans ces domaines seront développées par la suite. La deuxième partie de ce rapport de conjoncture précise le profil des chercheurs de la section 3 à l'aide de quelques données statistiques. Elle s'appuiera en particulier sur des données statistiques fournies par les ressources humaines du CNRS et sur une enquête menée auprès des chercheurs et enseignants chercheurs dont les thématiques entrent dans le champ d'investigation de la section 3.

Nous avons délibérément fait le choix d'intégrer la physique théorique (25 % de la recherche en section 3) à l'intérieur de ces thèmes. Il n'en reste pas moins que la physique théorique au sein de la section 3 constitue une branche particulière qui a développé des outils spécifiques dont on peut décliner ci-dessous les grandes orientations et les enjeux.

1.2 Orientations et enjeux en physique théorique

L'effort théorique déployé se concentre sur la modélisation des propriétés des matériaux par des méthodes semi-réalistes, telles que les Hamiltoniens modèles ou les liaisons fortes, *ab initio*, telles que la théorie de fonctionnelle de la densité, ou par des approches avancées qui incluent explicitement les effets des corrélations, mais aussi des approches phénoménologiques inspirées de la théorie des champs classique, telles que le micromagnétisme. Cette entreprise riche et variée soutient les activités expérimentales dans plusieurs domaines, transverses par rapport aux champs thématiques évoqués ci-dessus comme l'énergie (supraconductivité, ferroélectricité, thermoélectricité, batteries), le stockage de l'information (mémoires, matériaux multiferroïques), les technologies quantiques et le « hardware quantique » qui les sous-tend (qubits solides ou photoniques, systèmes quantiques hybrides), l'optique (spectroscopie théorique, électrodynamique quantique dans la matière condensée, dynamique quantique non-linéaire, transfert de moment angulaire, génération d'harmoniques élevées). On constate que de nombreuses modélisations théoriques qui n'étaient pas envisageables il y a quelques années sont à présent possibles. Ce progrès est dû aux avancées récentes effectuées dans le développement de la théorie des fonctions de Wannier, l'extension de la théorie du champ moyen dynamique et au développement d'approches alternatives telles que le GW et le Monte Carlo quantique. Des résultats très prometteurs ont aussi été obtenus grâce à des méthodes basées sur l'apprentissage automatique. Une forte impulsion a été donnée dans ce contexte par les avancées expérimentales dans la synthèse de nouveaux matériaux et dans l'étude des supraconducteurs non-conventionnels, du magnétisme frustré et de ses excitations exotiques, du transport de spin, du couplage lumière-matière dans le cadre de l'information quantique, de la statistique quantique des particules, soit-elle non conventionnelle comme dans le cas des anyons non-abéliens. Cette activité florissante pourrait aboutir, dans un futur proche, à une évolution thématique de notre communauté scientifique vers des sujets tels que la dynamique ultra-rapide et la cohérence quantique, dont le périmètre confine avec plusieurs sections du CNRS. Dans ce cadre, de nouveaux développements méthodologiques deviennent nécessaires, afin de modéliser rigoureusement les phénomènes aux interfaces (entre magnétisme et supraconductivité, ou entre physique quantique et thermodynamique statistique, par exemple), mais aussi les phénomènes dépendant du temps (contrôle terahertz) et hors équilibre, dont la description théorique est encore dans un état embryonnaire, ou les effets topologiques, dont la riche classification devient moins nette quand les fortes corrélations entrent en jeu). Les méthodes d'apprentissage automatique restent largement encore à explorer et vont assurément connaître un développement accéléré dans les prochaines années. Finalement, le développement de nouvelles méthodes théoriques fait souvent appel à la mise en place d'algorithmes numériques innovants. À ce sujet, il faut souligner la disponibilité de calculateurs de plus en plus puissants dans les centres nationaux (ou européens) de calcul à haute performance, et l'exigence d'optimiser au mieux les logiciels scientifiques pour leur utilisation efficace et à bas impact environnemental. Ces deux aspects demandent une intégration de plus en plus forte entre différentes compétences théoriques, à la fois analytiques et numériques.

Pour terminer cette introduction nous aimerions mentionner que sous l'impulsion CNRS Physique la communauté scientifique s'est largement mobilisée pour réfléchir aux enjeux scientifiques à l'horizon 2030. Certains membres de la section 3 ont d'ailleurs participé activement à l'exercice. Le rapport de prospective de CNRS Physique vient d'être publié. On pourra lire avec intérêt ce document, en particulier les parties recouvrant le périmètre scientifique de la section 03. Même si la conjoncture et les perspectives se veulent un exercice différent on verra que pour savoir où l'on veut aller il faut savoir d'où l'on part.

2 Physique du spin

2.1 Contexte et Périmètre

Le spin, électronique ou nucléaire, est au cœur de nombreux phénomènes en matière condensée. Les recherches actuelles s'attachent à mieux comprendre son comportement, à en révéler les subtilités et à explorer ses potentialités d'application. Ces recherches couvrent aussi bien le spin de l'ion isolé que de l'électron itinérant, les comportements collectifs exotiques tels que le magnétisme frustré, l'antiferromagnétisme et ses excitations, mais aussi le couplage du degré de liberté de spin avec d'autres paramètres d'ordre, comme la ferroélectricité ou la supraconductivité. Ces investigations s'appuient sur la synthèse de nouveaux matériaux et hétérostructures mettant en jeu de nouvelles fonctionnalités (matériaux corrélés, matière topologique, matériaux bidimensionnels), ainsi que sur le développement de techniques expérimentales de pointe (microscopie de centre NV, diffusion Brillouin, etc) et de modèles théoriques de plus en plus réalistes.

2.2 Tendances et évolution

Un effort substantiel a été consacré ces dernières années à la synthèse de matériaux aux propriétés magnétiques originales en dimensions réduites par PVD ou CVD : oxydes magnétiques et multiferroïques, matériaux bidimensionnels de van der Waals, matériaux antiferromagnétiques. L'avènement des matériaux de van der Waals magnétiques en monocouches, chalcogénures et halogénures, ouvre un nouveau champ de recherche sur le magnétisme à basse dimension tout en offrant des opportunités pour l'électronique de spin à l'échelle ultime où « l'interface est le composant ». La maîtrise de la croissance des oxydes fournit quant à elle des hétérostructures d'excellente qualité combinant des matériaux aux propriétés très différentes, voire exclusives (magnétisme, ferroélectricité), avec l'objectif d'en sublimer les fonctionnalités. Enfin, portés par de nouvelles perspectives, les matériaux antiferromagnétiques se sont eux aussi trouvés au cœur d'efforts d'élaboration. Ces activités sont soutenues par des travaux de modélisation des matériaux par méthodes *ab initio* telles que la théorie de la fonctionnelle de la densité. Dans ce domaine, des développements méthodologiques sont nécessaires pour la modélisation rigoureuse des corrélations, des phénomènes aux interfaces mais aussi du magnétisme chiral.

L'étude du magnétisme frustré et des liquides de spin est un domaine toujours très riche en effets physiques souvent complexes, parfois hautement non-intuitifs. Les recherches actuelles s'attachent à une compréhension fine des états magnétiques à l'équilibre, mais aussi et surtout à une meilleure compréhension de leurs excitations magnétiques, qui peuvent être très exotiques. Dans ce domaine en forte croissance, la signature de caractéristiques topologiques, leur couplage avec des excitations non magnétiques comme les phonons, et la recherche d'excitations magnétiques non bosoniques sont au centre des attentions. Ce domaine de recherche est alimenté par une communauté de théoriciens très active qui s'intéresse aux divers aspects du magnétisme frustré et de ses excitations exotiques, tant au niveau formel qu'en terme de méthodologie et d'outillage numérique avancé.

A l'interface entre magnétisme massif, nanomagnétisme et électronique de spin, les textures magnétiques complexes, cristaux de skyrmions, hopfions ou parois de domaines chirales restent très étudiées. De nouvelles techniques expérimentales avancées utilisant le dichroïsme magnétique circulaire des rayons X sur synchrotron (holographie, laminographie STXM etc..) se révèlent particulièrement pertinentes ici. Le couplage de ces textures entre différents types de matériaux magnétiques (ferro/antiferro), voire différents paramètres d'ordre (textures ferroélectriques) est actuellement un sujet à fort potentiel. La recherche expérimentale s'appuie sur le développement de codes micromagnétiques et atomistiques à même de modéliser la dynamique et la texture de l'aimantation dans des géométries complexes.

En électronique de spin, le transport de spin dans des matériaux et multicouches sièges d'un couplage spin-orbite fort – la spin-orbitronique – reste un des thèmes les plus actifs, avec plusieurs réussites majeures, par exemple le contrôle électrique réversible de l'interconversion entre courant de charge et courant de spin. Plus récemment, de nouveaux axes ont émergé dans le sillon de la spin-orbitronique, avec notamment la démonstration de génération et détection de courants de moment orbital, qui ne requiert plus de couplage spin-orbite fort dans les matériaux. Le transport de spin dans les matériaux antiferromagnétiques est un second axe, très dynamique,

qui a apporté son lot de découvertes marquantes récemment. On peut citer l'effet Hall anormal et la levée de dégénérescence en spin de la structure de bande dans certains composés. Si la recherche actuelle reste fortement tributaire de la disponibilité et de la qualité des échantillons, les perspectives pour l'électronique de spin sont très prometteuses. De nouvelles directions de recherche se dessinent par ailleurs, par exemple à l'interface entre magnétisme et supraconductivité. Les théoriciens du transport de spin accompagnent ces sujets par le développement de calculs semi-analytiques et numériques réalistes, ainsi que par la proposition de nouveaux phénomènes aux interfaces. Le couplage entre la lumière et le magnétisme a également ouvert des voies de recherche actuellement en pleine expansion. La désaimantation ultrarapide induite par impulsion laser découverte il y a trente ans a donné naissance à deux sujets d'importance : le renversement d'aimantation ultrarapide induite par laser, en particulier dans les matériaux ferrimagnétiques et dans des multicouches de métaux de transition, et l'émission d'ondes terahertz par injection optique de courant de spin sub-picosecond. Ce dernier sujet exploite des matériaux à fort couplage spin-orbite, tels que les métaux 5d et les matériaux topologiques. Des nouvelles activités théoriques sont en cours de développement pour la modélisation de ces phénomènes dépendant du temps. La compréhension fine de la dynamique d'aimantation vise à mettre en lumière l'importance des processus stochastiques, des non-linéarités et des phénomènes chaotiques. C'est une préoccupation essentielle, en particulier pour les applications telles que les nano-oscillateurs à transfert de spin qui peuvent servir de source radiofréquence. Dans ce contexte, la dynamique des ondes de spin dans les matériaux ferro-, ferri- et antiferromagnétiques, leurs propriétés de dispersion et de propagation, ont été intensément étudiées au cours des dernières années, conduisant à la démonstration que ces ondes peuvent transporter l'information sur de longues distances, excédant le micromètre.

Utiliser le spin électronique pour les technologies de l'information est un objectif constitutif du magnétisme en général et de la spintronique en particulier. Si les capteurs, les mémoires, les oscillateurs radiofréquence et la logique magnétique sont au centre de la recherche de nombreux laboratoires, de nouvelles idées ont émergé ces dernières années. Parmi les applications les plus innovantes, citons les émetteurs d'ondes terahertz, évoqués plus haut, et des dispositifs spintronique mettant en œuvre des architectures de calcul neuromorphique. La déclinaison de concepts de l'électronique de spin pour manipuler l'information quantique est en train d'émerger. Nombre des effets physiques souvent accessibles à (ou proche de la) température ambiante dans les composants spintroniques sont naturellement opérationnels à très basse température, dans la gamme de fonctionnement des technologies quantiques. Un sujet attenant concerne les composants hybrides, combinant par exemple supraconductivité et magnétisme, pour à la fois créer et injecter des états de spin triplet (dont la durée de vie excède très largement celle des états singulets). Pour le stockage de l'information quantique, des qubits à base de magnons, ces quanta d'excitation magnétique peuvent se coupler à la lumière en cavité ce qui permet leur lecture. Après de nombreux travaux théoriques, cette idée est en phase d'implémentation expérimentale. Enfin, une dernière direction notable concerne les réseaux de neurones quantiques qui sont susceptibles de résoudre certains des problèmes complexe de l'information quantique. A l'instar des approches neuromorphiques, en pleine expansion, il a été récemment démontré que des oscillateurs à transfert de spin peuvent constituer des briques de bases pour ces systèmes de calculs avancés.

2.3 Force, opportunités, faiblesses et points de vigilance

Le magnétisme frustré et l'électronique de spin sont des thématiques historiquement fortes, s'appuyant sur des communautés de recherche structurées, soudées et de rayonnement international. Le récent lancement du PEPR SPIN illustre la vitalité de la communauté française dans ce domaine. L'électronique de spin en particulier est fortement pluridisciplinaire, établissant régulièrement des liens avec d'autres domaines de recherche comme la science des matériaux, l'optique et la photonique, la physique quantique, le neuromorphique et les systèmes d'information. La spintronique a aussi déjà donné lieu à des applications et des prototypes tels que les capteurs et mémoires magnétiques, ou les oscillateurs radiofréquence.

