

## SECTION 02

---

# THÉORIES PHYSIQUES : MÉTHODES, MODÈLES ET APPLICATIONS

### Composition de la section

David DEAN (président de section); Jean-Noël FUCHS (secrétaire scientifique); Jean AVAN; Jonathan BAUR; Patricia BLANCHARD; Christine CHAMBON; Marco CIRELLI; Leticia CUGLIANDOLO; Raffaele D'AGNOLO; Adam FALKOWSKI; Laura FOINI; Mariana GRANA; Claude LOVERDO; Nicolas PLIHON; Guillaume ROUX; Jean-François RUPPRECHT; Vyacheslav RYCHKOV; Piotr TOURKINE; Vincent VENNIN; Filippo VERNIZZI. Ancienne membre contributrice : Cécile REPELLIN.

---

## I. Présentation de la section

---

### A. Inscription dans le paysage de la recherche

L'une des singularités d'une section du CNRS dédiée à la physique théorique et à la modélisation est son approche ouverte de la physique, qui n'est pas limitée à des systèmes physiques spécifiques, offrant ainsi un contraste avec d'autres sections qui se concentrent, par exemple, sur les systèmes de matière condensée dure ou molle. Alors qu'au niveau expérimental, différents systèmes physiques exigent des méthodes très variées, au niveau théorique, les méthodes utilisées présentent

souvent une grande similarité, voire un chevauchement significatif.

Parmi les concepts clés qui englobent la physique théorique, la discipline de la théorie des champs se distingue par son application à la physique des particules, à la théorie de la matière condensée, à la physique statistique, à la physique non-linéaire et à la turbulence. Dans toutes ces disciplines est par exemple utilisé le langage commun du groupe de renormalisation et des développements perturbatifs diagrammatiques.

Souvent, du point de vue mathématique, les théoriciens et théoriciennes partagent une méthodologie très voisine et transposable à plusieurs domaines, alors que les systèmes physiques étudiés peuvent être très divers. Un autre exemple de méthode prédominante

est l'utilisation de la dynamique de Langevin et des processus stochastiques (initialement développés pour modéliser la dynamique thermique classique), qui s'appliquent aujourd'hui à des sujets tels que la théorie quantique des champs (quantification stochastique) ou encore au développement de modèles solubles pour décrire des systèmes complexes tels que le climat et l'économie. D'autres concepts qui imprègnent actuellement la discipline de la physique théorique incluent les symétries et les dualités, la topologie, les symétries généralisées, l'intrication quantique, la théorie des matrices aléatoires et les correspondances AdS/CFT.

La cohérence de la physique théorique en tant que discipline à part entière est mise en évidence par l'existence d'un grand nombre de laboratoires se définissant comme des laboratoires de physique théorique, parmi lesquels figure un nombre significatif en France (LPT Toulouse, LPTM Cergy, LPTMS Orsay, LPTHE Paris, LPTMC Paris, IPhT Saclay, LAPTh Annecy, LPCT Nancy, CPT Marseille, CPhT de l'École Polytechnique, LPMC Grenoble, etc.). De plus, si l'on considère que la recherche scientifique essentielle est celle que nous transmettons aux étudiants, la présence de plusieurs livres renommés portant le titre « physique théorique » confirme l'importance éducative du sujet.

L'attrait scientifique de la section 02, ainsi que de ses laboratoires associés, est clairement démontré par le nombre important de candidatures pour les postes ouverts dans le concours CRCN. Ce concours attire un grand nombre de candidatures, aussi bien de France que de l'étranger, et nous enregistrons généralement trois fois plus de candidatures en section 02 que dans les autres sections de physique, pour un nombre approximativement équivalent de postes disponibles.

Finalement, une force particulière de la section 02 réside dans sa capacité à permettre à un grand nombre de ses membres d'explorer divers domaines de la physique tout en restant au sein de la même section du CNRS. En effet,

de nombreux collègues de la section 02 ont effectué d'importantes transitions thématiques au cours de leur carrière scientifique du point de vue des systèmes physiques étudiés. Cependant, en termes de méthodes employées, ces transitions semblent souvent beaucoup plus continues. De plus, cette section a toujours disposé de l'expertise nécessaire pour évaluer la recherche de ses membres tout au long de leur carrière.

## B. Contours scientifiques

La section 02 se structure autour de la physique théorique et se décline sur plusieurs grands domaines :

### 1. La physique mathématique

La physique mathématique irrigue l'ensemble de la physique théorique, englobant les domaines allant des ondes gravitationnelles à la matière condensée, ainsi qu'à la physique classique des systèmes dynamiques. Elle fournit des concepts formellement définis et des résultats rigoureux qui sont les bases d'une compréhension approfondie des lois de la physique. Des concepts unificateurs tels que la théorie des champs, le groupe de renormalisation et les théories conformes des champs jouent un rôle essentiel. La théorie des champs demeure majoritairement étudiée sous sa forme perturbative dans le contexte de la physique des particules. Cependant, elle est de plus en plus explorée sous les aspects non-perturbatifs. Toutefois, le défi persiste dans la quête de la gravité quantique. Alors que la gravitation est bien comprise en tant que théorie classique, l'introduction des effets quantiques conduit à l'émergence d'une échelle d'énergie où l'interaction gravitationnelle devient intense, et une approche perturbative échoue. Différentes alternatives ont été proposées pour décrire la gravité quantique, notamment la théorie des cordes.

## 2. La physique statistique

La physique théorique reste une source incomparable de développements conceptuels majeurs en physique classique, par l'intermédiaire d'une part de la physique statistique et d'autre part des systèmes dynamiques et des phénomènes non-linéaires. Au-delà de leurs progrès fondamentaux propres, ces domaines sont au cœur d'avancées majeures en biophysique, physique des réseaux, turbulence, plasma, *machine learning* (apprentissage machine), et dans l'étude de systèmes dynamiques complexes comme le climat. L'impact des méthodes de physique théorique est très fort, car elles apportent des outils qui formalisent la compréhension de leurs dynamiques et de leurs structures complexes.

## 3. La physique des hautes énergies

La physique des particules, des astroparticules, la cosmologie et la théorie de la gravitation concernent l'étude des lois fondamentales de l'Univers et de son contenu. Ce domaine est souvent décrit comme celui des deux infinis, où l'extrêmement grand (les échelles de la cosmologie et de l'astrophysique) rencontre l'extrêmement petit (les échelles des particules élémentaires). Le domaine est en effervescence continue. Le modèle standard de la physique des particules est testé de plus en plus précisément aux collisionneurs de particules (notamment le LHC du CERN à Genève) à des énergies de plus en plus élevées. Une grande partie de la communauté est donc dédiée à l'étude des interactions fortes, nécessaire à l'élaboration de prédictions de plus en plus précises à comparer avec les données des collisionneurs. En même temps, le modèle standard est notablement incomplet. Par conséquent, une autre partie de la communauté s'efforce d'imaginer et ensuite de dévoiler la nouvelle physique au-delà du modèle standard. Cela concerne en particulier le problème de la matière noire et d'autres problèmes ouverts en physique des astroparticules tels que la masse des neutrinos et l'asymétrie entre matière et antimatière. La compréhension de l'évolution de l'Univers

primordial dépend également de cette nouvelle physique, et *vice-versa*, l'Univers primordial est un banc de test crucial pour elle. La communauté des cosmologues s'investit dans la construction de modèles pour comprendre les conditions initiales de l'Univers primordial et leur évolution, ainsi que l'origine de l'accélération de l'expansion. Enfin, la gravitation n'est pas incluse dans la description du modèle standard, mais elle est centrale dans la description de l'évolution de l'Univers primordial ainsi que de l'Univers proche, et de systèmes astrophysiques tels que les trous noirs ou les étoiles à neutrons. Une grande partie de la communauté étudie les façons de tester la relativité générale dans ces systèmes, élabore des modèles de gravité modifiée et dévoile les grandes propriétés d'une théorie viable de gravité quantique.

## 4. La physique de la matière condensée

La physique de la matière condensée est issue de la physique des solides et s'intéresse principalement à l'émergence de comportements inattendus dans un système quantique à N-corps. Les exemples les plus frappants, découverts expérimentalement, sont ceux de la supraconductivité à haute température critique et de l'effet Hall quantique fractionnaire. Au cours des dernières années, ils ont donné lieu à des développements théoriques remarquables comme le concept de fractionalisation et les phases topologiques de la matière. Parmi les autres développements actuels, citons l'utilisation de systèmes synthétiques (atomes froids, polaritons, ions piégés, qubits supraconducteurs, etc.) pour la simulation quantique de modèles fortement corrélés, l'étude de la dynamique proche ou loin de l'équilibre de systèmes quantiques isolés ou ouverts, et la mise au point de méthodes numériques basées sur l'intrication quantique dans le problème à N-corps. La section 02 concentre les théoriciens et les théoriciennes des modèles jouets et des concepts par contraste avec ceux des calculs *ab initio*. Ils et elles parlent couramment le langage de la théorie des champs et échangent fréquemment des concepts avec les collègues

## Comité national de la recherche scientifique

des hautes énergies (groupe de renormalisation, topologie, symétries généralisées, holographie, théories de jauge sur réseau, etc.). Alors qu'une expérimentatrice des atomes froids est éloignée d'un expérimentateur des supraconducteurs (l'une est une experte d'optique quantique, l'autre de cryogénie et de transport électrique), un théoricien ou une théoricienne de la matière condensée peut facilement étudier les deux sujets, car ils sont conceptuellement proches.

## C. Ressources humaines

Sur la base des données fournies par le CNRS et de notre connaissance des membres de la section 02, nous fournissons dans ce paragraphe des éléments statistiques (possiblement imparfaits) concernant les ressources humaines. La ventilation par grade et par genre est fournie dans le tableau 1. La section compte un total de 223 membres actifs à la date du 1<sup>er</sup> septembre 2023, c'est-à-dire de membres qui ont pour affiliation un laboratoire du CNRS et qui ne sont pas retraités, en disponibilité ou ayant quitté le CNRS. Notons que les émérites, bien que contribuant à la recherche, ne sont donc pas pris en compte.

**Tableau 1** : Effectifs de la section 02 ventilés par genre et par grade.

	Homme	Femme	Total	% Femme	
<b>Total</b>	<b>198</b>	<b>25</b>	<b>223</b>	<b>11,2%</b>	
CRCN	72	11	83	13,3%	<b>93</b>
CRHC	10	0	10	0,0%	
DR2	52	3	55	5,5%	<b>130</b>
DR1	47	9	56	16,1%	
DRCE	15	2	17	11,8%	
Autre	2	0	2	0,0%	

Les données font apparaître une majorité de grade DR (presque 60%) avec en moyenne 11% de femmes, ce qui est particulièrement faible. La sous-représentation des femmes en DR2 associée à une surreprésentation en DR1 semble principalement liée au fait qu'il n'y a qu'une seule femme sur la tranche d'âge 40-50 ans. Toutes les femmes de 41 ans et plus sont DR. La proportion de femmes CR est légèrement plus importante, particulièrement pour les membres de moins de 40 ans, comme on le voit sur les pyramides des âges dans la figure 1. En ce qui concerne le nombre total de membres par tranche d'âge de 5 ans, on observe un plateau d'environ 34 membres (soit environ 7 membres par an) au-dessus de 40 ans. Par rapport à ce plateau, il y a un déficit notable dans les tranches d'âge de 30-35 ans et de 35-40 ans. Cela entraîne un vieillissement de la population de la section. La pyramide des âges par grade indique qu'une grande majorité des CR devient DR à un âge typique de 45 ans.