Au cours des 4 dernières années (2019-2024), 4 chercheuses et 5 chercheurs ont été embauchés au sein de la section 3 pour développer des activités autour de la physique du spin. Ces activités recouvrent les excitations de spin (NEEL ; IMPMC ; LLB), l'imagerie magnétique de haute précision (L2C), l'utilisation de la spintronique pour des applications à la frontière du neuromorphique et du quantique (Laboratoire Albert Fert CNRS/Thalès),

de la magnonique et du quantique (NEEL), la spintronique THz et antiferromagnétique (IPCMS), ainsi que la croissance et la physique des matériaux magnétiques 2D (IPCMS ; CINaM).

Des points de vigilance doivent cependant être soulignés. La communauté du magnétisme frustré est actuellement sous-critique, en dépit de nouvelles découvertes impactant profondément le domaine, comme l'observation d'excitations magnétiques dites fermions de Majorana dans les liquides de spin de Kitaev et la découverte d'excitations topologiques dans certains composés. De plus, la prochaine fermeture de la source de neutrons de l'Institut Laue-Langevin présente une véritable menace sur l'ensemble de l'activité. La source européenne qui doit prendre le relais, European Spallation Source, affiche un retard d'au moins deux ans.

En électronique de spin, le maigre tissu industriel français (gros groupes industriels ou start-ups), malgré de nombreux brevets déposés, reste une faiblesse. L'essentiel des acteurs industriels de la spintronique (Samsung, Western Digital, Seagate, Toshiba, TSMC, Global Foundries, etc) sont actuellement en Asie et aux Etats-Unis. L'arrivée de Global Foundries à Grenoble pourrait rééquilibrer la situation sur le moyen terme.

3 Sciences des matériaux

3.1 Contexte

La science des matériaux vue par la section 03 consiste en l'élaboration de solides cristallins aux propriétés physiques remarquables. Par élaboration on entend ici *synthèse ascendante* (bottom-up) d'un matériau, brique élémentaire atomique ou moléculaire par brique élémentaire. Cette approche est utilisée par les physiciens et les chimistes pour obtenir différentes classes de matériaux, dans des mises en forme ad hoc (notamment aux basses dimensionnalités ou sur d'autres matériaux), certains découverts par sérendipité ou de façon guidée au moyen d'approches computationnelles prédictives (stabilité, propriétés). Dans le périmètre thématique de la section 03, l'élaboration de matériaux se concentre sur des solides souvent cristallins de structure, morphologie et composition contrôlées finement (ces objets concernent également des recherches relevant des sections 04, 05, 08 et 15), sièges d'excitations électroniques, de spin, photoniques ou phononiques remarquables.

Les surfaces de certains de ces matériaux gouvernent leurs propriétés, ou génèrent des propriétés propres. Ces surfaces, si elles sont de haute qualité, constituent un champ d'étude spécifique où l'on accède expérimentalement à des informations d'une grande richesse, avec une résolution spatiale sub-nanométrique et/ou dans l'espace réciproque, une résolution énergétique sub-millielectronvolt, une résolution temporelle sub-nanoseconde ou à haute fréquence, parfois avec application de différents types de stimulus. C'est le champ des sciences des surfaces, et plus spécifiquement pour ce qui concerne la section 03, de la physique des surfaces, qui s'appuie sur le développement de nouveaux matériaux.

3.2 Familles de solides cristallins dans une perspective historique.

Les semi-conducteurs, les métaux et les oxydes, déposés sous la forme de films minces ou d'objets nanométriques sur des substrats, ou crûs sous des formes massives, ont rassemblé autour d'eux différentes communautés, intéressées par des effets physiques différents sondés selon des approches elles aussi différentes. On se souvient en France de l'essor de l'élaboration de films minces et d'hétérostructures (puits quantiques puis boîtes quantiques et nanofils) semi-conducteurs dès la fin des années 1960, avec les perspectives d'applications dans le champ des télécommunications ; de l'avènement dès les années 1980 des matériaux (à nouveaux films minces et hétérostructures désignées dans ce contexte par le terme 'multicouches') qui deviendront les briques de base de l'électronique de spin ; de l'étude de matériaux (massifs) sièges de corrélations électroniques fortes (appelés aujourd'hui 'matériaux quantiques') au tournant du millénaire ; de la découverte de gaz d'électrons et de diverses phases électroniques confinés à l'interface entre oxydes de métaux de transition isolants à partir des années 2000. Les *développements de matériaux nouveaux* dans ces familles sont toujours d'actualité en France, par exemple : des composés jusqu'alors synthétisés par voies chimiques et dont la qualité pourrait être significativement améliorée grâce aux voies d'élaboration physique pour accéder à des propriétés particulières (pour le transport électronique, le photovoltaïque, etc), les semi-conducteurs à large bande interdite, les hétérostructures combinant différents matériaux de dimensionnalité ou de nature (métal, oxyde, semi-conducteur)

distinctes, la recherche d'états quantiques corrélés dans des composés massifs, les systèmes van der Waals (des matériaux purement bidimensionnels aux propriétés variées, corrélées ou non).

3.2.1 Instrumentation

Les méthodes d'élaboration de films minces cristallins sur des substrats, notamment par épitaxie, sont lourdes (technologie du vide), relativement peu flexibles et coûteuses. Concernant les matériaux massifs, si les coûts sont globalement moindres, les contraintes d'utilisation peuvent être importantes, du fait des hautes températures nécessaires sur des temps longs. L'instrumentation dédiée à la physique des surfaces (e.g. microscopies en champ proche, spectroscopies d'électrons), opérant sous ultra-haut vide, est, elle aussi, très coûteuse et délicate.

3.2.2 Moyens humains

On recense dans les laboratoires français environ 300 personnels permanents (chercheurs et ingénieurs/techniciens) dont l'activité porte, pour tout ou partie, sur l'élaboration des matériaux d'intérêt ici. Parmi eux, environ 50 sont des chercheurs rattachés à la section 03. Cet effectif est en baisse depuis au moins la dernière décennie. Cette tendance est corrélée à une évolution du positionnement général des activités d'élaboration, lesquelles pouvaient se suffire à elles-mêmes (publications dédiées, par exemple) auparavant et sont à présent davantage une partie d'un corpus plus large (dans des études allant de l'élaboration à l'étude des propriétés, voire de dispositifs), vraisemblablement du fait de leur maturité. Pour autant, l'accès à des matériaux de haute qualité reste crucial pour accéder à des effets physiques et fabriquer des dispositifs à l'état de l'art ; en outre les développements de matériaux nouveaux évoqués plus haut, de plus en plus complexes, se font difficilement sans un terreau de forte expertise en élaboration, et sans une conscience aigüe des défis sous-tendant l'obtention de telle ou telle propriété. Les chercheurs de la section 03 semblent avoir conscience de ces enjeux, et leurs recrutements et promotions n'y sont probablement pas étrangers. Concernant la physique des surfaces (environ 100 personnels permanents en France et 40 en section 03) les problématiques sont d'une autre nature. L'activité s'appuie sur des évolutions instrumentales fortes et pointues sur le long terme. La compétition avec des laboratoires (notamment en Europe du Nord) largement mieux dotés est à la défaveur des équipes françaises. L'élaboration de matériaux et la physique des surfaces sont deux champs d'études qui n'ont, en France, qu'une relativement faible attractivité auprès des futurs doctorants et postdoctorants. Les constantes de temps très longues associées à ces recherches, parfois difficiles à valoriser, et le niveau d'instrumentation dans plusieurs cas moins avancé que chez nos voisins européens, sont des explications possibles.

3.3 Quelques tendances et évolutions récentes

3.3.1 Ingénierie de propriétés

Le lien entre structure et propriétés est une évidence. Si l'on ne peut occulter l'importance d'améliorer toujours la qualité cristalline des matériaux pour atteindre des puretés spectrales améliorées (en vue d'applications ou de la réalisation de standards) ou accéder à des effets intrinsèques (notamment corrélés et à N corps) autrement masqués ou empêchés, d'autres opportunités peuvent être explorées. On essaie aujourd'hui de faire une ingénierie de la symétrie cristalline, de la compétition/coexistence d'ordres cristallins à différentes échelles, de certaines interactions (e.g. couplage spin-orbite), pour manipuler la topologie des structures de bandes des excitations, pour faire émerger des corrélations électroniques fortes ou des couplages entre excitations, pour stabiliser simultanément des ordres multiples ou créer des ordres ou désordres non triviaux médiés par des interactions de nature pseudo-classique ou quantique. En termes de méthodes d'élaboration, il s'agit ici d'explorer de larges régions de paramètres expérimentaux (température, pression, éléments chimiques et leurs proportions), d'exalter des effets d'interfaces en identifiant les bons substrats ou en réalisant des empilements éventuellement hybrides (entre matériaux de nature différente), parfois en stabilisant des états métastables, parfois au contraire en amenant les matériaux dans leur état de plus basse énergie, à travers des paysages de configurations très accidentés.

3.3.2 Matériaux de dimensionnalité basse ou mixte

Les approches discutées ci-dessus se déclinent dans différentes familles de matériaux et se développent parallèlement à des approches plus conventionnelles. Les semi-conducteurs ‘traditionnels’ (II-VI, III-V, IV) et leurs nanostructures (nanofils, boîtes quantiques, films minces sur membranes, etc) sont l’objet de travaux à forte visée applicative, dans les domaines des détecteurs, de la photonique, des résonateurs, du photovoltaïque, ou de la microélectronique via des efforts sur l’intégration aux technologies existantes. Les films minces d’oxydes complexes offrent des possibilités très riches, en termes de manipulation de différents ordres (spin / charge / polarisation), de leurs couplages et d’effets de corrélations (dans des états supraconducteurs ou isolants de Mott par exemple), par des effets de contrainte (épitaxiale), de transferts de charge (interfaces) ou de proximité. Dans les matériaux bidimensionnels (graphène, dichalcogénures, et bien d’autres alliages encore), les concepts déjà éprouvés dans d’autres familles de matériaux sont revisités avec de nouveaux ingrédients (effets de proximité exacerbés dans des hétérostructures, combinaison de propriétés, effets des moirés) et concernant un éventail grandissant de propriétés. Les études d’isolants topologiques se développent, motivées par les fonctionnalités de spin que leurs surfaces peuvent apporter. De façon transversale, on assiste à des efforts d’élaboration de systèmes de dimensionnalité mixte, qui interfacent par exemple un matériau bidimensionnel à un substrat massif (tridimensionnel, donc) ou à des objets unidimensionnels (nanofils, nano-plaquettes, agrégats) avec l’objectif de combiner plusieurs fonctions sur une même plateforme ou de créer des nœuds de conversion. Enfin, des systèmes plus délicats, généralement élaborés et caractérisés par des techniques de surface *in situ*, sont développés. Il s’agit, par exemple, de couches d’épaisseur atomique qui hébergent des phases quantiques exotiques sur des substrats ad hoc, d’assemblages moléculaires ou de molécules individuelles aux propriétés de charge ou de spin sur des surfaces ou matériaux bidimensionnels.

3.3.3 Physique des surfaces

La microscopie à effet tunnel cryogénique est utilisée dans quelques laboratoires français, parfois dans des modes de mesures très spécifiques (pointe polarisée en spin, très basses températures et application de champs magnétiques, résonance de spin électronique, bruit de courant), à très haute résolution pour étudier localement la physique du spin (aimants quantiques, dopage et impuretés, certaines à proximité d’états supraconducteurs), des corrélations électroniques (ordres de charge, de spin, états supraconducteurs non conventionnels, effet de proximité supraconducteur), et les propriétés électroniques de défauts et de superstructures moirés (à la surface de semi-conducteurs, de matériaux bidimensionnels). Dans des modes de mesures en champ proche couplées à une excitation optique (microscopie à effet tunnel, microscopie de force à sonde de Kelvin), l’interaction lumière-matière dans des semi-conducteurs est explorée pour comprendre les phénomènes de transfert de charge et d’énergie. Les techniques de spectroscopie de photoémission résolue en angle, parfois en spin également, éventuellement avec des sources synchrotron (dont on exploite ici la brillance, la polarisation et l’accordabilité en énergie) sont particulièrement adaptées en France pour attaquer des questions actuelles ayant trait aux états électroniques dans les cristaux — topologie non triviale et ingénierie de la structure de bande électronique, polarisation en spin, effets de corrélations électroniques et instabilités associées. Le développement progressif de certaines de ces mesures avec une résolution temporelle élevée (pompe-sonde, femto-seconde) donne accès à la physique hors-équilibre de certains de ces états électroniques. Mentionnons enfin l’utilisation des techniques d’absorption X mous, sondant les quelques couches supérieures des matériaux, et qui deviennent incontournables pour étudier, avec une sélectivité chimique, le magnétisme moléculaire et de surface.

3.4 Forces et opportunités, faiblesses et points de vigilance

Au cours des quatre dernières années, trois chercheurs ont été embauchés au sein de la section 03 pour développer des activités d’élaboration de nouveaux matériaux et de physique des surfaces. Leur recherche couvre la spectroscopie de photoémission résolue en angle dans des hétérostructures van der Waals, à l’IPR, des systèmes magnétiques bidimensionnels épitaxiés (CINaM), des oxydes pérovskites magnétiques manipulés par ingénierie de contraintes (GEMAC).

Les activités d’élaboration jouissent en France du support technique d’ingénieurs d’étude / de recherche. Ce support a peu d’équivalent dans d’autres écosystèmes de recherche. Il complète l’activité des chercheurs

impliqués dans ces thématiques, apporte pérennité aux développements et soutient la fourniture de matériaux pour des collaborations. Si l'on souhaite que les chercheurs de la section puissent valoriser dans leur carrière leur engagement dans des activités d'élaboration en s'aventurant dans de nouveaux développements, vers de nouveaux matériaux plus complexes, il semble essentiel que ce support technique perdure.

Les méthodes de prédiction de matériaux stables aux propriétés originales (par apprentissage supervisé ou non, en exploitant les outils de l'intelligence artificielle associés à de critères ad hoc, ou en adoptant des règles de classification utilisant par exemple des considérations de symétrie) offrent aujourd'hui de nouvelles perspectives. Ces méthodes, déjà utilisées aujourd'hui pour guider des approches de synthèse par voies chimiques, pourraient être fructueuses aussi pour l'élaboration par voies physiques, qui est néanmoins moins versatile en termes d'exploration de paramètres de croissance. Des efforts, théoriques et expérimentaux, sur ce dernier point sont en train de se mettre en place en France.

Une recherche de pointe en physique des surfaces est menée dans un nombre limité de laboratoires français, avec un positionnement souvent astucieux compte tenu des moyens (humains, instrumentaux) modestes vis à vis d'autres groupes européens par exemple. Les succès de ces groupes français sur un spectre thématique néanmoins souvent relativement restreint, et la force de frappe considérable de nombreux groupes européens de premier plan, dans des thématiques scientifiques très actuelles (c'est à dire sur la plupart des questions modernes en physique des matériaux quantiques), attirent l'attention. Il convient de souligner l'un des atouts français : l'installation synchrotron SOLEIL et plusieurs de ses lignes de lumière particulièrement bien équipées, très attractives pour la communauté française et à l'international.

4 Physique mésoscopique et information quantique

4.1 Contexte et périmètre

La physique mésoscopique, ainsi que l'électronique, la photonique ou la phononique quantique visent à comprendre et exploiter le comportement de particules quantiques dans des systèmes dont la taille est comparable à la longueur d'onde de ces particules ; un exemple emblématique est le mouvement cohérent d'un nombre macroscopique de paires de Cooper dans un circuit supraconducteur de plusieurs dizaines, voire centaines de micromètres. Ce champ de recherche est intimement lié à l'exploration de la frontière entre les mondes quantiques et classiques, et la possibilité de contrôler avec un haut degré de fidélité un système quantique cohérent. Cette possibilité est à la base des technologies quantiques : en particulier, la réalisation d'un processeur quantique, composé d'un grand nombre de bits quantiques contrôlés individuellement, est aujourd'hui un enjeu long-terme stratégique majeur. Ce domaine recouvre plusieurs thématiques interconnectées, depuis les sciences fondamentales (systèmes de basse dimensions, phases topologiques exotiques, circuits quantiques supraconducteurs, systèmes quantiques à l'état solide, etc) jusqu'à l'exploration du potentiel des technologies quantiques (simulation et calcul quantique, capteurs quantiques, communications quantiques). Il s'appuie sur une grande variété d'objets quantiques, de plateformes et de matériaux tels que par exemple : métaux, semiconducteurs et isolants topologiques 1D, 2D et 3D, défauts atomiques ou impuretés en matrices solides, ou encore supraconducteurs à haute température critique.

4.2 Tendances et évolution

4.2.1 Physique mésoscopique

La physique mésoscopique s'appuie essentiellement sur des mesures de transports ou de bruit de courant pour sonder les propriétés quantiques des conducteurs, en particulier la nature ondulatoire des porteurs de charge mais aussi leur nature particulière et donc la statistique de ces porteurs. Les recherches fondamentales dans ce domaine poursuivent plusieurs directions. Une première direction porte sur le transport et la manipulation cohérente de la charge, de la chaleur et du spin dans les systèmes mésoscopiques de dimension réduite. Les progrès en instrumentation ou en fabrication de systèmes bidimensionnels d'électrons de très hautes mobilités ont notamment permis de nombreuses avancées. En exemples, on peut citer la manipulation d'impulsions

électroniques ultra rapides dans des circuits quantiques 2D, l'observation à l'échelle atomique des fonctions d'ondes à N corps dans le graphène sous fort champ magnétique, ou encore l'émission de lumière micro-onde non classique par un circuit quantique. Cette direction a été fortement portée par l'optique quantique électronique, qui exploite l'analogie entre propagation des électrons dans les circuits quantiques balistiques et celle des photons dans les expériences d'optique quantique ; à noter, cette thématique s'est récemment orientée vers l'exploration des statistiques quantiques anyoniques (cf ci-dessous).

Une seconde direction porte sur les systèmes hybrides et la matière topologique. Les matériaux à forte inductance cinétique permettent de combiner avec un fort couplage les circuits quantiques supraconducteurs et les systèmes de physique mésoscopique, réalisant des circuits quantiques hybrides, comme des amplificateurs à la limite quantique à base de graphène. Le potentiel offert par les matériaux 2D, comme plateforme de physique mésoscopique, a généré une activité très riche récemment. L'observation en 2018 d'isolants corrélés et de supraconductivité dans les bicouches de graphène désalignées a renforcé les matériaux bidimensionnels en tant que thématique de premier plan. La supraconductivité dans ces bicouches, dont l'origine reste encore débattue, présente certaines similarités avec la supraconductivité à haute température critique observée dans les cuprates, contribuant à fortement élargir la visibilité de la communauté des matériaux 2D. L'empilement de plusieurs couches 'twistées' de différents matériaux 2D a non seulement permis de confirmer l'existence des états corrélés et de supraconductivité, mais aussi de mettre en évidence de nouvelles phases électroniques exotiques, comme des phases topologiques fractionnaires à champ magnétique nul ou de la ferroélectricité émergente. Les matériaux 3D, ou "bulk", font également l'objet d'une forte activité de recherche, en particulier pour leurs propriétés topologiques dites d'ordre supérieur, où un cristal 3D isolant a certaines de ses arêtes conductrices. Enfin, le couplage entre topologie et supraconductivité, à la base de la physique des fermions de Majorana, reste un domaine de recherche très actif.

L'effet Hall quantique fractionnaire est un sujet phare de la physique de la matière condensée depuis plus de 40 ans. En particulier, l'existence des anyons, particules dont la statistique quantique n'est ni fermionique, ni bosonique, n'avait pas été démontrée malgré plusieurs décennies d'efforts expérimentaux. Des expériences récentes, dont certaines conduites par des équipes françaises, ont permis de démontrer la statistique quantique de ces particules, relançant de manière spectaculaire cette thématique. Elles ont donné lieu à une forte activité de recherche théorique et expérimentale, en particulier dans le but de mettre en évidence l'existence d'anyons non-abéliens, une classe de particules pouvant être utilisées pour effectuer des calculs quantiques topologiquement protégés.

Il est aussi important de souligner des progrès importants dans les aspects théorique et algorithmique associés à la description de ces phases topologiques en présence d'interactions en relation avec les phases topologiques fractionnaires, le magnétisme et les skyrmions, la quête de nouvelles phases de la matière e.g. dans des nouveaux matériaux comme les plans 'twistés'. Les progrès dans la théorie du transport hors équilibre et contrôle quantique sont aussi nombreux et permettent ainsi de proposer des nouveaux protocoles dans la physique de Hall, pour révéler les charges fractionnaires et l'existence d'anyons. La physique des fermions de Majorana engendre aussi des nouvelles pensées sur la réalisation d'un supraconducteur topologique pour des applications en information quantique ainsi qu'a des nouvelles idées et méthodes pour résoudre l'effet des corrélations e.g. en relation avec le modèle de Kitaev de spin à 2D et des matériaux magnétiques. Les phases topologiques et leur détection engendrent ainsi des progrès importants théoriques globaux qui s'appliquent aussi bien aux électrons, qu'à la lumière et aux systèmes d'atomes froids en relation directe avec les expériences.

4.2.2 Information quantique

Le niveau de compréhension et de contrôle des systèmes quantiques individuels aujourd'hui est tel qu'il devient possible d'envisager d'exploiter leurs propriétés pour concevoir des dispositifs quantiques nouveaux. Le boom des technologies quantiques a en effet donné lieu à une forte croissance des activités de recherche liées à ces thématiques, dont une part est aujourd'hui aussi entreprise par des acteurs privés. Cependant, malgré les résultats prometteurs obtenus, de nombreuses questions de physique fondamentale restent encore ouvertes, quel que soit le système quantique à l'étude. Il peut s'agir de bits quantiques mésoscopiques, supraconducteurs, de spin ou photoniques par exemple.

Au-delà des impressionnants progrès réalisés vers l'implémentation de processeurs quantiques, la recherche sur les circuits quantiques supraconducteurs a donné lieu à des résultats très marquants. En particulier, les bits quantiques supraconducteurs ont été utilisés comme détecteur de photon microonde unique, permettant la détection et le contrôle de spins électroniques uniques. Les circuits quantiques supraconducteurs ont également récemment été employés pour implémenter un radar quantique dont les performances surpassent celles de son équivalent classique, et ces circuits ont également permis l'observation de marches de courant électrique quantifié, correspondant au dual de l'effet Shapiro.

Les spins des électrons ou de leurs lacunes (trous) sont aussi des candidats prometteurs pour encoder l'information quantique car ils peuvent être isolés dans des boîtes quantiques réalisées dans des hétérostructures semiconductrices. Historiquement développés dans les matériaux III-V, ces "qubit de spin" sont également implémentés dans des matériaux compatibles avec l'industrie de la micro-électronique, notamment le silicium et le silicium-germanium. Ces plateformes ont donné lieu à plusieurs faits marquants récents, comme la réalisation d'un processeur quantique à six qubits, l'intrication entre un qubit et un photon micro-onde, la démonstration de temps de cohérence record pour un qubit silicium, ou le contrôle tout-électrique ultra-rapide d'un qubit.

Les défauts de spin optiquement actifs sont quant à eux au cœur du développement d'une classe de capteurs quantiques de résolution pouvant atteindre quelques dizaines de nanomètres. Outre diversifier les modalités d'imagerie de ces capteurs au-delà de la magnétométrie (électrométrie, thermométrie, imagerie du bruit magnétique, etc.) et étendre leurs conditions d'opérations en environnement extrême (basses températures, hautes pressions, etc.), de nouveaux défauts prometteurs, au-delà de l'emblématique centre NV du diamant, sont à l'étude, exploitant la diversité des centres colorés dans le diamant ou bien l'observation récente de défauts de spin optiquement actifs à l'échelle individuelle dans d'autres matériaux à grand gap (SiC, GaN, matériaux bi-dimensionnels, etc.).

Des efforts importants ont aussi été entrepris depuis plus de trente ans pour transposer les effets d'optique quantique observés à partir de plateformes atomiques vers des plateformes à l'état solide. Ce domaine de recherche vaste inclut l'étude et l'exploitation d'effets d'interaction lumière-matière et la physique émergente dans les systèmes optiques de basse dimensionnalité. Une des lignes de recherche forte a été la réalisation de sources d'états quantiques de la lumière performantes. Ces sources exploitent aujourd'hui soit des effets paramétriques dans les matériaux non-linéaires ou bien des émetteurs individuels de nature diverse (boîtes quantiques auto-assemblées, nanocristaux, pérovskites, défauts ponctuels en matrice solide ou matériaux 2D, etc), éventuellement couplés à des structures photoniques adaptées pour contrôler leurs propriétés. Les développements entrepris suivent plusieurs directions. Une première explore diverses stratégies pour étendre le domaine spectral d'opération des sources vers la plage spectrale des réseaux de télécommunication fibrés. Une seconde direction a trait au contrôle des états quantiques produits. Outre l'efficacité et la brillance des sources, ce contrôle porte sur la pureté, la statistique, l'indiscernabilité ou le degré d'intrication des états produits. Une ligne de recherche en forte croissance dans ce contexte ambitionne la génération de canevas quantiques (ou "clusters states"), ensemble de modes intriqués les uns avec les autres selon un schéma prédéterminé. De tels états clusters ont pu être produits récemment suivant plusieurs stratégies, par exemple en exploitant l'intrication entre le spin au sein d'une boîte quantique et des photons séquentiellement émis par cette même boîte. Une dernière direction de recherche porte sur la manipulation des états photoniques sur puce en tirant profit de l'optique intégrée (sur verre, silicium, niobate de lithium, etc).

La simulation quantique est un autre pan de recherche en forte résonance avec les thématiques de physique mésoscopique et information quantique. Plusieurs expériences récentes de premier plan, impliquant des équipes françaises, ont permis d'émuler des systèmes modèles à fortes corrélations de physique mésoscopique et de matière condensée en général, que ce soit dans les circuits quantiques supraconducteurs et semiconducteurs, ou dans les systèmes polaritoniques ou excitoniques. On peut ici mentionner, sans être exhaustif, l'observation de la physique KPZ dans des condensats de polaritons, la réalisation de systèmes modèles pour l'étude des fluides quantiques et des condensats de Bose en présence de dissipation, ou bien l'émulation du modèle de Hubbard à partir d'excitons indirects ayant un large moment dipolaire et des temps de vie très longs. Cela s'accompagne d'importants progrès du point de vue théorique, permettant d'apporter des solutions nouvelles à des problèmes notoirement difficilement solubles.