On peut constater le départ d'une quarantaine de membres recrutés après 2000, en majorité de nationalité étrangère, mais pas uniquement, dont une petite dizaine de femmes. Cela traduit à la fois la nature internationale du concours, gage d'excellence, mais aussi la compétition pour les postes dans l'ESR dans lequel le CNRS offre une stabilité pour de (relativement) jeunes chercheurs et chercheuses mais s'avère moins attractif pour les « seniors ». Le nombre de postes au concours en regard des effectifs plus âgés et des départs ne permet pas le renouvellement de l'effectif total. En termes de nationalités, la composition demeure néanmoins à forte dominante française et européenne, mais avec une baisse en proportion significative chez les plus jeunes membres (cf. figure 2).

Pour terminer, la répartition des membres de la section 02 dans les laboratoires et les délégations régionales est donnée dans la figure 3. Les membres sont affectés à 49 UMR en tout, dont 10 rassemblent environ 64% des effectifs. Il en existe 29 avec moins de 2 membres de la section. Au niveau géographique, il en ressort une très forte dominance de la région parisienne, la région Île-de-France accueillant près de 60% des effectifs, suivie

Section 02 - Théories physiques : méthodes, modèles et applications

d'Auvergne-Rhône-Alpes avec 20% et Provence-Alpes-Côte-d'Azur avec 10%. La répartition associée par délégation régionale est présentée dans la figure 3. Cette forte centralisation n'est probablement pas un atout.

Dans la partie suivante, nous détaillons l'état actuel au sein de la communauté française des différentes thématiques mentionnées dans l'introduction scientifique et identifions l'émergence de sujets nouveaux.

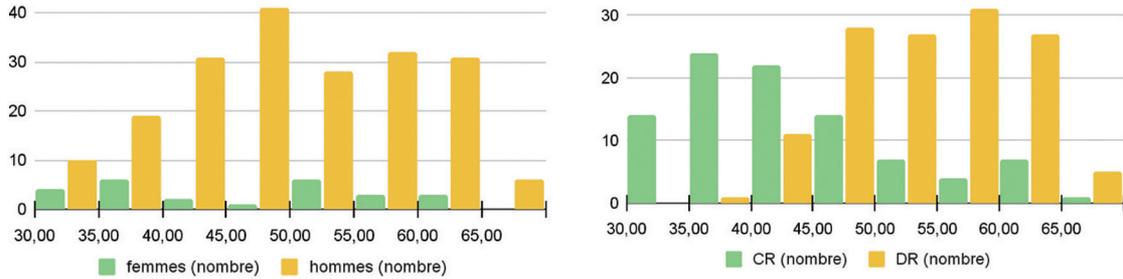


Figure 1 : Pyramides des âges par genre (à gauche) et par grade (à droite).

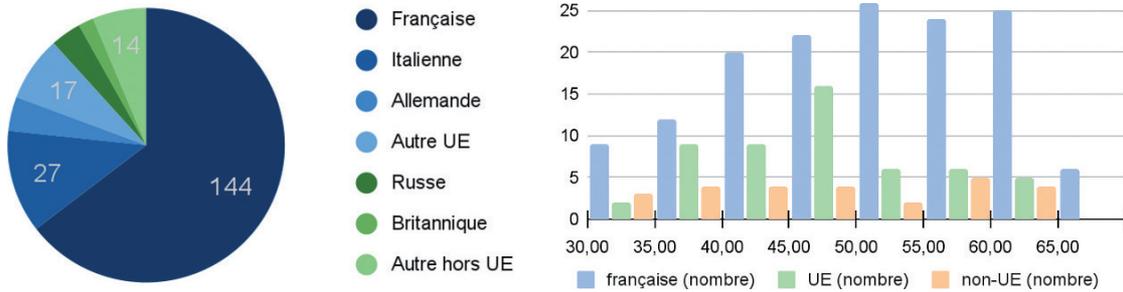


Figure 2 : Nationalités représentées dans la section (à gauche) et pyramide des âges par nationalité (à droite).

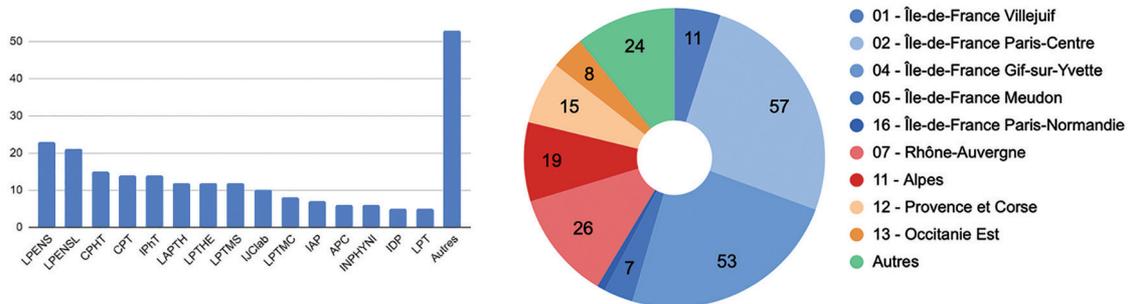


Figure 3 : Effectifs de la section 02 par laboratoire (à gauche) et par délégation régionale (à droite).

---

## II. Thématiques scientifiques détaillées

---

### A. Modèle standard et physique aux collisionneurs

#### 1. QCD, interactions fortes et ions lourds

Les interactions fortes sont comprises dans le cadre de la chromo-dynamique quantique (QCD). Elles ont plusieurs applications, allant des calculs de précision de processus produits dans des collisionneurs hadroniques, l'étude de la structure interne des hadrons, la compréhension des processus nucléaires et de la dynamique stellaire, jusqu'à des aspects plus formels tels les dualités.

Le premier des aspects mentionnés, la QCD aux collisionneurs, a connu des progrès vertigineux dans les dernières années, coïncidant avec les « Runs » 1 et 2 du Grand collisionneur de hadrons (LHC) : (1) la totalité des processus est désormais connue au 2<sup>e</sup> ordre perturbatif (*next leading order* ou NLO) en QCD, et le calcul est entièrement automatisé (NLO *revolution*). Ces calculs sont combinés avec les algorithmes de cascades partoniques et d'hadronisation (qui lient les quarks de la QCD aux états observés, les hadrons) pour obtenir des prédictions dont la précision typique est désormais meilleure que, ou égale à, 10% ; (2) les jets de hadrons, particulièrement dans le régime de grande énergie (jets « boostés ») sont devenus un domaine de recherche en soi, dont les applications vont jusqu'à l'intelligence artificielle, avec qui elles ont de nombreux sujets de recherche en commun (*jet imaging*, etc.) ; (3) l'étude des distributions de partons dans les hadrons – une des sources principales d'incertitude – a également atteint le statut de physique de précision, grâce à l'abondance de données de haute qualité, à de nouveaux calculs et à des techniques numériques nouvelles ; (4) dans son régime non-perturbatif (couplage fort) la QCD peut être discrétisée dans un réseau

espace-temps (QCD sur réseau ou LQCD) et certaines classes de processus ainsi simulées à partir de principes premiers. La LQCD a récemment connu une véritable transition en termes de processus que l'on peut simuler et de la précision que l'on peut atteindre, grâce à une progression dans la compréhension des théories de jauge discrétisées, ainsi que dans les techniques de calcul et dans les ressources de calcul.

Aux énergies des collisionneurs, la compréhension de multiples effets collectifs, en particulier la saturation gluonique, est essentielle pour caractériser l'état initial dans les collisions d'ions lourds, avant formation du plasma quark-gluon (QGP). La compréhension des processus nucléaires et de la dynamique stellaire s'appuie de façon cruciale sur ces programmes expérimentaux de collisions d'ions lourds, permettant d'explorer la QCD à température finie et à haute densité, et de caractériser le QGP et plus généralement le diagramme de phase de la matière nucléaire. Ce domaine très vaste et très interdisciplinaire offre des liens avec des domaines allant de la physique des fluides aux méthodes formelles dites holographiques. Des progrès récents, reposant sur l'utilisation de théories effectives, permettent, en partant des degrés de liberté fondamentaux de QCD, d'attaquer sous un nouvel angle des questions anciennes et difficiles liées à la compréhension de la matière nucléaire : la structure des noyaux, les réactions nucléaires et leurs applications dans la compréhension de la dynamique stellaire et dans la technologie de la fusion et de la fission.

Les équipes théoriques françaises ont toujours eu un rôle de premier plan dans les thématiques liées à la QCD.

#### 2. Interactions électrofaibles

Dans les dernières années le domaine des interactions électrofaibles a été marqué par une découverte majeure : celle d'une particule scalaire dont les propriétés montrent un accord de plus en plus solide avec celles du boson de Higgs prédit par le mécanisme de

Brout-Englert-Higgs. Cette information est une pierre angulaire dans la consolidation du modèle standard, notamment du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible. La compréhension de ce mécanisme a des conséquences profondes sur le comportement ultraviolet de la théorie. D'un point de vue à la fois théorique et expérimental, cette découverte ouvre la piste à l'étude de précision des couplages de Higgs, et du secteur électrofaible. Plusieurs projets de successeurs au LHC sont à l'étude à cette fin. La valeur de la masse de ce nouveau boson présente un énorme défi à notre compréhension théorique. Les explications les plus probables, basées sur des nouvelles symétries (supersymétrie ou invariance d'échelle), étaient attendues de se manifester au LHC. Les données qui s'accumulent ne montrent aucune trace de ces symétries et ouvrent la possibilité que l'explication de la masse du boson de Higgs soit beaucoup plus profonde et que l'étude de ce problème soit liée à la constante cosmologique ou à des modifications de la théorie des champs.

### 3. Physique de la saveur

La physique de la saveur étudie de manière complexe les propriétés et les interactions des quarks et des leptons, constituants fondamentaux de la matière. En se concentrant sur les caractéristiques des différentes saveurs de quarks (*up*, *down*, charme, étrange, *bottom*), elle étudie la dynamique des hadrons composés de ces quarks. Grâce à une étude méticuleuse, les scientifiques cherchent à déchiffrer les aspects intrigants du comportement des hadrons, notamment leurs modes de désintégration, leurs durées de vie et leurs mécanismes de production. En étudiant la riche tapisserie de la physique hadronique, on cherche en particulier à percer les mystères des interactions fortes. En outre, ces recherches contribuent à notre compréhension du modèle standard et offrent un aperçu critique de la physique potentielle au-delà du cadre théorique établi. La physique des saveurs, qui met l'accent sur les constituants des quarks dans les hadrons, continue d'être une frontière

d'exploration fascinante dans la recherche en physique des particules.