La diversité des supports quantiques invite à développer des interfaces hybrides couplant des objets quantiques de natures différentes (spin, photon, phonon, électron, magnon, etc) pour tirer parti du meilleur de chaque « monde ». Les recherches actuelles se déploient dans plusieurs directions, motivées par la physique nouvelle qu'ouvrent de telles interfaces mais aussi la perspective de réseaux quantiques connectant capteurs ou processeurs. Un exemple est l'opto-électromécanique hybride couplant degrés de liberté mécaniques à des polaritons ou bien à des circuits supraconducteurs.

Ce domaine de recherche s'appuie sur une fertilisation croisée forte entre expérience et théorie, non seulement pour accéder à la physique sous-jacente qui gouverne la réponse des objets d'étude, mais aussi pour déployer de nouveaux protocoles de mesure, de calcul, de communication ou de corrections d'erreur dans le contexte des technologies quantiques. Ce champ de recherche s'est étendu et a vu émerger des approches aux interfaces. Un exemple, à la croisée entre physique quantique et thermodynamique statistique, est la thermodynamique quantique, qui vise à comprendre et mesurer l'empreinte énergétique de la mesure quantique mais aussi des technologies quantiques. Décrire l'effet de la décohérence et de la dissipation ainsi que les propriétés dynamiques associées d'un système quantique reste un enjeu théorique important en relation avec la protection de l'information, la physique à N corps et des nouveaux protocoles associés à la lumière. Ceci engendre aussi de la physique nouvelle, vers des aspects stochastiques en relation avec la théorie thermodynamique et l'intrication menant à des idées de plateformes quantiques variées. D'un point de vue théorique il faut aussi souligner les progrès importants dans la communauté pour développer des méthodes venant de l'information quantique et ainsi bâtir des nouveaux algorithmes, codes et nouvelles sondes en relation avec l'intrication "many-body".

4.3 Forces, opportunités, faiblesses et points de vigilance

La communauté française est historiquement très présente et visible dans ces thématiques, avec de nombreuses "premières" ayant fait date, du fait d'une très grande expertise scientifique et technique fruit de plusieurs décennies d'efforts. Elle continue à être pionnière, comme sur la physique des anyons ou l'ingénierie de sources solides d'états quantiques de la lumière par exemple. Cette communauté est très structurée au sein de plusieurs GdR (TeQ, MESO, MEETIC, MecaQ...) et du PEPR Quantique. Certains des axes de recherche touchent d'autres sections, en particulier la section 4 et la section 8. Au cours de ces 4 dernières années (2019-2024), 8 chercheurs ont été embauchés au sein de la section 3 du CNRS pour conduire des recherches dans ce domaine. Leurs recherches couvrent entre autres les sources d'états quantiques de la lumière, les circuits quantiques supraconducteurs, les capteurs quantiques et le transport électronique mésoscopique.

Certains points de vigilance doivent cependant être relevés.

Un enjeu fort repose sur la synthèse et la croissance de matériaux "quantum-ready", clef de voute de la majeure partie des développements en cours, avec en lien les développements à l'état de l'art en nanofabrication, socles qui requerront des investissements (humains et matériel) très significatifs.

Grand nombre des recherches entreprises dans le domaine font usage de fluides cryogéniques, en particulier d'hélium. La crise de l'hélium aujourd'hui (pénurie, augmentation très significative des prix) fait peser une menace sur ces activités de recherche, requérant des coûts importants d'investissements pour mettre en place ou maintenir des systèmes de recyclage de l'hélium et assurer la pérennité des recherches entreprises.

La création de nombreuses startups en technologies quantiques a ouvert de nouvelles perspectives de formation et d'embauche, en particulier pour les jeunes docteurs, offrant aux jeunes scientifiques des opportunités nouvelles au détriment potentiellement de carrières académiques moins attractives.

5 Physique des états électroniques, des corrélations et interactions

5.1 Contexte et Périmètre

Les corrélations permettent de modifier en profondeur les états électroniques, et de générer des propriétés originales telles que la supraconductivité à haute température critique ou des phénomènes de localisation non prédits par la théorie des bandes. Ces propriétés sont induites par un couplage à un degré de liberté magnétique, ou un couplage spin-orbite, l'effet du dopage (chimique ou électrostatique), et peuvent être modulées par des stimuli extérieurs (pression, lumière). La dimensionnalité et les effets d'interface, dans des matériaux sous forme de nanofeuillets, couches minces ou hétérostructures, jouent également un rôle majeur. Différentes fonctionnalités sont associées à ces effets, et sont exploitées pour le stockage/transport de l'énergie (supraconductivité, ferroélectricité, thermoélectricité, batteries, etc.) et pour le stockage de l'information (mémoires, exploitant différents degrés de liberté, par exemple dans les multiferroïques) etc. Parmi les modèles théoriques permettant de comprendre et de modéliser les phénomènes de corrélations, notamment lorsque ces corrélations sont fortes, on peut citer la théorie du champ moyen dynamique.

L'une des tendances actuelles est l'essor des matériaux dits "quantiques", où des propriétés liées à des états intriqués (tels que les paires supraconductrices) et/ou induits par la topologie sont étudiées, voire exploitées en vue de futures applications. Ces matériaux quantiques, historiquement des oxydes ou systèmes de fermions lourds, sont aujourd'hui aussi des chalcogénures, des pnictures et des matériaux 2D (dichalcogénures, graphène). La thématique évolue également vers l'étude des états hors équilibre, sous l'effet par exemple de la lumière. D'un point de vue théorique, il y a un besoin croissant de nouvelles méthodes aptes à traiter la physique hors équilibre et les effets topologiques. La thématique a de nombreux recouvrements avec l'ensemble des autres thématiques de la section, liées au magnétisme, aux matériaux 2D, au transport mésoscopique, à la science des matériaux, et aux interactions lumière-matière.

5.2 Tendances et évolution

L'étude de la supraconductivité reste un domaine extrêmement actif, avec de nouvelles familles étudiées telles que les nickelates, les hydrures sous pression, des fermions lourds tels que URu_2Si_2 avec des ordres cachés ou les nouveaux supraconducteurs de la famille AV_3Sb_5 à base de plans Kagomé mêlant corrélations, frustration et effets topologiques. La compréhension du rôle des fluctuations magnétiques ou du couplage électron-phonon sur l'apparition de la supraconductivité reste une question d'actualité, et l'étude des ondes de densité de charge dans les dichalcogénures en est un exemple. On observe une évolution récente vers l'étude des matériaux 2D, illustrée par l'engouement porté sur le graphène 'twisté' à un angle bien particulier. La lumière (laser ultrarapide, laser à électrons libres) est de plus en plus utilisée pour modifier des états supraconducteurs ou générer d'autres, hors équilibre. Un régime de fort couplage, soit électron-phonon, soit électron-électron, est à l'œuvre dans plusieurs familles de matériaux. Pour le modéliser, des méthodes non perturbatives doivent être développées. Des avancées récentes sont ainsi à signaler dans l'extension de la théorie du champ moyen dynamique par le biais d'un vertex dynamique ou non-local. Des résultats très prometteurs ont aussi été obtenus grâce à des méthodes basées sur les réseaux de neurones, comme les états de produits matriciels et l'apprentissage automatique des fonctions d'onde quantiques.

En combinant les corrélations électroniques à un fort couplage spin-orbite, des états électroniques originaux sont observés dans les iridates ou ruthénates, avec des états de pseudo-spin où les degrés de liberté orbitalaire et de spin sont fortement intriqués. On retrouve ici des thématiques communes avec celles de la physique du spin. Des comportements originaux de la résistivité sont observés dans ces matériaux lorsque le couplage de Hund devient significatif (métaux de Hund). Enfin dans certains ruthénates, un comportement de type 'métal étrange' est observé avec une dépendance linéaire de la température. La dissipation dans ces métaux peut atteindre la limite Planckienne du temps de relaxation, phénomène étudié également dans les cuprates ou certains fermions lourds. Le couplage électron-phonon peut être important dans différents phénomènes (supraconductivité, ondes de densité de charges, ferroélectricité, etc) et le couplage entre électrons, phonons et magnétisme est étudié

dans le cas de matériaux paraélectriques, proches de transitions structurales, en présence de modes mous de phonons. Les études pour contrôler le magnétisme par les phonons chiraux est un des développements les plus récents autour de ce couplage électron-phonon.

Ces thématiques abordent à présent les effets topologiques. A nouveau, des matériaux supraconducteurs sont étudiés, comme la famille AV_3Sb_5 . Le transport électronique, thermique ou thermoélectrique, en particulier en configuration transverse (effet Hall, effet Nernst ou effet Righi-Leduc) est utilisé pour sonder les propriétés de semi-métaux ainsi que des techniques spectroscopiques telles que l'ARPES, certains de ces matériaux présentant des structures de bande de topologie non triviale (par exemple de type Weyl dans $Co_3Sn_2S_2$). La compréhension de l'interaction entre propriétés topologiques et corrélations nécessite une nouvelle classification des solides en fonction de leurs propriétés topologiques. Désormais bien établie pour les matériaux faiblement corrélés décrits par la théorie des bandes, cette classification devient moins nette quand de fortes corrélations sont en jeu. C'est exactement la situation où une grande richesse de phases complexes et fondamentalement mal comprises peut surgir.

Au-delà des propriétés thermodynamiques ou des propriétés de transport, les états excités ou hors équilibre de ces matériaux corrélés ou quantiques sont étudiés, en particulier sous l'influence de la lumière, avec par exemple la génération de nouvelles propriétés magnétiques, ou le changement de l'état supraconducteur sous impulsions laser. Un autre exemple est l'application d'impulsions électriques à des oxydes, induisant une transition de type isolant-métal, à la fois volatile ou non volatile, capable d'imiter le comportement de la synapse et des neurones d'un cerveau, et qui sont la base pour développer une future Intelligence Artificielle basée sur l'état solide. Par ailleurs, l'intégration de matériaux quantiques dans des cavités photoniques (formant une structure hybride) a permis de générer de nouvelles phases. On touche ici les domaines des phases quantiques hors équilibre et de la localisation à plusieurs corps, qui pourraient par exemple être mis en œuvre dans des circuits quantiques supraconducteurs ou avec les ions piégés. Ces thématiques bénéficient du plein essor des techniques de mesures résolues en temps telles que, entre autres, le femto-ARPES (à rapprocher des efforts instrumentaux en physique mésoscopique en optique).

On observe une activité florissante dans la modélisation théorique des matériaux fortement corrélés par des extensions de la théorie du champ moyen dynamique et de leur modélisation via des théories effectives "à la Landau", souvent appuyées par des calculs à partir des premiers principes. Une forte impulsion a été donnée dans ce contexte à l'étude de nouvelles familles de supraconducteurs non-conventionnels, comme ceux à base de nickel, synthétisés récemment. Des méthodes alternatives, comme la simulation Monte Carlo quantique ou GW, ont aussi été largement employées. Parallèlement les techniques d'apprentissage automatique suscitent un intérêt croissant. Enfin, le développement de nouvelles méthodes théoriques repose souvent sur des algorithmes numériques innovants. Deux points doivent être soulignés à ce sujet : la disponibilité de centres nationaux (ou européens) de calcul à haute performance qui promettent bientôt d'atteindre une vitesse d'exécution exascale, c'est-à-dire 10^{18} opérations élémentaires (flop) par seconde, et l'exigence d'optimiser au mieux les codes scientifiques pour une utilisation optimale et à bas impact environnemental dans ces centres de calcul. Ces deux aspects demandent une intégration de plus en plus forte entre différentes compétences théoriques, à la fois analytiques et numériques.

5.3 Force opportunités, faiblesse et points de vigilance

La communauté française dispose de techniques de pointe pour sonder les diagrammes de phase et les propriétés des systèmes corrélés et matériaux quantiques dans plusieurs laboratoires et sur grands instruments (cf. partie 'Grands instruments'). Les mesures thermodynamiques et de transport peuvent ainsi être faites à très basse température, sous champ magnétique intense et en fonction de la pression. Des techniques de spectroscopie variées sont également accessibles à l'ESRF, à SOLEIL ou à l'ILL pour sonder le magnétisme, les excitations électroniques et les phonons. Il faut cependant rester vigilant sur le futur de la diffraction neutronique, à la suite de la fermeture du LLB. De même, les difficultés d'approvisionnement en hélium peuvent mettre en péril une partie de ces activités.

Les matériaux peuvent être synthétisés sous forme de composés massifs, de plus petits cristaux ou d'hétérostructures, et un point important est de conserver, idéalement de renforcer le couplage entre l'élaboration

(sous toutes ses formes) et l'étude des effets physiques, cette proximité ne pouvant qu'être bénéfique à la compréhension des phénomènes et au développement de cette thématique, en permettant une meilleure réactivité.