L'étude des saveurs leptoniques est un domaine connexe. En particulier, les neutrinos fournissent une réalisation explicite de particules massives légères dans la nature, leur masse non nulle conduisant à une extension du modèle standard, comportant une nouvelle échelle d'énergie (pouvant couvrir plusieurs ordres de grandeur) ainsi que plusieurs nouvelles phases de violation de la symétrie CP. Un objectif important pour les expériences à venir est précisément la possibilité de contraindre ces paramètres. Parallèlement, l'étude des saveurs leptoniques chargées (électron, muon, tau) sert à éclaircir les symétries du modèle standard, où la conservation de chaque saveur leptonique distincte est une symétrie accidentelle.

## B. Physique au-delà du modèle standard et astroparticules

### 1. Physique au-delà du modèle standard

La physique au-delà du modèle standard explore les forces fondamentales et les particules au-delà de celles décrites par celui-ci. Diverses théories tentent de répondre à certains problèmes phénoménologiques du modèle standard, tels que la matière noire, l'énergie noire, la masse des neutrinos, ou encore l'asymétrie entre la quantité de matière et d'antimatière dans l'Univers. Elles peuvent également tenter de résoudre certaines énigmes théoriques du modèle standard, comme par exemple le problème de la hiérarchie, l'unification du couplage de jauge, les hiérarchies de masses et de mélanges de fermions, le *strong CP problem*, ou encore la cohérence théorique en présence de gravité. Parmi les exemples notables, on peut citer la supersymétrie, qui suggère que chaque particule a un partenaire supersymétrique, la théorie de la grande unification visant à unifier les forces électromagnétiques, faibles et fortes et la théorie des cordes, qui postule que les particules ne sont pas des points mais de minuscules cordes vibrant dans

de multiples dimensions. En outre, les théories effectives, telles que la théorie des champs effectifs du modèle standard (SMEFT), fournissent un cadre pour étudier la nouvelle physique à des échelles d'énergie hors de portée de l'expérimentation directe. Ces théories permettent aux physiciens de faire des prédictions sur les phénomènes à haute énergie en se basant sur les effets qu'ils auraient à des énergies plus basses. Alors que des expériences telles que le Grand collisionneur de hadrons cherchent des preuves de ces théories, le domaine continue à repousser les limites de la compréhension des constituants fondamentaux de l'Univers, dans l'espoir de résoudre des mystères de longue date dans le Cosmos.

## 2. Phénoménologie et modèles de matière noire. Physique des astroparticules

La physique des astroparticules se situe à l'interface entre la physique des particules élémentaires, l'astrophysique et la cosmologie. Elle utilise typiquement les méthodes de la physique des particules, appliquées à des systèmes astrophysiques et pour résoudre des questions cosmologiques.

Le problème de la matière noire reste l'un des mystères majeurs de la physique et est un cas exemplaire de sujet d'étude en physique des astroparticules.

Les années récentes ont vu un changement de paradigme majeur dans le domaine théorique : les candidats plus traditionnels tels que les WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*) ont cédé en partie la place à d'autres candidats tels que les axions et les *axion-like particles*, la matière noire légère (sub-GeV), les trous noirs primordiaux ou encore toute une pléthore de candidats plus exotiques. Par conséquent, les études phénoménologiques ont suivi. Par exemple, une grande activité récente se développe autour de la matière noire légère et ultralégère, et autour des trous noirs primordiaux.

L'étude des rayons cosmiques reste aussi un sujet central et un autre cas exemplaire de

physique des astroparticules. Les mesures de haute précision fournies par l'expérience AMS installée sur la station spatiale internationale permettent d'avancer dans de nombreuses directions : la modélisation des sources (astrophysiques conventionnelles mais aussi exotiques, telles que l'annihilation de matière noire !), le transport dans la Galaxie, les collisions dans le milieu interstellaire (et donc l'étude des sections efficaces), etc.

Un troisième axe, parmi d'autres, concerne l'exploitation d'observables cosmologiques (par exemple, le rayonnement du fond micro-ondes ou le spectre de puissance de la matière) pour en extraire les propriétés des particules élémentaires. Par exemple, la masse et le nombre des neutrinos, leurs interactions, les interactions des particules de matière noire, etc.

La France a souvent eu un rôle de premier plan international sur ces sujets, et continue de l'avoir. Plusieurs groupes sont actifs dans la construction de modèles de matière noire, et dans l'étude de leur phénoménologie. Le contact avec la communauté expérimentale est aussi assez étroit. Dans la physique des rayons cosmiques, plusieurs groupes sont leaders de niveau international, ainsi que pour l'exploitation des mesures cosmologiques.

## C. Cosmologie

La France a toujours joué un rôle majeur dans la recherche en cosmologie. Ces dernières années, les équipes théoriques dans ces domaines ont apporté des contributions marquantes et à l'impact international, que ce soit en cosmologie primordiale, dans la physique de l'énergie noire, des grandes structures de l'Univers ou des astroparticules.

En particulier, la recherche sur l'Univers primordial, dont la finalité principale est de comprendre comment les fluctuations primordiales de densité se sont formées à partir de l'excitation des fluctuations quantiques du vide par instabilité gravitationnelle, fait l'objet d'une

dynamique de recherche très intense qui doit beaucoup aux équipes de physique théorique françaises.

De même, les théories de la gravitation modifiée ont été introduites pour rendre compte de l'expansion accélérée récente de l'Univers, tout en servant d'outils pour paramétrer les déviations par rapport à la relativité générale dans l'infrarouge, en réponse aux tests cosmologiques croissants résultant de la grande quantité de données. Elles ont été au cœur d'une activité de recherche extrêmement dynamique qui a marqué la communauté à l'échelle internationale. Ce domaine de recherche continue à porter ses fruits, que ce soit à propos des théories massives de la gravitation ou encore des théories tenseur-scalaire, et il trouve aujourd'hui de nouvelles applications également dans la physique des ondes gravitationnelles.

Même si la recherche en physique théorique a toujours été entièrement libre et si elle ouvre des directions originales, inattendues et prometteuses pour répondre aux grandes questions encore ouvertes sur notre Univers (nature du Big Bang et cosmologie quantique, inflation et modèles alternatifs, énergie et matière noire, trous noirs, etc.), elle garde toujours un œil bien ouvert sur les grandes expériences (dans lesquelles certains théoriciens et théoriciennes sont concrètement impliqués) et se structure autour des grandes campagnes observationnelles. Étant donné la grande quantité de données attendues, cela sera encore vraisemblablement le cas dans les prochaines années.

La recherche en cosmologie théorique accompagnera également les missions de mesure du fond diffus cosmologique, telles que LiteBIRD, ainsi que les missions portant sur les structures à grande échelle, telles que Euclid et SKA. Ces missions visent à déterminer de manière encore plus précise les paramètres cosmologiques, à mesurer la masse des neutrinos, à comprendre la nature de l'énergie sombre, et à tester la relativité générale à grande échelle. Elles fourniront également des contraintes sur les fluctuations primordiales, notamment les non-Gaussianités. Pour

cette raison, la recherche théorique sur la modélisation des structures à grande échelle, en particulier dans le régime non-linéaire où réside une grande partie de l'information cosmologique, est un domaine très actif au sein de la communauté. Cela se fait à la fois à travers des méthodes analytiques et des simulations numériques. Les résultats de ces expériences sont attendus à plus long terme, mais ils auront un impact profond sur divers domaines, ce qui implique la nécessité de se préparer au mieux en développant en France les compétences requises.

## D. Gravitation

Les équipes théoriques françaises ont toujours eu un rôle de premier plan dans la recherche en gravitation. Ces dernières années, elles ont apporté d'importantes contributions d'envergure internationale en astrophysique relativiste, ainsi que dans la physique et l'astrophysique des ondes gravitationnelles. Ces dernières ont généré une activité intense, motivée par leur potentiel à explorer l'Univers de manière inédite, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives en astrophysique, cosmologie et physique fondamentale.

La contribution de la France à la modélisation de l'émission d'ondes gravitationnelles par les binaires d'objets compacts a été essentielle dans les découvertes de LIGO/Virgo. Cette expertise exceptionnelle couvre un large éventail de méthodes, telles que le développement post-newtonien traditionnel, l'approche *effective one-body*, et, plus récemment, les calculs des amplitudes de diffusion et des théories effectives. Ces recherches revêtent une importance capitale pour les calculs des formes d'ondes et l'interprétation des détections réalisées par les observatoires terrestres et spatiaux.

La France s'investit considérablement dans la préparation théorique à l'interprétation des futures détections. Les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs supermassifs fourniront des informations essentielles sur la

formation des galaxies. En les utilisant comme des « sirènes standard » ou en les associant à des relevés cosmologiques, elles permettront de mesurer l'expansion de l'Univers à des décalages vers le rouge très élevés. Parallèlement, la recherche sur le fond stochastique des ondes gravitationnelles, qu'elles proviennent de sources astrophysiques ou de l'Univers primordial, connaît une effervescence croissante, notamment depuis les récentes détections du fond stochastique d'ondes gravitationnelles grâce au réseau de pulsars millisecondes.

L'analyse des signaux multimessagers, qui combine les détections d'ondes gravitationnelles avec celles des neutrinos, des rayonnements cosmiques et lumineux, offre une vision plus complète de l'Univers, et la France s'engage pleinement dans ce domaine. Les signaux résultant de la fusion d'étoiles à neutrons offrent un terrain unique pour explorer la physique nucléaire et la chromodynamique quantique. Simultanément, une multitude d'autres sources de nouvelles formes d'ondes gravitationnelles, telles que les ondes continues et les sursauts gravitationnels, sont attendues. Chacune de ces sources ouvre une fenêtre unique sur des phénomènes cosmiques potentiellement inexplorés.

L'exploration des champs gravitationnels forts, que ce soit par le biais de l'interférométrie à très longue base ou en observant les ondes gravitationnelles émises par des binaires de rapport de masse extrême et les modes de vibration des trous noirs dans la phase post-fusion, offre des opportunités uniques pour tester la relativité générale, examiner le théorème de non-existence des « cheveux », sonder l'existence et la nature de l'horizon ainsi que d'autres objets compacts exotiques. Il est essentiel de maintenir une expertise théorique de premier ordre dans ces domaines, y compris dans le domaine en constante évolution de la relativité numérique, qui offre une approche complémentaire à l'analyse traditionnelle.

Compte tenu de l'importance croissante de la physique gravitationnelle, en prévision des futures données et des implications significatives qu'elles pourraient avoir, il est impératif de

préserver l'excellence de la France dans cette discipline.

## E. Théorie des cordes

La théorie des cordes est la voie la plus développée pour quantifier la gravité, permettant en même temps de l'unifier avec les autres forces. Dans la théorie des cordes, les particules fondamentales ainsi que les médiateurs des forces correspondent à des excitations d'un objet fondamental unidimensionnel étendu, la corde. À basse énergie, la dynamique de la corde est décrite par des théories des champs qui englobent à la fois la relativité générale et les théories de jauge. La structure de la théorie est exceptionnellement riche, combinant un large éventail d'idées physiques et mathématiques.

### 1. Dualités

Les relations de symétrie (dualités) entre différents types de théories des cordes et l'existence d'objets étendus (D-branes) ont facilité la découverte de nombreuses relations, certaines spectaculairement inattendues, entre ce qu'on croyait être différentes théories. Leur étude a révélé des liens profonds avec la géométrie algébrique et énumérative d'une part et a permis l'exploration de nouvelles structures intégrables. L'exemple le plus frappant de dualité dans la théorie des cordes est la correspondance holographique, reliant une théorie des cordes à une théorie purement de jauge sans gravité (plus de détails ci-dessous).

### 2. Trous noirs

L'origine microscopique de l'entropie des trous noirs est une question centrale dans toute théorie de la gravité quantique. Une réalisation importante de la théorie des cordes a été la détermination de l'entropie en termes d'états de D-branes, grâce à des résultats avancés en géométrie algébrique et en théorie des

nombres, en particulier pour les trous noirs supersymétriques dans l'espace plat. L'extension de cette méthode aux trous noirs non supersymétriques reste un problème ouvert et actif dans la communauté française.

### 3. Paysage de la théorie des cordes

Une autre question fondamentale dans laquelle la communauté française est très impliquée est la classification du paysage des vides dans la théorie après la réduction des dimensions supplémentaires par la compactification. Les propriétés des variétés de compactification sont essentielles à la dualité holographique et à toute application phénoménologique de la théorie. Leur étude nécessite tantôt des techniques sophistiquées en géométrie différentielle et algébrique, tantôt des outils de théorie effective des champs. Les vides avec des constantes cosmologiques négatives et leurs actions effectives correspondantes, étudiées récemment dans la communauté française en s'appuyant sur des nouveaux outils mathématiques comme la géométrie généralisée et les symétries généralisées, ont des applications intéressantes en holographie. Cependant, la construction des modèles non supersymétriques, et en outre avec une constante cosmologique positive (de Sitter) est encore plus difficile et débattue, la communauté française étant pionnière à lancer le débat.

## F. Autres approches à la gravité quantique

### 1. Holographie

L'idée de l'holographie remonte à la constatation par Bekenstein et Hawking que l'entropie des trous noirs est proportionnelle à l'aire de l'horizon, suggérant que le maximum d'information pouvant être stocké dans un volume d'espace-temps est proportionnel à l'aire de la région entourant ce volume. La gravité quantique en quelque sorte n'utilise pas la dimension qui crée le volume. Ces idées sont restées

au rang d'intuitions jusqu'à l'implémentation précise en théorie des cordes de la dualité AdS/CFT, qui avance que des théories conformes, sans gravité, définies dans un espace-temps plat en  $d$ -dimensions, sont duales (au sens de la mécanique quantique) à des théories de gravité quantique dans un espace-temps de courbure négative, dit anti-de Sitter, en  $d+1$  dimensions.

Aujourd'hui, ce domaine a atteint une grande maturité scientifique et donné lieu à de nombreuses avancées importantes. Il va de pair avec le développement de la compréhension des théories conformes, et l'interaction avec le programme du marécage ou *swampland* (cf. point précédent sur le paysage de la théorie des cordes), donne aussi des directions de recherche tout à fait intéressantes. Quelques-unes des principales directions de recherche récentes, poursuivies par la communauté française, concernent le développement de la dualité : l'étendre à d'autres théories, dimensions, preuves et vérifications plus poussées, comprendre les vides avec et sans supersymétrie (lien avec *swampland*), l'holographie dans l'espace plat (cf. l'holographie céleste), l'holographie en plus basses dimensions, liens avec les modèles SYK, chaos quantique, somme sur les topologies, la gravité quantique en 3 dimensions, l'émergence de la géométrie *via* l'entropie d'intrication, paradoxe de l'information, etc.

### 2. Gravitation quantique à boucles

La gravitation quantique à boucles et les modèles de matrices et de tenseurs aléatoires sont toujours étudiés en France. L'idée de base de ces approches, est de tenter de quantifier la gravitation sans se référer à un espace ou une métrique particulière dite de fond, et chercher à voir émerger une description semi-classique de la gravité (un espace-temps dans lequel la physique à basse énergie existe) depuis une structure quantique géométrique fondamentale. La gravité à boucles se base principalement sur des objets mathématiques appelés mousses et réseaux de spin. Elle n'a pas encore abouti à une théorie définitive. Certains membres de cette communauté se sont tournés, ces dernières

années, vers l'étude d'aspects plus phénoménologiques en lien avec la cosmologie ou l'astrophysique, et semblent s'intéresser récemment à l'étude des symétries asymptotiques.

### 3. Modèles de matrices et de tenseurs aléatoires

En parallèle, les modèles de matrices et de tenseurs aléatoires proposent une somme sur les géométries de l'espace-temps pondérées par la courbure. Dans le cas des matrices il s'agit de gravité quantique à deux dimensions. Les travaux des dernières années utilisent des outils de combinatoire pour contrôler la métrique et ont achevé d'établir l'équivalence rigoureuse entre modèles de matrices et théorie de Liouville. La récurrence topologique d'Eynard-Orantin, dont le champ d'action s'est beaucoup élargi, permet le calcul d'invariants topologiques importants à la fois en mathématique et en physique. Des liens intéressants avec la gravité quantique en 3D sont en train d'être découverts.

L'étude des modèles de tenseurs, qui étendent en rang plus élevé la notion de matrices aléatoires, a été relancée à partir des années 2010 par la découverte de leur limite analytique de grande taille, dite melonique. En 2015 cette même limite s'est indépendamment révélée être la clé de la solution du modèle de Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) qui est une théorie presque conforme à une dimension saturant la borne de chaos maximal, donc un modèle holographique de trou noir quantique en espace anti-de Sitter à deux dimensions. La relation entre le modèle SYK et les modèles de tenseurs, proposée par Witten dès 2016, reste à approfondir et élucider. Il est cependant déjà acquis que les modèles de tenseurs fournissent des nouveaux exemples de théories conformes explicitement solubles.

### 4. Holographie céleste et symétries asymptotiques

Une autre approche à la gravité quantique est l'holographie céleste. Elle remonte aux

idées de Penrose sur l'espace-temps et les « twisteurs », et à celles de Bondi, Metzner et Sachs (BMS) sur les symétries asymptotiques. Il s'agit de constater que la structure asymptotique de l'espace-temps plat contient une sphère à l'infini lumière et que les champs d'espace-temps peuvent être alternativement décrits par des variables cinématiques sur cette sphère. La question principale de ce domaine est de déterminer si une théorie conforme locale existe dont la dynamique permettrait de comprendre certains aspects de la gravité quantique dans l'espace-temps. Pour l'instant les propriétés d'une telle CFT paraissent exotiques (non unitaire, possiblement non associative, fonctions de corrélations possédant des singularités atypiques, etc.). Des membres de la communauté française se sont récemment penchés sur ces questions en utilisant des méthodes rigoureuses des théories conformes, dont on espère qu'elles permettront enfin d'asseoir ou de démontrer l'incohérence de l'holographie céleste.

## G. Théories quantiques des champs et théories conformes

La théorie quantique des champs est la *lingua franca* de la physique théorique. Dans ce bref rapport, nous nous concentrerons sur les sous-domaines de ce vaste sujet qui connaissent les développements les plus intéressants en ce moment, et en particulier sur ceux qui demeurent sous-développés en France.

### 1. Théorie de perturbation pour les amplitudes de diffusion

L'art d'évaluer les amplitudes de diffusion, en poussant à des ordres de la théorie de perturbation de plus en plus élevés, reste un domaine actif. Du côté théorique, la quête des ordres plus élevés s'accompagne de la compréhension de structures mathématiques plus profondes des expansions perturbatives

(géométrie positive de Grassmann, polylogarithmes, valeurs zêta multiples). Du côté phénoménologique, cette quête est motivée par l'amélioration de la précision de l'expansion perturbative des exposants critiques (l'expansion epsilon de Wilson-Fisher) et des sections efficaces de diffusion observées dans les accélérateurs de physique des particules tels que le LHC. Un nouveau lien phénoménologique concerne les calculs des observables des ondes gravitationnelles lors d'événements de fusion de trous noirs. Le succès de l'application des méthodes d'amplitudes de diffusion à ce problème témoigne de la puissance de l'approche de la physique théorique fondamentale. Les méthodes utilisées proviennent d'une part de méthodes qui avaient un intérêt pratique (physique de précision au LHC), mais aussi pour une grande part d'un domaine qui est resté purement académique pendant des années. En effet, en parallèle des méthodes d'amplitudes de diffusion pour les théories de jauge, des groupes de chercheurs et de chercheuses ont développé des méthodes pour les amplitudes de diffusion en gravité. Celles-ci n'avaient à l'origine d'autre finalité que de comprendre les divergences ultraviolettes de la gravité quantique à hauts ordres en boucles (en fait pour les théories de supergravité). Question purement académique, car au-delà de la non-renormalisabilité quantique de ces théories, on sait que non-perturbativement elles ne peuvent fonctionner (trous noirs sans horizon, etc.) C'est seulement une décennie plus tard exactement que l'on s'est rendu compte de leur applicabilité à un problème concret, les ondes gravitationnelles, et les développements ont suivi. Dans une approche sur projet, cette percée n'aurait pas pu avoir lieu.

## 2. *Bootstrap* non-perturbatif de la matrice S

Il s'agit d'une technique ancienne mais en plein renouvellement, sous-représentée en France, visant à trouver les amplitudes de diffusion des théories fortement couplées, en combinant des contraintes d'unitarité, d'invariance lorentzienne et d'analyticité. Elle a des

liens avec la physique des particules, où elle s'applique à la compréhension de la diffusion des hadrons, et avec la gravité quantique et la théorie des cordes, car la diffusion des gravitons et des excitations de cordes obéit aux mêmes axiomes.

## 3. Théories des champs conformes

Les théories des champs conformes (CFT) forment un sous-ensemble de théories quantiques des champs caractérisées par une symétrie étendue (invariance conforme), ce qui les rend plus faciles à résoudre. Les CFT jouent le rôle de repères dans le paysage de toutes les théories quantiques des champs, car une théorie quantique des champs générale peut être comprise en termes d'un flot de groupe de renormalisation émergeant à de courtes distances d'une CFT. De plus, la symétrie conforme émerge souvent à de longues distances, comme lorsqu'on a un point fixe du groupe de renormalisation décrivant une transition de phase du second ordre. Enfin, les CFT bidimensionnelles jouent un rôle dans la construction de modèles de la théorie des cordes. Ces raisons ont fait de l'étude des CFT un sujet d'un grand intérêt en physique théorique. Au cours de la dernière décennie, des progrès importants ont été réalisés dans la compréhension des CFT en plus de deux dimensions, en utilisant les conditions de consistence satisfaites par de telles théories (le *bootstrap* conforme). Du côté numérique, il est devenu possible de contraindre étroitement de nombreuses CFT fortement couplées, telles que celles décrivant la transition de phase du modèle d'Ising tridimensionnel. Du côté analytique, des progrès constants ont été réalisés dans la compréhension de la structure du spectre en utilisant les idées de la théorie Regge conforme, et en combinant les dimensions d'opérateurs et les constantes de structure de la théorie dans une seule fonction analytique. Dans le domaine des CFT bidimensionnelles, une attention particulière est accordée aux propriétés chaotiques du spectre d'opérateurs à grande dimension d'échelle.