Par ailleurs, il ne faut cesser de développer de nouvelles techniques analytiques et numériques. En particulier, la modélisation des propriétés de corrélations dynamiques et hors-équilibre est encore dans un état assez embryonnaire. Son développement pourrait amener, par exemple, à des technologies de production et de stockage d'énergie plus respectueuses de l'environnement, comme le développement de panneaux solaires plus efficaces. Les méthodes d'apprentissage automatique sont à ce jour sous-exploitées, alors qu'il existe déjà en France des centres où ces techniques sont développées. Des utilisations possibles de ces méthodes pourraient être la conception de nouveaux matériaux dotés de nouvelles fonctionnalités (par exemple de nouveaux supraconducteurs), ou le développement de nouvelles représentations d'états corrélés par des réseaux de neurones.

La construction de machines de calcul à haute performance de plus en plus puissantes nous invite à réfléchir à de nouvelles modalités de codage des logiciels scientifiques, qui requièrent des compétences pas encore bien enracinées dans notre milieu scientifique. La puissance de calcul de ces nouvelles machines pourrait faire sauter des verrous dans la modélisation de systèmes complexes, comme ceux fortement corrélés.

La communauté est relativement bien structurée, principalement dans le cadre du GDR Meeticc et des GDR Chalco, NAME, IAMAT. De nombreuses interactions se développent avec des thématiques proches telles que la physique du spin, la spintronique, les matériaux 2D et la physique mésoscopique. En France, la recherche sur les systèmes corrélés et matériaux quantiques ne sont pas fédérées par un grand programme de recherche, mais apparaît dans plusieurs programmes tels que les PEPR (Diadem, Spin...).

Plusieurs candidatures ces deux dernières années proposaient l'étude des états excités, de matériaux topologiques ou excitoniques, ainsi que la prédiction de nouveaux matériaux corrélés aux applications pour la collecte de l'énergie. Les recrutements de ces 5 dernières années ont porté sur la physique des états hors-équilibre dans des supraconducteurs et métaux étranges (LPS ; MPQ), et sur le transport en conditions extrêmes (LNCMI), ainsi que sur des approches théoriques, DMFT (CPT), GW et Monte Carlo quantique (LSI) ou pour les effets de topologie (LPT). Des recrutements ont eu lieu également dans les thématiques proches de la physique du spin (NEEL), les matériaux 2D et hétérostructures (IPR ; GEMAC), la spectroscopie inélastique (IMPMC). La physique reposant sur des techniques expérimentales déjà bien établies (mesures thermodynamiques, spectroscopiques ou de transport) ou sur des matériaux massifs a plus difficilement été soutenue, même si de nombreuses questions scientifiques restent ouvertes ou sont en plein développement (autour par exemple des matériaux topologiques). Il est important de garder un savoir-faire autour des thématiques plus historiques (approches expérimentales plus établies, par mesures thermodynamique, spectroscopies ou de transport ; études de matériaux massifs). Toutes ces activités touchent des sujets qui sont souvent à la frontière avec l'activité d'autres sections, notamment la 02, 04, 05 ou 15, et il est important de favoriser une certaine interdisciplinarité, pour conserver ces compétences et développer des projets au meilleur niveau international.

6 Optique de la matière condensée

6.1 Contexte et Périmètre

Ici, le terme « optique » doit se comprendre au sens large. Naturellement envisagée comme un moyen d'étude de la matière dans le cadre de la spectroscopie optique d'une grande variété de systèmes physiques et/ou de matériaux (matériaux « quantiques » massifs, mais aussi de dimensionnalité réduite, notamment 2D), la lumière est aussi un objet d'étude de la formation et de la dynamique des excitations ainsi que de leur contrôle, par exemple dans le cadre de la physique des polaritons (entendus ici en tant qu'états hybrides lumière-matière), de la manipulation optique de l'aimantation, de la simulation quantique, mais aussi dans de nouvelles interfaces optomécaniques, spin-photon, ou plus complexes encore. L'étude de la matière condensée à travers des pertes d'énergie est au cœur du périmètre de la section 03. En ce sens, la diffusion inélastique de la lumière (spectroscopies Raman, diffusion inélastique résonante des rayons X (RIXS)), le couplage entre électrons et d'autres quasiparticules (phonons, magnons...), la nanothermique et le rayonnement en champ proche font partie intégrante des thèmes de la section. Par ailleurs, l'optique est au cœur de nombreux développements

expérimentaux destinés à l'étude des interactions lumière-matière dans des conditions et à des échelles (spatiales et temporelles) extrêmes et couplant des techniques expérimentales issues de divers domaines de la physique (exemple photoémission résolue en angle et en temps, TR-ARPES).

L'optique intervient aussi naturellement dans le cadre plus applicatif de l'optoélectronique et des matériaux optiques (dispositifs (électro)luminescents, photodétecteurs, métamatériaux optiques). Plus récemment, le développement des technologies quantiques et notamment du « hardware quantique » qui les sous-tend (qubits photoniques, autres systèmes quantiques hybrides) suscite de nombreux efforts expérimentaux et théoriques, en lien direct avec le thème « physique mésoscopique et information quantique » de ce rapport. Soulignons enfin que le domaine de l'optique dans la matière condensée suscite de nombreux efforts théoriques (spectroscopie théorique, électrodynamique quantique dans la matière condensée, dynamique quantique non-linéaire, transfert de moment angulaire, génération d'harmoniques élevées), en interaction avec des activités expérimentales ou en amont de celles-ci. Ce panorama introductif révèle que le thème « optique de la matière condensée » rassemble plusieurs sujets que l'on pouvait retrouver dans plusieurs des thématiques identifiées lors de la mandature précédente, notamment « semiconducteurs » et systèmes bidimensionnels. Il existe également de nombreux ponts entre ce thème et certains thèmes des sections 04, 05 et 08.

6.2 Tendances et évolution

L'optique de la matière condensée est l'un des thèmes les moins représentés en termes de nombre de candidats CR, une tendance observée en 2022 et confirmée en 2023, ce qui n'est pas le cas pour les candidats DR. Nous avons observé un manque de candidats dans certaines équipes spécialisées en physique des semiconducteurs traditionnellement bien implantées en section 03. Ce phénomène est à mettre en relation avec une diminution du nombre de projets autour de la croissance, élaboration et caractérisation avancée de matériaux (thème 2).

On observe une forte tendance à la pluridisciplinarité, conséquence naturelle de progrès techniques significatifs en instrumentation (sources laser notamment ou sources impulsionnelles dans le domaine THz) mais aussi d'une politique scientifique mondiale qui l'encourage. L'émergence de nouvelles classes de matériaux aux propriétés physiques variées et très contrôlables (par exemple les matériaux de van der Waals ou facilement exfoliables comme les perovskites) favorise aussi la pluridisciplinarité. De fait, si l'on parvient aisément à identifier une communauté « optique de la matière condensée » parmi les candidats aux concours DR ou aux demandes de promotion CRHC, DR1, DRCE, cette tâche d'avère plus ardue au sein des candidat.e.s au concours CR. Plus précisément, nous avons identifié plusieurs profils que l'on ne peut pas classer de façon univoque en optique de la matière condensée. Les plus grands recouvrements sont entre les l'optique de la matière condensée, la physique mésoscopique et l'information quantique (ce qui est peut-être conjoncturel, avec l'essor des technologies quantiques) sans oublier la science des matériaux et (avec un poids comparable) la physique du spin et des matériaux corrélés. Plusieurs profils théoriques relèvent aussi de l'optique de la matière condensée. Il s'agit souvent de thèmes autour de la dynamique quantique ultra-rapide en matière condensée (dynamique de spin, transfert de moment cinétique, «lightwave electronics», génération d'harmoniques élevées) à la frontière entre sections 03 et 04 (mais néanmoins parfaitement dans le périmètre de la section 03 car les systèmes considérés sont à l'état solide). Cela souligne une évolution thématique de notre communauté scientifique.

Plus précisément, l'optique fait partie intégrante de plusieurs projets scientifiques proches des technologies quantiques (capteurs quantiques, interfaces spin-photon, simulateurs quantiques utilisant des excitons, optomécanique quantique etc.) et aussi de l'étude optique de nouveaux qubits photoniques. Il s'agit là d'une évolution assez naturelle depuis une douzaine d'années, de l'optique des nanostructures (et de la nano-physique en général) vers l'étude et le contrôle de la « matière quantique ». Enfin, l'électrodynamique quantique en cavité et son application dans de nouveaux contextes (chimie polaritonique) suscitent un engouement théorique et expérimental tangible.

6.3 Force opportunités, faiblesse et points de vigilance

Comme indiqué plus haut, les thématiques émergentes et les « nouvelles plateformes » décrites plus haut créent des ponts entre divers thèmes historiques de notre section et d'autres sections (simulation quantique en matière condensée, magnétisme abordé par des méthodes optiques, nouvelles spectroscopies aux limites). De

nombreuses mesures et modélisations théoriques qui n'étaient pas envisageables il y a quelques années sont à présent possibles.

Nous constatons un écart parfois significatif (« retard de phase ») entre l'état d'avancement de certaines thématiques à l'étranger et dans les équipes d'accueil. Ces tendances sont difficiles à analyser quantitativement mais il conviendra d'être attentif à la robustesse de certaines tendances et modes scientifiques. Le thème des matériaux de van der Waals, foisonnant et en constante évolution, créant des ponts entre communautés scientifiques, mais qui « en même temps » atteint un certain plateau (notamment en raison de certains obstacles techniques ou de caps plus difficiles à passer), est assez illustratif de ce phénomène.

La pluridisciplinarité évoquée plus haut est évidemment une richesse mais s'accompagne aussi d'un manque de lisibilité de certains domaines et d'une possible perte de savoir-faire. Notre communauté scientifique aura toujours besoin de spécialistes qui développent leur expertise sur la durée. L'évolution à court terme de la spectroscopie optique au sens large (comme celui de la croissance des matériaux) constitue donc un point de vigilance.

Nous constatons un déclin relatif des thématiques autour de la physique des boîtes quantiques semiconductrices épitaxiées et des nanostructures colloïdales (surtout métalliques et dans une moindre mesure, semiconductrices). Les études expérimentales sur la dynamique rapide et la cohérence quantique (couplage électron-électron, électron-phonon, effets magnéto-optiques, etc.) sont également moins nombreuses et pourraient voir leur poids devenir sous-critique alors que nous avons identifié plusieurs projets théoriques innovants autour de ces thèmes. Cette situation illustre probablement la maturité de ces sujets et de certains savoir-faire expérimentaux qui sont désormais exploitables pour développer d'autres thématiques qui relèvent de la section 03.

Notons aussi que les thèmes mentionnés dans ce paragraphe suscitent un regain d'intérêt international avec l'émergence de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques (photoémission résolue en temps et en angle (TR-ARPES), couplage entre spectroscopie optique et sondes locales, ...). Il faudra donc suivre attentivement leur évolution dans les années à venir.

Les thèmes en rapport avec la transition énergétique comme l'étude des matériaux pour le photovoltaïque (les perovskites par exemple, que l'on retrouve aussi dans le cadre d'études spectroscopiques dédiées) sont représentés à travers des projets théoriques et expérimentaux. Néanmoins, de tels projets à l'interface avec les thèmes des sections 05 et 08, peinent parfois à se positionner dans le cadre de notre section.

Nous avons vu relativement peu de projets qui affichaient une volonté de construire un dispositif expérimental couteux, ce qui peut se comprendre vu la conjoncture actuelle. En revanche plusieurs approches expérimentales très originales et potentiellement réalisables avec des financements de type ANR ont été proposées et retenues en 2022 et 2023. Souvent, ces projets s'appuient sur des dispositifs expérimentaux et/ou plateformes existants qui seront adaptés pour le projet.

La communauté se dirige naturellement vers des sujets identifiés comme porteurs et/ou soutenus financièrement par des plans nationaux. Nous constatons que pour aborder efficacement certains défis technologiques (par exemple les technologies quantiques), il est nécessaire d'effectuer une évolution thématique significative, voire parfois une reconversion. Ceci constitue un point de vigilance quant au choix des « modes » à suivre et il faudra veiller à la faisabilité des projets et à leur valeur ajoutée. Enfin, il est essentiel de maintenir un vivier suffisant de jeunes chercheurs et chercheuses. La baisse du nombre de candidatures CR et le poids relatif plus faible des candidatures soumises par des personnes ayant une bonne connaissance du système de recherche français est un autre point de vigilance, qui est très probablement lié de façon plus générale à l'attractivité des métiers de la recherche.

7 Grands Instruments et Plateformes

7.1 Contexte et Périmètre

Les grands instruments ont un impact important sur l'activité de recherche visant à étudier, comprendre et manipuler de nombreux effets physiques en matière condensée, et notamment, concernant la section 03, des propriétés électroniques, dépendantes ou non du spin, corrélées ou non, de topologie triviale ou non triviale, ainsi que diverses excitations dans des matériaux quantiques.