#### 4. Symétries généralisées et non inversibles

Ce domaine, sous-représenté en France, a connu un développement explosif ailleurs. Il s'agit d'un programme ambitieux visant à moderniser le concept même de symétrie au-delà des symétries de groupe remontant aux origines de la mécanique quantique, il a donné des applications intéressantes à la compréhension du diagramme de phase des théories quantiques des champs. Il a des liens profonds avec des idées développées en physique de la matière condensée telles que les phases topologiques, les théorèmes de type Lieb-Schultz-Mattis et les états quantiques de cicatrices (*quantum scars*).

## H. Phases topologiques de la matière

Un domaine très actif en physique théorique (notamment en matière condensée) est celui des phases topologiques. Il s'agit en particulier d'étudier des phases qui, à première vue, ne sont pas décrites par la brisure spontanée d'une symétrie (voir néanmoins les symétries généralisées). On distingue deux types de phases topologiques : d'une part, les bandes topologiques (c'est à dire, les phases topologiques à la Thouless ou entières) et d'autre part, l'ordre topologique (c'est-à-dire, les phases topologiques à la Wen ou fractionnaires). Malgré leur similarité (absence de brisure de symétrie à la Landau), il existe de profondes différences entre ces deux types de phase : modes de bords gapless robustes (correspondance bord-volume) dans le premier cas uniquement, rôle essentiel de l'intrication quantique à longue portée dans le deuxième. En conséquence, de nombreuses phases topologiques entières ont été découvertes aussi dans des systèmes classiques (systèmes hydrodynamiques ou mécaniques, matière active, etc.) alors que les phases topologiques fractionnaires sont spécifiques des systèmes quantiques.

### 1. Bandes topologiques

Les bandes topologiques sont des descendants de l'effet Hall quantique entier découvert en 1980. À la suite de Thouless et de Haldane, ce domaine a explosé avec les travaux de Kane et Mele en 2005 sur le graphène avec couplage spin-orbite. Les états propres d'une bande topologique sont « twistés », ce qui se caractérise par un invariant topologique (par exemple, le nombre de Chern) obtenu comme l'intégrale sur la zone de Brillouin d'une courbure de Berry. Cette caractérisation topologique s'étend des isolants de bande aux supraconducteurs dans leur description de champ moyen à la Bogoliubov-de Gennes, et aux semi-métaux (de Weyl ou Dirac). Les recherches sur les bandes topologiques se basent aussi sur la théorie des groupes pour classifier les invariants topologiques, et leur substituer des marqueurs plus aisément calculables (représentation de bande élémentaire, ou marqueurs topologiques dans l'espace réel), en faisant le lien avec la chimie quantique.

### 2. Ordre topologique

L'ordre topologique a été proposé suite à la découverte expérimentale de l'effet Hall quantique fractionnaire (EHQF) en 1982. Il est caractérisé par une dégénérescence robuste de l'état fondamental d'un liquide quantique incompressible dépendant de la topologie de la surface sur laquelle le système est défini, et par la présence de quasi-particules fractionnaires appelées anyons. La description théorique de l'ordre topologique nécessite des développements en mathématiques comme les catégories de fusion et les symétries généralisées impliquant des formes différentielles d'ordre supérieur. L'EHQF suppose la présence d'un fort champ magnétique, mais des phases équivalentes, les isolants de Chern fractionnaires, peuvent émerger en son absence grâce aux propriétés intrinsèques de certains matériaux bidimensionnels (par exemple, les hétérostructures van der Waals). Les supraconducteurs usuels présentent également de l'ordre

topologique, de même que les liquides de spin quantiques avec gap (cf. paragraphe sur le magnétisme frustré). La réalisation de l'ordre topologique dans les systèmes artificiels est un enjeu actuel des simulateurs quantiques : elle se base sur la simulation de modèles jouets (tels que le code torique ou les *string-nets*) avec des réseaux de qubits supraconducteurs, de polaritons ou encore des gaz d'atomes froids piégés dans des réseaux optiques. Ces modèles jouets sont des cousins proches des théories de jauge sur réseau étudiées en physique des particules ou encore des réseaux de spin étudiés en gravité quantique. De plus, la description effective de basse énergie d'une phase à ordre topologique se fait par une théorie topologique des champs (TQFT).

### 3. Magnétisme frustré et liquides de spins

Ce domaine se situe à l'intersection de l'ordre topologique et des matériaux quantiques. On attend différents types de liquides de spins quantiques, qui peuvent émerger à partir d'interactions antiferromagnétiques sur un réseau bidimensionnel (comme le réseau kagomé de l'herbertsmithite). Les liquides de spin avec un gap présentent de l'ordre topologique. Par exemple, le liquide RVB correspond à des liens de valence résonnants de courte portée. Il existe également une version chirale du liquide quantique de spin, par exemple dans le modèle de Kitaev sur nid d'abeille, dont la physique est très proche de celle d'un supraconducteur topologique de type  $px + i py$ , et qui pourrait être réalisé dans les matériaux comme l' $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$ , les iridates ou les vanadates. Des modes zéro de Majorana (MZM) pourraient émerger dans ces systèmes, et auraient un comportement de type anyons non-Abéliens d'Ising. Les liquides de spin sans gap existent également, soit avec une surface de Fermi émergente (métal de spin), soit avec des points de Dirac (liquide de spin critique avec des corrélations algébriques). À trois dimensions d'espace, notamment sur le réseau pyrochlore, il y a la possibilité de glaces de spin qui font apparaître des monopôles magnétiques déconfinés (dans le titanate

d'holmium ou de dysprosium). Dans sa version quantique, le modèle de glace de spin prédit l'existence d'un photon émergent.

## I. Matériaux quantiques et émergence

Proche du zéro absolu de température, les importantes fluctuations quantiques donnent lieu à une grande variété d'organisation des électrons dans les solides. Les recherches actuelles sur les matériaux quantiques se concentrent sur des états exotiques tels que la supraconductivité à haute  $T_c$  (température critique), le magnétisme, la criticalité quantique, ou encore l'ordre topologique. Les interactions entre électrons y jouent un rôle prépondérant, qui associe la compréhension de ces systèmes à celle d'un problème quantique à N-corps.

### 1. Supraconducteurs à haute $T_c$

Certains supraconducteurs ont une  $T_c$  trop haute pour permettre une interprétation par la théorie usuelle Bardeen-Cooper-Schrieffer BCS de couplage électron-phonon. Ils sont observés dans divers matériaux (cuprates, matériaux à base de fer). Le mécanisme microscopique conduisant à l'appariement d'électrons reste une question ouverte, et un sujet actif de recherche. Dans les cuprates, la phase supraconductrice serait obtenue par dopage d'un isolant de Mott antiferromagnétique, dans le cadre du modèle de Hubbard bidimensionnel. Ce modèle permettrait de réunir de nombreuses observations expérimentales, telles que la phase pseudo-gap, celle de métal étrange, et permet en outre la description de la transition métal-isolant. Bien qu'il soit paradigmatique, la validité du modèle de Hubbard pour décrire les matériaux quantiques reste débattue. D'autres supraconducteurs (à base d'hydrogène) ont des  $T_c$  qui peuvent approcher l'ambiante mais sous très fortes pressions et en raison de l'augmentation de la densité d'états au niveau de Fermi.

## 2. Magnétisme

Le magnétisme est également associé au modèle de Hubbard, dans la mesure où le modèle d'Heisenberg émerge grâce à l'énergie cinétique résiduelle des électrons dans un isolant de Mott. Dans le cas d'une frustration géométrique, l'ordre magnétique à longue portée peut être remplacé par une phase de liquide de spin décrite par une théorie de jauge émergente (cf. paragraphe sur le magnétisme frustré dans la section phases topologiques).

## 3. Criticalité quantique

La criticalité quantique inclut divers phénomènes dont les fonctions de corrélation décroissent algébriquement. Par exemple, les transitions de phase du second ordre, comme certaines transitions métal-isolant, ou certaines transitions entre ordres magnétiques, peuvent être décrites par des théories des champs quantiques. Les métaux étranges sont un exemple de phase métallique dont les coefficients de transport ont une dépendance inhabituelle avec la température – en dépit de la proposition de nombreux modèles microscopiques, leur origine reste débattue. Les mécanismes de transport dans les bandes plates (par exemple, dans le matériau kagomé FeSn), ou dans les matériaux de type fermions lourds constituent d'autres directions de recherche actives des métaux fortement corrélés.

Quel que soit le type de phases considéré, le domaine des matériaux quantiques progresse grâce à une combinaison d'avancées conceptuelles, algorithmiques, et expérimentales. Les méthodes numériques *ab initio* permettent l'élaboration de modèles décrivant au plus près les matériaux. Les avancées algorithmiques (groupe de renormalisation de la matrice densité, réseaux de tenseurs, théorie du champ moyen dynamique, Monte Carlo diagrammatique) permettent une résolution de plus en plus précise de ces modèles, étant donné la quasi-inexistence de modèles exactement solubles (les modèles de Kitaev et de Sachdev-Ye-Kitaev étant deux exceptions

notables, mais peu réalistes). Les approches analytiques phénoménologiques permettent de proposer des mécanismes microscopiques d'émergence des propriétés macroscopiques, dont il faut explorer les conséquences expérimentales, afin de fournir des signatures vérifiables. Les plateformes de simulation quantique (atomes froids, circuits de qubits à l'état solide, etc.) jouent également un rôle important, car elles permettent de réaliser des modèles simplifiés et contrôlés, et d'accéder à des observables mieux résolues dans le temps et l'espace. Enfin, les hétéro-structures formées par empilement de couches atomiques de matériaux bidimensionnels, tels que le bicouche de graphène tourné, ou les bicouches tournées de dichalcogénure de métaux de transition, sont un domaine en plein essor. Ces systèmes constituent un intermédiaire entre les matériaux quantiques traditionnels et les simulateurs quantiques, et stimulent des progrès importants dans ce domaine, grâce à la réalisation de phases supraconductrices, topologiques, et de métaux fortement corrélés.