7.2 Rayonnement électromagnétique

7.2.1 Sources synchrotron

Au cours des quatre dernières années, le projet mené à l'Installation européenne de rayonnement synchrotron, ESRF-EBS (Extremely Brilliant Source) a permis d'augmenter d'un facteur 100 la brillance et la cohérence des faisceaux de rayons X produits. Deux lignes CRG (collaborative research groups) françaises sont utilisées par des chercheurs de la section 3, pour l'étude de la croissance de matériaux sur des surfaces et l'étude du magnétisme et de transitions de phases notamment. La microscopie par diffraction de rayons X durs, la spectroscopie et la diffraction cohérentes, et l'imagerie par contraste de phase sont désormais des techniques accessibles. Toutes les lignes de lumière permettant les études de la structure électronique et le magnétisme étaient opérationnelles en 2022. Dans le périmètre de la section, l'utilité des expériences de XMCD sous champ magnétique élevé, de la diffusion inélastique résonante et non résonante des rayons X, est à souligner. Des informations cruciales sont ainsi obtenues concernant l'étude du nanomagnétisme, des textures de spin, des matériaux spintroniques, la dispersion des phonons et la réorganisation de la charge dans de nombreux matériaux.

SOLEIL, la source française de rayonnement synchrotron, offre un ensemble complet de techniques couvrant une gamme d'énergie de photons du terahertz aux rayons X durs. Ses lignes de lumières ont donné des résultats importants dans l'étude de phases sous pression et dans différents domaines de la physique des surfaces. De nombreux matériaux ont été étudiés : isolants topologiques, matériaux multiferroïques et leurs interfaces avec les matériaux 2D, arrangements moirés de ces derniers, skyrmions magnétiques et textures antiferromagnétiques, nanostructures de matériaux semi-conducteurs, hétérostructures et nanomatériaux. Il existe une forte communauté d'utilisateurs dans la section 3.

7.2.2 Lasers à électrons libres.

Dans les gammes d'énergie des rayons X, 7 installations sont opérationnelles dans le monde, dont 2 en Allemagne, et les autres aux États-Unis, en Suisse, en Italie, au Japon et en Corée. D'autres sources existent dans la gamme des Terahertz, avec plusieurs sources en Europe hors France. Les expériences étudient les dynamiques non linéaires, les phénomènes hors équilibre et les transitions de phase induites par des excitations laser ultra-courtes. Les équipes françaises de physique de la matière condensée ont principalement étudié les systèmes magnétiques. La communauté française des chercheurs impliqués dans l'utilisation des lasers à électrons libres émettant dans le domaine des rayons X est fédérée par un GDR (GDR XFEL).

7.2.3 Sources laser femtoseconde et attoseconde, génération d'harmoniques.

Le CELIA Bordeaux, le LiDYL (Attolab) Saclay et le LOA Palaiseau sont partenaires de LaserLab Europe, l'initiative intégrée des infrastructures européennes de recherche sur les lasers. Les nouveaux développements de la recherche sur les lasers sont menés de manière flexible et coordonnée au-delà du potentiel à l'échelle nationale. Dans le domaine de la matière condensée, les installations sont utilisées pour étudier les propriétés macroscopiques et microscopiques de la matière - par exemple les phases solides, liquides ou supraconductrices des matériaux, les phases (anti)ferromagnétiques des spins et les phénomènes associés (par exemple le magnétisme frustré, la démagnétisation, etc). L'expertise existante en France devrait permettre le développement d'un centre laser fonctionnant sur les principes des centres de rayonnement synchrotron, des lasers à électrons libres ou des lasers à neutrons.

7.3 Sources de neutrons.

Les neutrons sont plus difficiles à manipuler que les photons, mais sont sensibles à la fois à la masse atomique et au moment magnétique. Leur longueur d'onde est ici proche des distances interatomiques et leur énergie comparable à celle des énergies d'interaction. Ils sont utilisés pour déterminer les structures périodiques et la dynamique des atomes et des moments magnétiques. La communauté neutronique est très diversifiée et répartie sur l'ensemble du territoire français (Nancy, Grenoble, Lyon, Paris, Lille, plateau de Saclay, etc). Les thèmes couverts par la section 3 concernent principalement les matériaux magnétiques (textures, transitions de phases, liquides de spin, par extension le multiferroïsme) et les matériaux quantiques (supraconducteurs, les matériaux topologiques, etc.). La communauté française est organisée autour de trois grands centres de recherche : l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble, le Laboratoire Léon Brillouin (LLB) à Saclay et la future Source européenne de spallation (ESS).

Le laboratoire Léon Brillouin est une unité mixte CNRS/CEA, associée au réacteur Orphée jusqu'en 2019, date de sa fermeture définitive. Depuis, le laboratoire continue à travailler sur l'instrumentation neutronique en dehors de ses murs. Il participe aux projets suivants :

- Le projet ESS (European Spallation Source), en Suède, et notamment à la construction de MAGIC (diffractomètre monocristallin à neutrons polarisés), BIFROST et CSPEC (spectromètres à diffusion inélastique), DREAM (diffractomètre à poudre) et SKADI (DNPA).
- Le LLB est également responsable de la mise en place de CRG (groupes de recherche collaborative). Il s'agit de SAM (diffraction aux petits angles) et de SHARP+ (spectromètre à neutrons froids à temps de vol) installés à l'ILL et de SANSLLB (diffraction aux petits angles) installé au PSI.
- Avec le projet ICONA, le LLB évalue actuellement les performances qui peuvent être atteintes avec une source de neutrons HiCANS - High brilliance Compact Accelerator-driven Neutron Source. Ces sources représentent un concept radicalement différent d'un réacteur de recherche (sans combustible fissile) avec un faisceau à temps pulsé assez flexible, ce qui permet d'envisager des instruments innovants de diffusion des neutrons. Le corollaire est que l'analyse des données doit être repensée. Dans la première phase, appelée projet SONATE (Source of Neutrons at Thermal Energies), des tests ont été réalisés avec succès sur une cible de béryllium, validant un concept utilisant un faisceau de protons de 50 kW balayant la surface de la cible pendant 1 000 heures.

Le LLB continue également à développer ses propres thèmes de recherche.

7.4 Champs magnétiques intenses.

Le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) est situé sur deux sites, à Grenoble (champs continus), et à Toulouse (champs pulsés). Les nouvelles bobines développées ces dernières années permettent d'atteindre 150 T à Toulouse en champ semi destructif, 90 T en routine, 43 T en mode hybride en 2025 pour les utilisateurs et 40 T en mode résistif (36 T aujourd'hui). En section 3, des chercheurs y étudient des matériaux lamellaires, des semi-conducteurs et leurs nanostructures, des supraconducteurs, des matériaux fortement corrélés et les systèmes magnétiques. Contrairement à l'ILL et à l'ESRF, le LNCMI est une UPR du CNRS avec du personnel CNRS qui mène une recherche propre tout en accueillant régulièrement des utilisateurs (de laboratoires européens via l'EMFL ; 1/3 provenant de laboratoires français)

7.5 Microscopie électronique

De nombreux équipements de microscopie à transmission, de haut niveau, sont accessibles en France via la plateforme METSA. Des études structurales avec contraste atomique, à très haute résolution, sur des matériaux fragiles, sont maintenant possibles, parfois dans des modes de mesures in situ (par exemple pendant la croissance ou la transformation d'un matériau). Les mesures résolues en temps sont en cours de développement. Également pertinents pour les thématiques de section 3, les modes d'imagerie magnétique, à présent très avancés, aident à résoudre des textures magnétiques complexes. La spectroscopie de perte d'énergie électronique est un outil qui

s'est fortement développé. La gamme spectrale accessible s'est étendue du lointain infra-rouge aux X durs, et la résolution spectrale a atteint quelques meV, positionnant l'EELS comme une technique de spectroscopie aux performances approchant, voire comparables, à celles des lignes de lumière synchrotron, avec une résolution nanométrique, voire atomique. La nouvelle génération d'instruments (EELS+(S)TEM) est désormais utilisée pour étudier les propriétés structurales, spectrales, électroniques et chimiques d'une large gamme de matériaux. En lien direct avec les thématiques de la section 03, elle permet d'accéder aux variations spatiales et spectrales des excitations individuelles ou collectives du gaz d'électrons de valence et de conduction - excitons, plasmons, etc, et plus récemment encore aux modes de vibrations des molécules ou les phonons dans les nanostructures (modes sondés en vecteur d'onde ou dans l'espace direct jusqu'à l'échelle de l'atome individuel).

Trois grandes tendances s'imposent et pourraient devenir dominantes dans les années à venir. La première consiste en l'exploitation des performances nouvellement acquises à des matériaux observés dans des environnements variés, en particulier sous atmosphère gazeuse ou en milieu liquide (microscopie environnementale), ou à froid (azote ou hélium liquide). La seconde concerne l'acquisition, en parallèle de l'EELS, d'autres signaux comme ceux relatifs à la lumière émise (cathodoluminescence, EDX ...). La troisième concerne le développement de techniques rapides (sub-ns) voire ultra-rapides (fs), permettant une compréhension plus fine de la dynamique des excitations dans les solides et nanostructures, ceci à très haute résolution spatiale.

7.6 Plateforme de micro/nanofabrication

La plateforme RENATECH+, délocalisée sur plusieurs laboratoires (5 grandes centrales au C2N, IEMN, LTM, FEMTO-ST, LAAS) dont certains accueillent des chercheurs de la section 3, et complétée par 28 plateformes de proximité, est essentielle pour fabriquer la grande variété de dispositifs au cœur des recherches de nombreux groupes de recherche français. Le réseau RENATECH+ est structurant, rassemblant et mutualisant des compétences scientifiques et technologiques allant du matériau aux composants, et permet aux scientifiques en physique de la matière condensée d'accéder à des infrastructures performantes et à des moyens lourds en micro-nanotechnologies. Ces moyens permettent dépôts, gravures sèches et humides, lithographies électronique, optiques et alternatives 3D, croissance de matériaux et analyses structurales avancées.

7.7 Tendances et évolution

Autour des sources synchrotron, la tendance est à la réalisation d'expériences de plus en plus multi-techniques, et globalement de plus en plus complexes. Le traitement des données, et l'extraction des signaux intéressants, devient à ce titre de plus en plus complexe. A SOLEIL, comme dans presque tous les autres centres de rayonnement synchrotron, l'augmentation de la brillance est l'objectif principal des développements en cours. L'avant-projet sommaire a été validé par le conseil d'administration en 2021 et l'avant-projet détaillé a été lancé en 2022. L'objectif est de maintenir la compétitivité de SOLEIL pendant 15 ans. Il semble souhaitable qu'un rapport sur la mise à niveau de SOLEIL soit inclus dans le prochain rapport prospectif du CNRS, en 2026.

Dans le domaine des neutrons, la construction de l'ESS a pris beaucoup de retard et ne devrait pas ouvrir rapidement. Cette source nécessite un changement majeur dans la conception de l'instrument et l'analyse des données. L'ILL devrait fermer vers 2030-2040. Des projets alternatifs tels que les sources HiCans sont attendus avec impatience par la communauté des neutrons.

Pour ce qui concerne les champs magnétiques intenses, de nouvelles bobines plus performantes continueront à être développées, avec des environnements d'échantillons dans des conditions extrêmes (température, pression).

Au cours des 4 dernières années, plusieurs recrutements ont été faits, aux concours CR pour des études de systèmes frustrés utilisant notamment les sources de neutrons (NEEL), et pour l'étude des excitations magnétiques, en lien avec l'utilisation de la technique RIXS (IMPMC) ; au concours DR, via le recrutement d'un théoricien des matériaux quantiques au LLB.

7.8 Force opportunités, faiblesse et points de vigilance

Les grands instruments participent de manière efficace à l'activité de recherche des laboratoires français. Aux techniques de caractérisation historiques du synchrotron (XAS, EXAFS, XMCD, ARPES, diffraction de surface, etc.) s'ajoutent régulièrement d'autres techniques, par exemple la diffusion cohérente la microscopie, ou la tomographie. L'utilisation de ces nouvelles techniques va s'amplifier avec les améliorations des sources, pour travailler sur des échantillons de plus en plus petits et avec des faisceaux de rayons X cohérents.

A la construction de SOLEIL, la quasi-totalité des lignes de lumière ont été proposés et développés par des chercheurs du CNRS ou du CEA. Aujourd'hui, c'est le personnel SOLEIL (statut de scientifique d'une société civile) qui joue ce rôle pour la mise à niveau à l'horizon 2032. Un point de vigilance concerne les interactions entre définition des besoins scientifiques et développements expérimentaux qui pourraient pâtir de cette situation. Au contraire, les CRG de l'ESRF restent gérés par des personnels CNRS et CEA, et rattachés à des UPR ou UMR. Le LNCMI reste lui géré intégralement par le CNRS, et largement par des chercheurs de la section 3. Concernant les neutrons, il convient de noter la réduction, ces dernières années, du nombre de sources et d'instruments européens, ce qui s'accompagne d'un risque de contraction/récession de l'expertise à moyen terme.