## J. Simulation quantique et systèmes synthétiques

### 1. Simulation quantique

La simulation analogue quantique décrit et guide la conception de l'ensemble des plateformes expérimentales fondées sur le contrôle de systèmes quantiques élémentaires (atomes froids, qubits supraconducteurs, atomes de Rydberg, ions piégés, excitons-polaritons, cavité électromagnétique, moirés dans les bicouches d'hétéro-structures van der Waals, etc.) et donne accès à une grande variété de systèmes synthétiques ou artificiels. Ce domaine, porté par de nombreux succès expérimentaux et un cadre théorique large qui lui permet de faire se rencontrer des communautés très diverses, trouve sa prolifération dans les innombrables configurations et protocoles que les physiciens et les physiciennes peuvent imaginer. On peut citer les récentes avancées dans

les réseaux hyperboliques qui permettent de s'affranchir des limites du plan euclidien et d'étudier, par exemple, un pavage régulier d'heptagones (ce qui est impossible dans le plan), ou encore les quasi-cristaux artificiels obtenus *via* des moirés dans des bicouches tournées de graphène.

## 2. Information quantique

Le cadre théorique est celui de l'information quantique, qui mêle des finalités technologiques à des concepts fondamentaux. La perspective de réalisation puis d'utilisation d'un ordinateur quantique a rejoint la plupart des problématiques essentielles du problème à N-corps habituellement circonscrit à la physique du solide. Ce lien se renforce à mesure que les plateformes ciblent la simulation analogue aux dépens de l'ordinateur quantique. La ressource quantique utile reste l'intrication. L'analogie de certains problèmes algorithmiques avec des processus physiques autorise néanmoins à imaginer des applications au-delà de la simulation de systèmes physiques. La tendance actuelle consiste à vouloir passer de la simulation quantique au solveur quantique, c'est à dire, au système artificiel capable de résoudre expérimentalement un problème trop difficile pour être traité numériquement sur un ordinateur classique (si la suprématie quantique a déjà été atteinte ou non est actuellement l'objet de controverses). On parle également d'ère du NISQ (*noisy intermediate-scale quantum*) pour décrire l'état actuel de systèmes formés d'une centaine de qubits avec du bruit, une fidélité limitée, mais néanmoins la perspective d'être déjà utiles pour quelques applications spécifiques.

Dans ce contexte, les effets dissipatifs et l'étude de systèmes ouverts à N-corps a révélé une physique riche et contre-intuitive, là où seul un rôle délétère était envisagé. Un autre exemple est celui du développement parallèle mais fécond de la compréhension du rôle de la topologie dans le problème à N-corps (cf. section phases topologiques). Par exemple, plusieurs réalisations artificielles de modèles jouets d'ordre topologique tel que le

code de surface (version planaire du code torique) ont permis d'étudier la physique des anyons non-Abéliens à la base de la proposition de calcul quantique topologique. Ces systèmes sont au cœur de l'engouement pour la dynamique quantique hors d'équilibre (cf. la section dédiée).

Aujourd'hui, ce domaine a à la fois renouvelé et ouvert de très nombreux sujets, si bien qu'il est difficile de voir si cette dynamique buttera sur des limites technologiques ou un épuisement thématique. Elle devrait malgré tout se poursuivre dans les années à venir.

## K. Systèmes intégrables

Il est crucial de garder tout d'abord à l'esprit le caractère interdisciplinaire, et la nature carrefour de cette thématique, au sens où il existe des liens avec des problématiques de la physique des hautes énergies et celle des basses énergies : matière condensée, physique statistique, théories des cordes, mais également avec des domaines variés des mathématiques tels que l'algèbre, la géométrie ou l'analyse et les probabilités.

Dans le domaine des théories intégrables classiques et quantiques, on identifie un certain nombre de dynamiques de rupture. De nombreux domaines de la physique vont pouvoir continuer à bénéficier de résultats exacts. Cela se fera notamment grâce au développement de nouvelles méthodes de résolution et à l'extension de l'intégrabilité à de nouveaux modèles. L'autre caractéristique, tout aussi importante, est que l'interdisciplinarité avec les mathématiques (groupes quantiques, probabilités, fonctions spéciales, etc.) se poursuivra en continuant à procurer un bénéfice mutuel à la physique et aux mathématiques.

Les points de développement identifiés depuis peu, et dont la communauté française est investie, comprennent :

- l'approche rigoureuse aux théories quantiques intégrables en 1+1 dimensions, par exemple les modèles sigma intégrables,

## Comité national de la recherche scientifique

- avec applications en théorie des cordes et en matière condensée ;
- l’universalité dans les modèles intégrables et le lien avec les probabilités : une grande révolution est en cours, soulignée par la médaille Fields décernée à Hugo Duminil-Copin, liée aux progrès récents sur la description rigoureuse des propriétés d’une transition de phase grâce à un mariage de techniques issues de l’intégrabilité et des probabilités ;
  - la compréhension des phénomènes hors d’équilibre, par l’étude paradigmatique de l’effet d’une brisure de l’intégrabilité sur l’évolution hors d’équilibre : thermodynamique hors équilibre, hydrodynamique généralisée, exemples intégrables/quasi-intégrables, modèles ASEP ;
  - l’extension aux modèles intégrables sur réseau en dimensions plus grandes que deux *via* une approche géométrique de l’intégrabilité et l’utilisation de la nouvelle méthode de séparation des variables quantique ;
  - le lien à la théorie des cordes/limites planaires : comprendre l’origine de l’intégrabilité dans la limite planaire des théories de jauge et construire une preuve de la correspondance AdS/CFT entre la théorie  $N=4$  SYM et la théorie des cordes  $AdS_5 \times S^5$  ;
  - les modèles intégrables et la physique en basses dimensions. On souligne la reformulation originale de problèmes fondamentaux de la physique des modèles  $Z_n$  de spins grâce au cadre des groupes quantiques à la racine  $-(n+1)$  de l’unité. On note aussi le rôle de nouvelles présentations des groupes quantiques dites « équitables » apparues en algèbre (Ito-Terwilliger-Weng) ;
  - la nouvelle approche de la méthode de séparation des variables quantiques (dédoublée de l’algèbre abélienne de ses charges) et son application à la dynamique (facteurs de forme et fonctions de corrélation) des modèles intégrables (application potentielle à des modèles intégrables ne pouvant pas être résolus par les techniques standards liées à l’ansatz de Bethe, application aux blocs conformes) ;

- les systèmes intégrables quantiques à  $N$ -corps et les fonctions spéciales (polynômes de Jack, Macdonald, Koornwinder, etc.) ;
- les nouvelles structures algébriques et analytiques et des aspects en lien avec les mathématiques : groupes quantiques, matrice  $R$ , structures algébriques générales des systèmes intégrables classiques et quantiques : déformations dynamiques, twists. Liens entre structures algébriques intégrables et structures algébriques conformes (algèbres  $q$ - $W$ ).

## L. Dynamique quantique et systèmes hors équilibres

Les recherches sur la dynamique des systèmes quantiques en équilibre et hors équilibre en France couvrent des sujets très variés, allant des aspects liés à la mécanique statistique quantique, à la matière condensée, la physique atomique, la théorie des champs ou encore les systèmes intégrables.

### 1. Trempes quantiques

Dans certains cas, le système est étudié de manière isolée et le protocole typique est celui d’une trempe quantique, c’est-à-dire le changement soudain de l’un des paramètres du modèle (c’est-à-dire, de l’Hamiltonien). Certaines des questions fondamentales abordées ici concernent l’étude de la thermalisation ou des états pré-thermiques. La construction et l’utilisation d’approches hydrodynamiques (théorie dite de l’hydrodynamique généralisée ou GHD) ont joué un rôle déterminant dans ce contexte.

### 2. Thermalisation quantique

Le phénomène de thermalisation (ou son absence) est connecté et abordé sous différentes perspectives, y compris l’effet des charges conservées, sa relation avec des aspects du comportement chaotique quantique ou l’influence du désordre trempé qui peut induire, avec des

interactions, des phases exotiques de la matière telles que la localisation à N-corps (phase dite MBL). Il existe également des brisures plus faibles de l'ergodicité comme les cicatrices quantiques à N-corps et la fragmentation de l'espace de Hilbert. Un cadre typique dans lequel la dynamique du système est étudiée de manière isolée est celui des gaz atomiques froids.

### 3. Systèmes quantiques ouverts

Un autre contexte dans lequel il est important de prendre en compte les effets hors équilibres est celui des systèmes quantiques ouverts, où la dynamique non unitaire est provoquée par le couplage à un bain thermique, un pilotage externe ou induite par des mesures. La dynamique est traitée soit dans un formalisme d'équation maîtresse de type Lindblad, soit dans une version plus approchée avec un Hamiltonien non-hermitien. Cette orientation est importante pour comprendre et quantifier le transport quantique et elle est cruciale pour le développement de l'information quantique et des techniques de calcul quantique.

### 4. Dynamique de l'intrication

Outre l'étude des observables physiques ou des coefficients de transport, une partie de la communauté s'est également concentrée sur la dynamique de l'intrication quantique qui a un impact important sur la caractérisation des différentes phases et des transitions de phase.

La richesse du sujet se manifeste également dans plusieurs techniques analytiques et numériques empruntées à ces domaines qui sont développées et utilisées dans différents centres de recherche en France pour traiter ces problématiques.

## M. Physique statistique hors équilibre

La recherche en France sur la théorie des systèmes classiques à corps multiples hors

d'équilibre a été caractérisée par l'application de techniques avancées de mécanique statistique et de calcul pour comprendre la dynamique complexe de ces systèmes. Les chercheurs et chercheuses de laboratoires français ont apporté des contributions substantielles à leur étude. En utilisant des outils tels que les processus stochastiques, la dynamique de Langevin et les simulations de Monte Carlo, ces recherches ont permis de découvrir de nombreux aspects de ces systèmes. De plus, des progrès significatifs ont été faits dans le développement de nouveaux cadres théoriques pour décrire l'émergence de modèles spatio-temporels complexes, de phénomènes de transport non triviaux et de structures et dynamiques vitreuses. Cette recherche permet non seulement d'approfondir notre compréhension des principes fondamentaux qui régissent les systèmes classiques à corps multiples, mais elle a également des implications potentielles pour des applications dans des domaines tels que la science des matériaux et la physique de la matière molle.

Voici quelques-uns des problèmes étudiés, organisés de la particule unique au grand nombre de corps :

- processus stochastiques : marches aléatoires et processus de diffusion, avec un accent particulier sur les applications aux problèmes biophysiques ;
- thermodynamique stochastique : pour étudier les systèmes microscopiques tels que les particules colloïdales, les biopolymères, les enzymes, les moteurs moléculaires, etc. ;
- phénomènes de transport : y compris la diffusion anormale, le transport dans les milieux désordonnés et l'émergence de modèles d'écoulement non triviaux ;
- transitions de phase hors équilibre : transitions de phase et phénomènes critiques qui se produisent dans des systèmes éloignés de l'équilibre thermique, tels que les systèmes diffusifs entraînés, la transition de désamorçage, etc. ;
- dynamique vitreuse : la relaxation lente et le comportement de vieillissement observés

dans les matériaux vitreux et les systèmes désordonnés, avec un accent sur le développement de cadres théoriques pour décrire ces phénomènes ;

- matière active : systèmes à N-corps inspirés de la biologie avec apport d'énergie à l'échelle microscopique, l'accent étant mis sur l'émergence de nouvelles phases et de comportements dynamiques ;
- matériaux granulaires : transition de blocage, écoulements granulaires et leur réponse aux perturbations externes ;
- informatique et optimisation : utilisation des outils des systèmes désordonnés pour étudier les problèmes d'optimisation difficiles et les réseaux neuronaux.