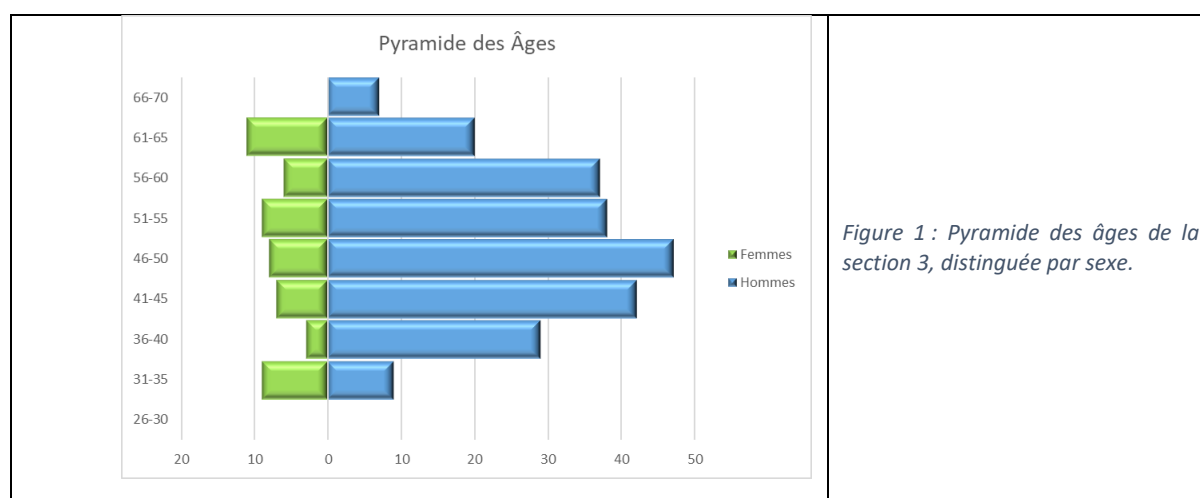
Enfin au regard des enjeux climatiques, les grands instruments sont consommateurs d'énergie. Leur utilisation est fortement plébiscitée par les chercheurs de la section 3. Allier recherche d'excellence et novatrice tout en tenant compte du plan de transition dans lequel le CNRS s'est engagé est un point de vigilance qui méritera a minima un débat serein de la communauté scientifique.

8 Chercheurs de la section 3

8.1 Profil et données statistiques

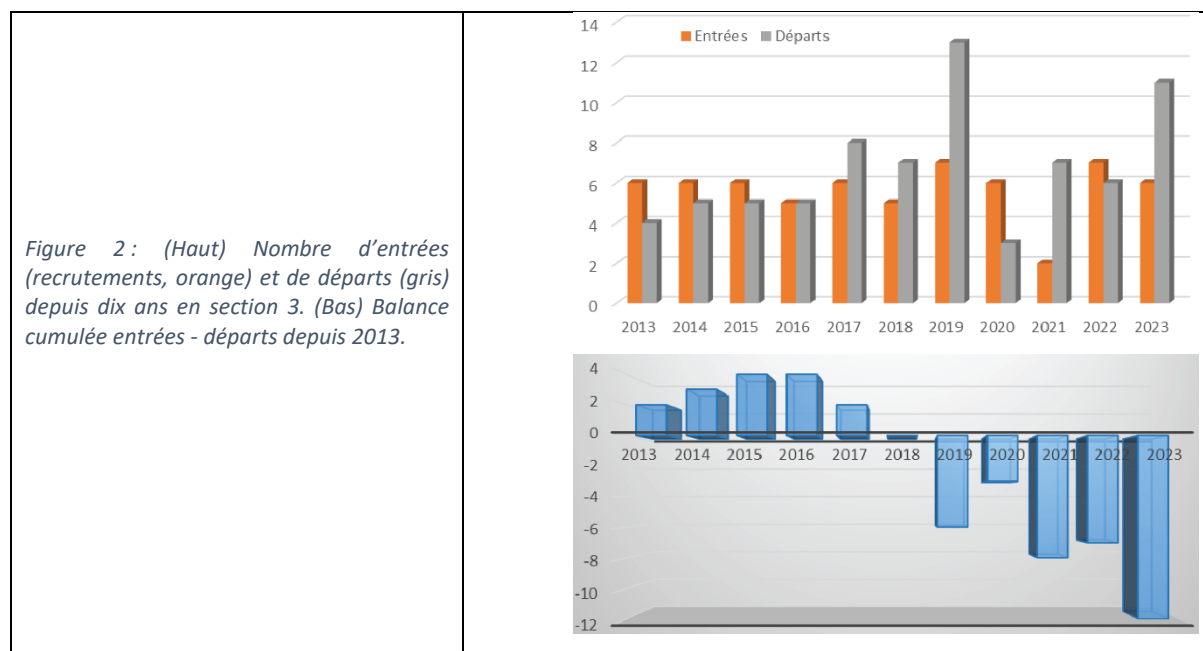
Les données statistiques ont été fournies par le service des ressources humaines du CNRS.

La section 3 est composée de 282 chercheur.euse.s âgé.e.s de 30 à 67 ans (le personnel CDD et les 55 chercheur.euse.s émérités ne sont pas pris en compte). La pyramide des âges des chercheur.euse.s en activité est représentée sur la figure 1. La distribution est de type "champignon", caractéristique d'une population vieillissante. La répartition hommes/femmes présente un déséquilibre marqué, avec seulement 53 femmes pour 229 hommes, soit 18,8 % de femmes.



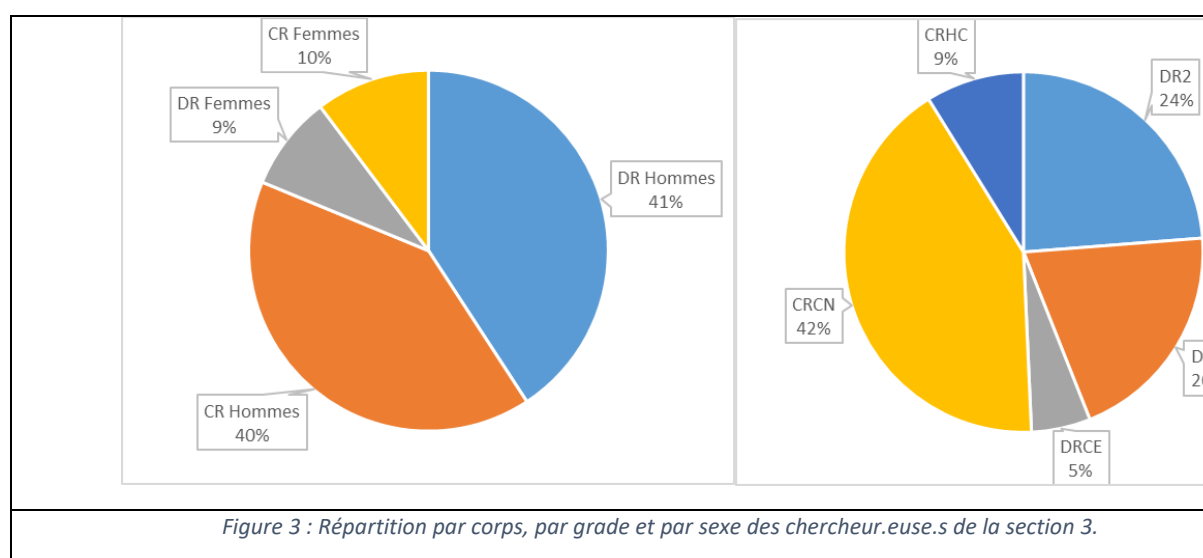
Les nombres de départs et de recrutements CRCN depuis 10 ans dans la section 3 sont montrés sur la figure 2, sur l'histogramme du haut. (En 2023 un DR supplémentaire a été recruté.) La différence entre ces

nombre, cumulée d'année en année, représentée dans l'histogramme du bas de la figure 2, révèle une diminution du nombre de chercheur.euse.s en section 3 à partir de 2019, de plus de 10 chercheur.euse.s.



La figure 3 représente la répartition des chercheur.euse.s par corps, par grade et par sexe. Les chargé.e.s de recherche (CR dont 29 femmes et 114 hommes) et les directeur.rice.s de recherche (DR, 24 femmes et 115 hommes) sont en proportion 50/50. Le corps des CR de classe normale (CRCN) totalise 42% des effectifs, celui des DR de 2ème classe (DR2) 24%, celui des DR de 1ère classe (DR1) 20%, et celui des DR de classe exceptionnelle (DRCE) 5%. Les distributions en âge dans les différents corps montrent un point de basculement autour de 45 ans (figure 4), que l'on retrouve dans l'âge des candidat.e.s et des promu.e.s au concours DR2.

La répartition par sexe se retrouve à peu près dans les différents grades (le nombre de femmes étant faible, la pertinence statistique est limitée), à l'exception du grade des CR hors-classe (CRHC) qui est constitué de 56% de femmes.



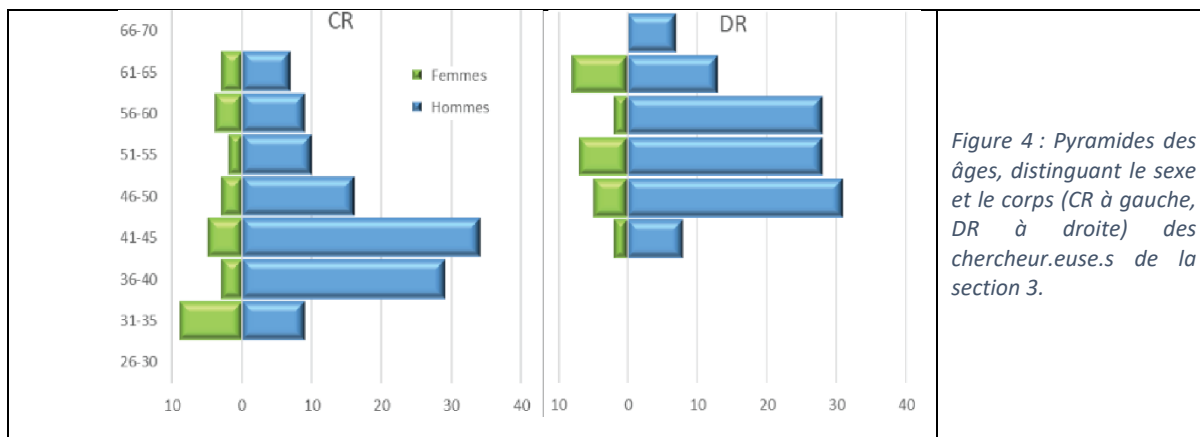


Figure 4 : Pyramides des âges, distinguant le sexe et le corps (CR à gauche, DR à droite) des chercheur.euse.s de la section 3.

Les données d'affectation des personnels dans les délégations régionales font apparaitre deux pôles principaux (figure 5) : la délégation régionale CNRS Île-de-France de Gif-sur-Yvette (DR4) englobant le plateau de Saclay, et la délégation régionale CNRS Alpes (DR11). Ces deux délégations représentent chacune 25% des effectifs de la section 3.

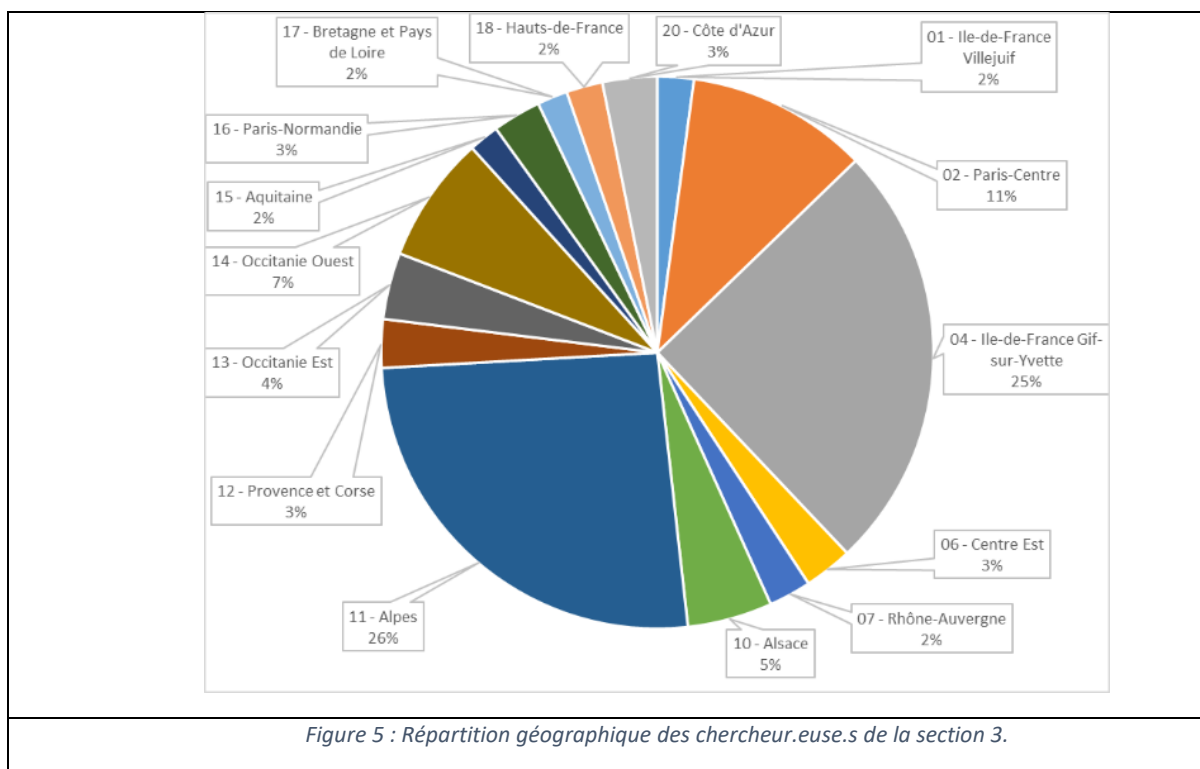


Figure 5 : Répartition géographique des chercheur.euse.s de la section 3.