## **N. Systèmes dynamiques, physique non-linéaire et turbulence**

La France a une forte tradition où se mêlent approches de physique statistique et problèmes fondamentaux en mécanique des fluides, turbulence, sciences du climat et dynamiques non-linéaires, avec des expertises théoriques et expérimentales reconnues.

### **1. Turbulence d'onde**

Dans le cadre de la turbulence d'onde (où l'on considère une décomposition sous la forme d'ondes en interaction) la confrontation entre théories et expériences a été particulièrement fertile pour une grande variété d'ondes interagissant dans des fluides classiques (ondes internes, ondes capillaires, plaques tectoniques), ou quantiques (atomes froids, ondes gravitationnelles).

### **2. Turbulence**

Dans le cadre de la turbulence fluide pleinement développée, de nombreux progrès ont été

obtenus dans la description de l'anomalie dissipative, par l'analyse des processus de dissipation et des structures associées. Les expériences cryogéniques permettent d'identifier les mécanismes de cascades en modifiant les processus de transferts et de dissipation dans les cas quantiques et non quantiques. L'étude du lien entre bifurcations à grande échelle et les mécanismes turbulents à petite échelle (mécanismes de transferts à travers les échelles, cascade inverse, singularités, intermittence) a aussi été particulièrement fertile. La section 02 est un carrefour pour les approches formelles, pour la construction de champs aléatoires reproduisant la dynamique turbulente ou l'étude des propriétés mathématiques de la dynamique des fluides.

### **3. Climat**

Diverses méthodes de physique théorique ont permis des avancées importantes pour la paramétrisation des modèles du climat. La compréhension fine du transport des particules complexes (anisotropes, flexibles) par les écoulements turbulents inhomogènes est un enjeu déterminant qui a connu de nombreuses avancées, tout comme la compréhension du mélange turbulent, de la dynamique globale et à petite échelle des circulations océaniques et atmosphériques. La caractérisation des transitions entre attracteurs et la prévision des événements extrêmes du climat grâce à des méthodes de calcul rapides ont aussi connu un fort développement. Le lien entre échelles dans les modèles climatiques, rendu possible grâce aux nouvelles méthodes de calcul numérique rapides, permettent désormais une meilleure prévision des événements extrêmes.

### **4. Plasmas**

Dans le cadre des plasmas, l'émergence de plateformes expérimentales permettent désormais l'étude de processus astrophysique en laboratoire, fortement couplées avec des approches théoriques cinétiques et gyrocinétiques applicables aussi dans le cadre des plasmas pour la fusion.

## 5. Instabilités élastiques

L'approche physique des instabilités élastiques liées à la géométrie et à la topologie a connu un fort développement. Il faut souligner l'émergence des approches topologiques au-delà de la matière condensée, avec des travaux fondateurs pour la dynamique des fluides ou des propriétés mécaniques macroscopiques. Une ligne de recherche particulièrement active a été la génération et la compréhension de métamatériaux inspirés des pliages et des découpages. Les structures tissées et tressées attirent aujourd'hui beaucoup d'attention.

## O. Physique du vivant

L'objectif de la physique du vivant est de comprendre comment les sous-unités, des molécules jusqu'aux écosystèmes, se structurent et fonctionnent dans l'espace et le temps, en utilisant de l'énergie et en échangeant de l'information pour accomplir des fonctions biologiques. Les outils de la physique sont cruciaux pour comprendre le couplage entre la matière, l'énergie et l'information, permettant aux systèmes vivants de s'adapter à des changements de leur environnement. Les grands thèmes actuels de biophysique sont : l'organisation de la matière, la conversion et l'utilisation de l'énergie, le traitement de l'information, l'évolution et l'adaptation, le biomimétisme.

La physique hors équilibre s'applique aux matériaux vivants et permet d'interpréter des phénomènes biologiques. Un enjeu consiste à incorporer la consommation d'énergie locale dans des modèles hydrodynamiques pour prédire les écoulements internes (noyaux, cytosquelette) ou collectifs (morphogenèse) des cellules. La théorie des transitions de phase doit également être adaptée à la présence de sources locales d'énergie, notamment pour comprendre des récentes observations de séparation de phases liquide-liquide. Le couplage intrinsèque entre la matière physique de

l'information et son fonctionnement biochimique pose des défis.

Le concept d'information de la physique statistique donne un cadre théorique pour comprendre les notions de mémoire (neurosciences) et d'adaptation (évolution et immunité). Le traitement de l'information par le cerveau nécessite une compréhension globale basée sur la physique statistique hors équilibre, dans le cadre d'un nombre de neurones  $N$  très grand. De plus, aucun modèle physique théorique ne prédit les événements rares de mutation et de sélection des gènes, leur moment et leur probabilité d'apparition. Si les processus d'évolution se produisent dans un paysage multiparamétrique, ils dépendent aussi de l'histoire parcourue par les organismes. L'analyse massive des génomes et les expériences conduites sur des systèmes modèles de micro-organismes à croissance rapide, couplées à des modèles statistiques de génomique des populations *in vitro* et *in vivo*, vont faire progresser la compréhension de l'évolution, principe fondamental de la biologie.

Pour analyser ces grandes quantités de données produites, l'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée. Par exemple, il y a de nombreuses approches inspirées de la physique statistique pour la prédiction du repliement de protéines ; ces approches ont ouvert la voie au code d'intelligence artificielle AlphaFold, dont les prédictions ont révolutionné le domaine ; la physique statistique a un rôle à jouer pour comprendre la « déraisonnable efficacité » de cet outil.

Par ailleurs, les lois physiques peuvent contraindre les modèles statistiques (IA-hybride), notamment dans le cadre de l'inférence de modèles physiques.

## P. Inférence statistique et algorithmes

L'intelligence artificielle a eu un impact considérable sur la société, comme en

témoignent les progrès remarquables qu'elle a accomplis récemment dans divers domaines, tels que les modèles génératifs (ChatGPT) ou la reconnaissance d'images, et bien d'autres encore. Le lien entre la physique et l'apprentissage automatique est double. D'une part, l'apprentissage automatique est devenu puissant pour analyser les problèmes de physique. Par exemple, ces méthodes ont révélé l'évolution des trous noirs massifs en astrophysique ou ont été utilisées pour identifier les défauts dans les structures cristallines et amorphes. Inversement, les idées développées en physique peuvent nous aider à découvrir le mécanisme derrière les architectures d'apprentissage automatique, qui reste obscur. En France et à l'étranger, des physiciens ont appliqué des techniques théoriques issues de la physique statistique pour comprendre les modèles d'apprentissage automatique. Ces aspects comprennent l'analyse de la dynamique stochastique, la descente de gradient, la caractérisation des paysages énergétiques complexes, la structure des réseaux et les corrélations dans les données. Cette ligne de recherche intensive permet d'approfondir notre compréhension de l'apprentissage automatique et fournit des lignes directrices pour la conception de nouvelles architectures puissantes.

Le domaine de l'apprentissage automatique est étroitement lié à la conception et à la compréhension d'algorithmes efficaces qui sont au cœur de la physique informatique, comme l'échantillonnage de Monte Carlo. En France, l'accent est mis en permanence sur le développement d'algorithmes puissants, y compris les mises à jour intelligentes de Monte Carlo, l'échantillonnage efficace des événements rares, ainsi que les processus dynamiques artificiels violant la condition d'équilibre détaillé.

Récemment, le chevauchement entre les communautés de l'apprentissage automatique et de la physique computationnelle s'accroît rapidement, comme en témoignent les diverses conférences/ateliers organisés, dont les participants et participantes proviennent de divers domaines interdisciplinaires. Plusieurs

nouvelles méthodes d'échantillonnage de Monte Carlo pour les problèmes de physique, combinées à des techniques de réseaux neuronaux de pointe, ont été proposées d'une part. D'autre part, l'approche physique traditionnelle, telle que le groupe de renormalisation, est maintenant appliquée pour développer un nouvel algorithme d'apprentissage automatique. On peut donc s'attendre à ce que le lien étroit entre l'apprentissage automatique et la physique informatique continue à se renforcer, créant ainsi une synergie entre les deux communautés.

## Q. Méthodes et algorithmes pour le problème à N-corps

Le développement de méthodes algorithmiques et de codes optimisés accompagnent les progrès de l'étude quantique du problème à N-corps et plus généralement des systèmes quantiques depuis les années 80-90 et l'émergence des principales techniques : Monte Carlo quantique, diagonalisation exacte, DMFT (théorie du champ moyen dynamique) et DMRG (groupe de renormalisation de la matrice densité). Les approches numériques testent des propositions théoriques, permettent de proposer des protocoles expérimentaux ou d'en interpréter les résultats et font émerger de nouveaux concepts. Si la frontière de la puissance de calcul continue d'être repoussée, les progrès conceptuels récents ont contribué à améliorer la qualité des résultats mais aussi à étendre le spectre des applications.

### 1. Réseaux de tenseur

Les méthodes type réseaux de tenseurs, issues du DMRG et de l'information quantique reposent toutes sur la compression de la représentation de la fonction d'onde à travers une intrication contrôlée, afin de fournir un ansatz variationnel dont les paramètres sont optimisés. L'explosion de l'entropie d'intrication avec la dimension, la température ou le temps en

est la principale limitation. Leur utilisation pour les systèmes bidimensionnels est de plus en plus fiable, grâce à un espace variationnel qui couvre un nombre croissant de classes d'états à N-corps, y compris les plus exotiques. À une dimension d'espace, l'étude des trempe quantiques est devenue possible, permettant l'émergence de nouveaux champs d'étude en dynamique quantique hors d'équilibre. Ces avancées permettent également d'accompagner les progrès des simulateurs quantiques, moins fiables aux temps courts, mais seuls capables d'atteindre les temps longs.

## 2. Théorie du champ moyen dynamique

La DMFT consiste à remplacer le problème à N-corps quantique sur le réseau par un problème local, ou problème d'impureté sur un seul site, qui est plus facilement tractable. Cette méthode approxime la self-énergie sur le réseau par une grandeur locale, indépendante de la valeur du moment ; sa validité est donc en principe limitée aux réseaux à grande coordination. Actuellement, la DMFT permet des progrès dans la résolution du modèle de Hubbard bidimensionnel, ou la modélisation réaliste des matériaux quantiques fortement corrélés.