8.2 Perception et répartition des chercheur.euse.s dans les thèmes de la section 3

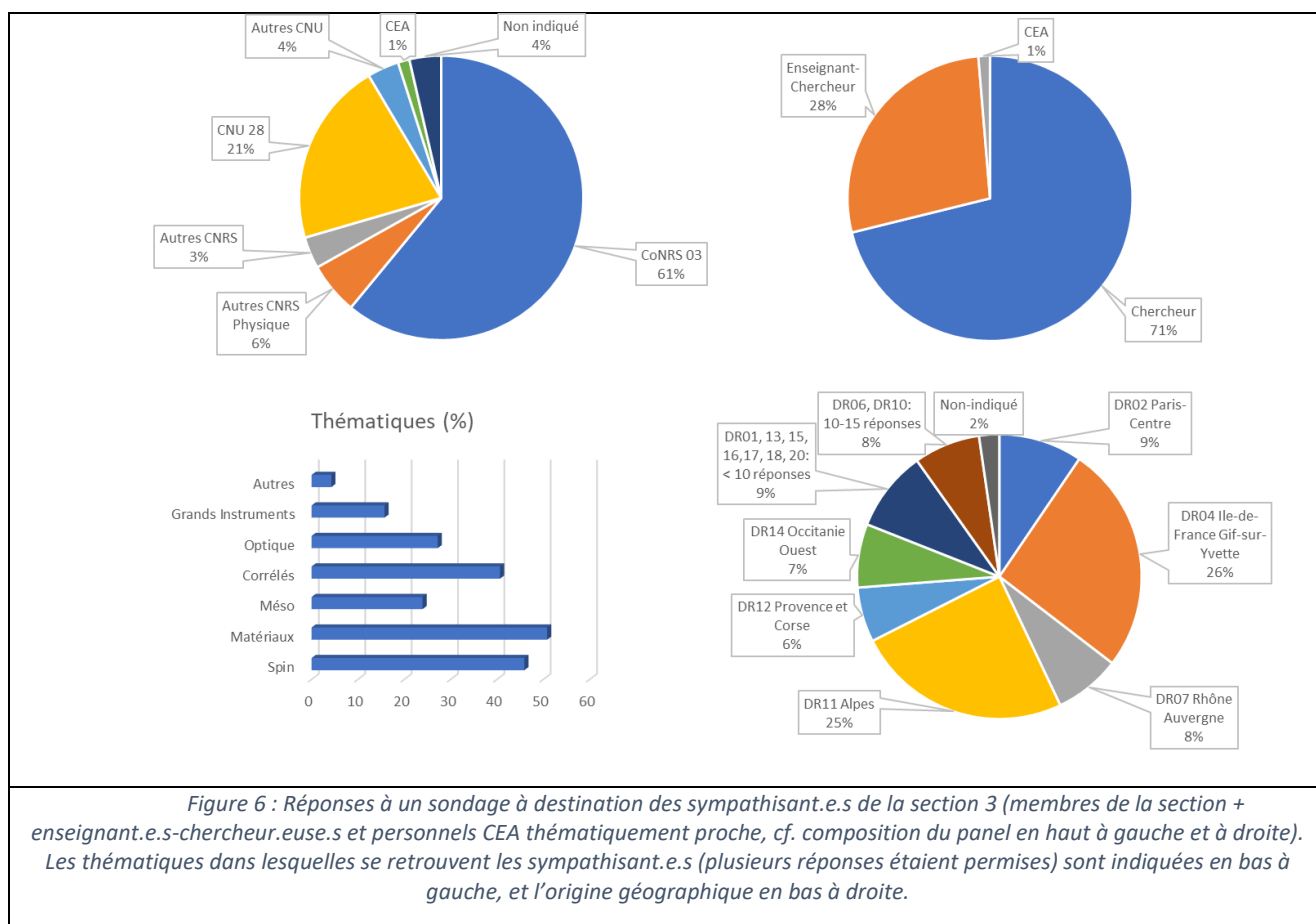
Afin de mieux cerner la diversité des profils des chercheur.euse.s sympathisant.e.s de la section 3 (c'est à dire appartenant à la section, et également enseignant.e.s-chercheur.euse.s et personnels CEA estimant leur activité de recherche représentée en partie par le périmètre de la section), nous leur avons proposé un sondage. L'analyse décrite ci-dessous porte sur les réponses de l'ensemble des sympathisant.e.s (les réponses des seuls chercheur.euse.s CNRS en section 3 montrent les mêmes tendances, à quelques pour-cent près).

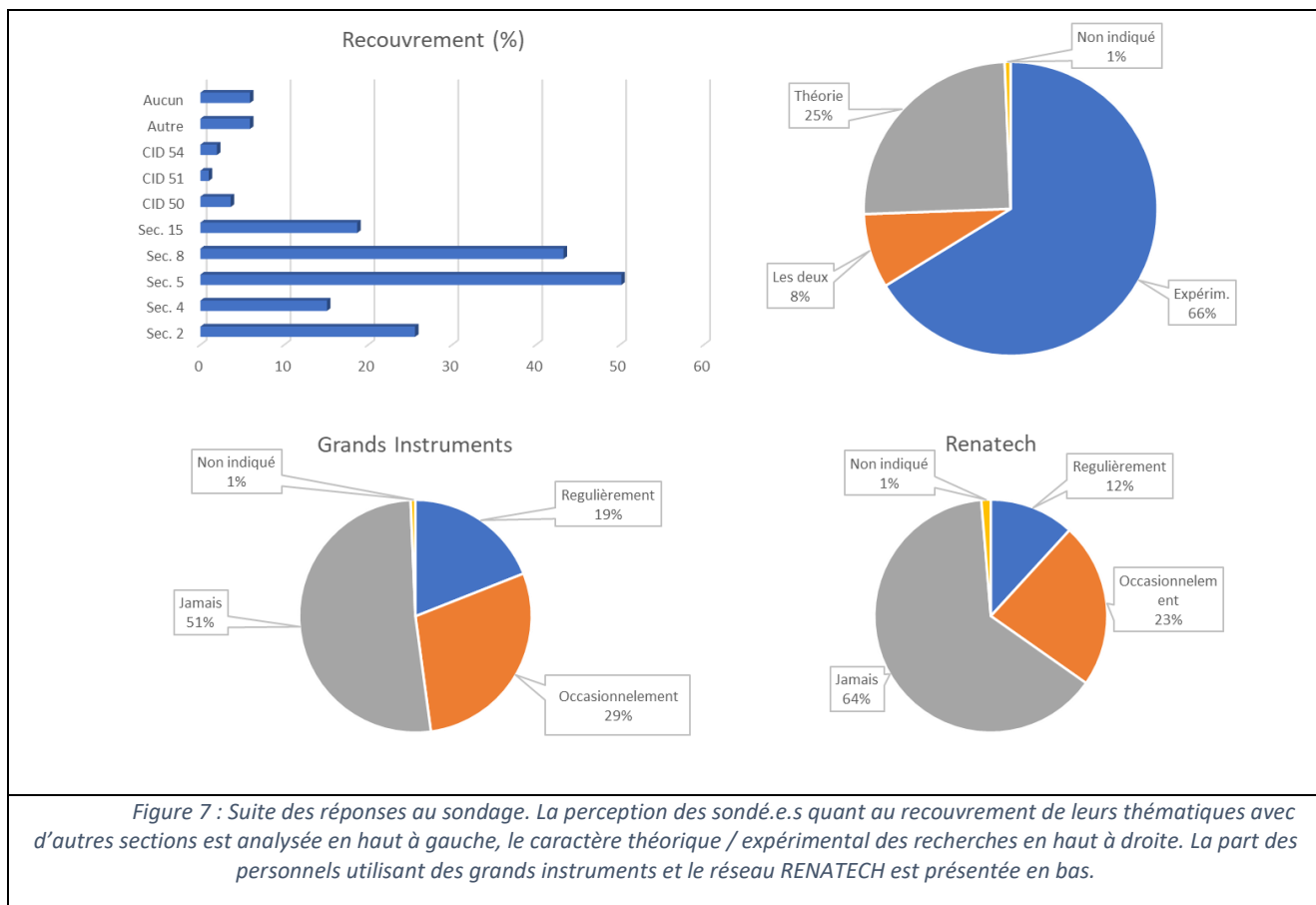
Nous avons défini six champs thématiques : 1) grands instruments et plateformes, 2) optique de la matière condensée, 3) physique des états électroniques, des corrélations et interactions, 4) physique mésoscopique et

information quantique, 5) sciences des matériaux et 6) physique du spin. Ces thèmes concernent l'activité de 15%, 26%, 40%, 23%, 50% et 45%, respectivement du personnel (le sondage autorisait de sélectionner plusieurs champs thématiques). Ces répartitions mettent en évidence le rôle important de la science des matériaux, et la représentation forte de certaines thématiques (notamment physique du spin et physique des états électroniques, des corrélations et interactions). Il convient d'être vigilant à ne pas tirer de conclusions hâtives quant au dynamisme des sous-communautés : les chiffres discutés ici ne concernent que des personnels permanents, et on sait que certaines thématiques sont très attractives pour des doctorants et post-doctorants.

Le sondage fait par ailleurs apparaître des proximités thématiques avec d'autres sections du CNRS. A cet égard, 50% des sondé.e.s identifient notamment la section 5 : *Matière condensée : organisation et dynamique* (CNRS Physique) et 43% la section 8 : *Micro- et nanotechnologies, micro- et nanosystèmes, photonique, électronique, électromagnétisme, énergie électrique* (CNRS Ingénierie). La section 2 : *Théories physiques : méthodes, modèles et applications* (CNRS Physique), pour 25% des sondé.e.s, et la section 15 : *Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés* (CNRS Chimie), pour 18%, sont également identifiées (plusieurs réponses étaient autorisées).

25% des sondé.e.s dédient leurs activités à la théorie, 66% à une activité expérimentale, et 8% aux deux. Enfin presque 50% des réponses mentionnent une utilisation régulière ou occasionnelle de grands instruments (sources synchrotrons, de champs intenses ou de neutrons). Les centrales de technologie du réseau RENATECH sont utilisées par 35 % des sondé.e.s.





8.3 Réflexion sur les activités en science des matériaux

Notre sondage montre que l'activité des chercheur.euse.s en section dépend largement d'une recherche en science des matériaux. Cette caractéristique a été remarquée et soulignée à plusieurs occasions ces dernières années. Un signal fort en ce sens a par exemple très récemment été relayé avec une certaine amplitude à l'occasion du travail important de prospective accompli par la communauté en 2023 sous l'impulsion de la direction de CRNS Physique.

Parallèlement au sondage, nous avons, lors de notre analyse spécifique de chacun des six champs thématiques mentionnés plus haut (cf. autres parties de ce rapport), vu apparaître à plusieurs reprises l'importance de recherches pour le développement de matériaux dans les activités de nombres de chercheur.euse.s de la section, pour des candidatures aux recrutements, des promotions et dans le suivi des activités des collègues. Les matériaux sont ainsi clairement stratégiques pour de nombreuses activités, et appellent une certaine vigilance. L'expertise en élaboration de matériaux est en France, et dans le périmètre thématique de la section 3 en particulier, importante et variée, dans différentes classes de systèmes (par exemple : semi-conducteurs, oxydes, films minces métalliques, matériaux 2D, en hétérostructures ou multicouches, selon différentes dimensionnalités). Si l'âge d'or de l'étude de certains de ces systèmes semble révolu aujourd'hui, dans l'ensemble l'expertise a su s'adapter pour se renouveler. Dans un certain nombre de cas cependant, les évolutions s'opèrent avec un certain retard vis à vis de certains groupes moteurs internationaux. Ces retards ont certainement des origines structurelles, liées à l'organisation et au financement de la recherche dans ces domaines en France, et posent question : s'il n'est pas nécessairement souhaitable de suivre systématiquement les sujets 'à la mode', un certain opportunisme de compétences peut être valorisable, et initier certaines des nouvelles modes est certainement souhaitable. Cependant, tant pour jouer un rôle de précurseur que pour tenir une position de fournisseur de matériaux de qualité à l'état de l'art, des moyens importants en personnel et en équipement sont indispensables. Ce point est au cœur d'une réflexion plus large sur les moyens humains et instrumentaux, qui concerne d'autres sections et d'autres instituts du CNRS, ainsi que plusieurs groupements de recherche (GDRs), les programmes d'investissement

d'avenir (et notamment, dans leur déclinaison actuelle avec plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche — PEPRs), et le réseau national des centrales de technologies de nanofabrication (RENATECH/+).