## 3. Monte Carlo quantique

Il existe une grande variété d'approches type Monte Carlo pour le quantique, que ce soit par échantillonnage d'états variationnels ou de fonction de partition, qui sont complémentaires et abordent assez naturellement les systèmes à grand nombre de sites et à température finie. Si la question du problème du signe (c'est-à-dire, la difficulté à traiter les systèmes de fermions ou de magnétisme quantique frustré) en limite toujours les applications, nous notons les importants développements récents du Monte Carlo diagrammatique qui échantillonne les diagrammes de Feynman, et contourne ce problème.

Les approches numériques, originellement organisées autour de groupes spécialisés, ont jeté des ponts entre elles et ce processus continue d'être fructueux. Au-delà de cette dynamique intrinsèque, la vague des méthodes d'apprentissage, associées aux problématiques générales d'optimisation et de représentation de larges données a suscité, comme dans beaucoup d'autres domaines, de nouvelles perspectives, concernant par exemple, la représentation des fonctions d'ondes à N-corps ou l'identification de phases quantiques après apprentissage sur un jeu de données numériques ou expérimentales.

## R. Science des réseaux

La physique statistique joue un rôle moteur dans le domaine des réseaux complexes, grâce à sa capacité à décrire et comprendre les structures et les dynamiques de systèmes composés d'éléments interconnectés menant à l'émergence de structures et phénomènes à différentes échelles.

Les réseaux complexes sont utilisés dans de nombreux domaines, allant de l'informatique à la biologie, en passant par les sciences sociales, la finance et l'épidémiologie. Ils ont permis de faire des avancées significatives dans la compréhension de phénomènes complexes, tels que la propagation de *fake news* ou les maladies infectieuses. Citons par exemple une application à l'évaluation des techniques de traçage lors de l'épidémie de Covid-19.

Les études de réseaux vont maintenant au-delà du cadre dans lequel les éléments du réseau sont seulement des nœuds et des liens. Les liens peuvent être pondérés, multiples, et même exister seulement par périodes. Ces derniers cas sont représentés respectivement par les réseaux multiplexes et temporels, pour lesquels de nombreux problèmes restent ouverts.

### III. Perspectives autour de la politique scientifique

Pour conclure ce rapport de conjoncture de la section 02, nous voudrions faire part de quelques réflexions sur le fonctionnement actuel de la recherche en physique théorique en France.

#### A. Financement sur projet

La politique générale mise en place depuis quelques décennies privilégie de plus en plus les financements sur projet, notamment à travers l'Agence nationale de la recherche (ANR) et le European Research Council (ERC) pour les sciences fondamentales. Concernant les demandes ERC, les sommes d'argent mises en jeu sont très importantes mais réparties de façon déséquilibrée (notamment pour des projets théoriques). Il existe heureusement des cas favorables où la personne lauréate joue collectivement et fait bénéficier tout son environnement (tout son laboratoire) de ses crédits. L'évolution vers ce type de financement rend le paysage financier de la communauté très déséquilibré. En ce sens, l'ANR représente l'instrument de financement naturel pour une grande fraction de la communauté. Malheureusement, on déplore un taux de réussite extrêmement bas, décourageant les chercheurs et chercheuses, et ce en particulier pour les appels blancs. Étant donné ce faible taux de succès, la lourdeur du processus ANR – comparable voire supérieure à une demande ERC – rend cette catégorie de demande doublement difficile. Il est également important de souligner que, dans la plupart des cas, la recherche en physique théorique n'est pas adaptée à des financements issus de sources privées. On note des exceptions – comme, par exemple, les technologies quantiques ou les études des systèmes complexes et des verres – mais la majeure partie des thèmes de recherche afférents à la section de physique théorique ne peuvent pas être financés autrement que sur

fonds publics. L'évolution de la politique et la dotation des financements par projets est un enjeu majeur pour la recherche en France et pour la section 02 en particulier. L'accès aux financements de montants modestes permettant de financer des projets naissants sur des durées de temps courtes est la clé de notre mode de fonctionnement. Le maintien des financements récurrents nous semble essentiel à cet égard, de même qu'un processus d'appel à projets à budgets plus faibles suivant un format simplifié et dynamique et, surtout, avec un taux de réussite compatible avec la production scientifique de notre communauté. D'autre part, il est inefficace de proposer des contrats postdoctoraux de moins de 2 ans, comme c'est fréquemment le cas en France.

#### B. Évaluation

Il y a une forme d'inflation de l'évaluation de l'activité des collègues (rapports à vague et à mi-vague, demandes de promotion, RIPEC-C3 mais aussi demandes de contrats, etc.). De plus, il existe un phénomène de balancier depuis une évaluation quantitative (bibliométrie, facteur h, google scholar, facteur d'impact, etc.) vers une évaluation qualitative mais moins sourcée (DORA, plus de possibilité d'avoir la liste complète des productions publications, etc.). En réalité, une évaluation en profondeur et de qualité devrait être similaire à une enquête policière où tous les indices sont utiles. Un exemple : publier peu est problématique, mais publier trop peut également l'être. De manière générale, il ne faut se priver d'aucune information et il est donc absurde d'exclure la liste complète des publications.

#### C. Évolution des thématiques de la section

Une comparaison entre le présent rapport et la situation de la section 02 il y a vingt ans montre un élargissement et/ou une intensification de son spectre remarquable dans plusieurs

directions comme la matière condensée et les systèmes quantiques, les réseaux de neurones, la biophysique, etc.

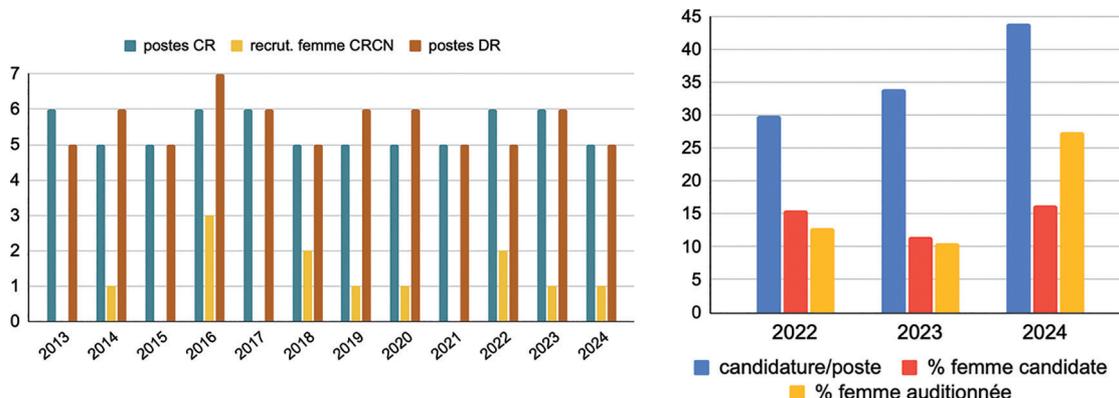
## D. Postes

Il y a une très forte pression sur les postes du concours chargée de recherche CRCN et sur ceux du concours DR2, et même pour les promotions, notamment vers DRCE1. La figure 4 montre typiquement de 30 à 40 candidates et candidats par poste CRCN. Le nombre de postes offerts depuis 10 ans est sensiblement constant mais certainement en dessous du seuil de renouvellement de l'effectif total (cf. partie I.C Ressources humaines). Cette pression peut être vue comme une force de notre section, car elle démontre à la fois l'intérêt des scientifiques (y compris à l'étranger), et elle garantit une grande qualité dans les embauches et les promotions. En même temps, il y a un effet de seuil au-dessus duquel la pression devient une menace : trop souvent, de bonnes candidates et de bons candidats s'auto-censurent et attendent avant de concourir, et des candidatures exceptionnelles ne peuvent pas être classées. La pression actuelle est vue comme bien au-dessus de ce seuil. Par ailleurs, fortement couplée à cette pression, l'absence cruelle de postes ouverts à l'université<sup>(1)</sup>, a des conséquences doublement néfastes : l'absence d'une véritable alternative au CNRS pour une

carrière dans la recherche en France, et même la mise en péril de l'enseignement et de la recherche en physique théorique. Notamment, de plus en plus de personnes au niveau doctoral et post-doctoral renoncent à embrasser ce domaine par manque de perspectives. Une récente évolution est l'apparition des chaires de professeur junior (CPJ) au CNRS et à l'université. Ces CPJ remplacent d'une certaine façon ce qui étaient les postes CR1, pour pouvoir aussi recruter des profils qui se sont révélés plus tardivement, par exemple, les chercheurs et chercheuses qui ont pris le temps de faire une réorientation thématique entre doctorat et postdoctorat. Ces postes CPJ sont attractifs mais risquent de nuire à la cohésion des laboratoires en offrant une promotion plus rapide au grade de DR2 que par la voie standard.

## E. Fonctionnement du Comité national

Nous pensons que le retour du mandat de 5 à 4 ans est une bonne chose. Cependant, en raison de la règle que l'évaluation des chercheurs et des chercheuses de rang A ne peut être confiée à des membres du Comité national de rang B, nous nous privons de nombreuses compétences et sommes obligés de travailler en formation restreintes quand il s'agit d'évaluer l'activité des collègues DR. La qualité de



**Figure 4 :** Nombre de postes aux concours et nombre de femmes recrutées par année (à gauche). Nombre total de candidats par poste et par année et pourcentage de candidates et de candidates auditionnées (à droite).

l'évaluation s'en ressent. Une possibilité serait d'autoriser les collègues de rang B à assister et à participer aux discussions même s'ils ne peuvent être officiellement rapporteurs ou rapporteuses. Enfin, les collègues femmes au CNRS et à l'université sont très fortement sollicitées pour participer aux comités d'évaluation, d'autant plus qu'elles sont peu nombreuses en physique théorique. Il ne faudrait pas que, sous couvert de parité, ce soit la double-peine pour les femmes qui se retrouvent dans tous les comités et sont entravées dans leur activité de recherche. Il est absurde d'exiger un taux de 40 % de femmes dans des comités quand la communauté n'en compte que 11 %. D'un côté, un taux moindre (de l'ordre de 25 %) serait raisonnable, et de l'autre, il faut être très attentif lors des évaluations à tenir compte des responsabilités institutionnelles prises.

## F. Parité

En section 02, nous sommes très loin de la parité dans le nombre d'hommes et de femmes avec seulement 11 % de femmes (cf. I.C Ressources humaines). Le pourcentage des femmes postulant au concours CRCN est en fait similaire mais légèrement supérieur, autour de 10-15 % (cf. figure 4). Une difficulté est que de nombreuses collègues sont (re)parties à l'étranger après quelques années au CNRS, du fait de leur qualité et de conditions souvent plus attractives en milieu de carrière. Nous sommes pleinement conscients de notre responsabilité dans les recrutements et promotions pour contribuer à redresser la situation. Jusqu'à présent, et grâce à des candidates de niveau scientifique exceptionnel, nous avons eu la chance de pouvoir établir un taux de recrutement et de promotion de femmes plutôt au-dessus de la moyenne de notre section : environ 20 % dans le concours CRCN. En perspective, augmenter la fraction de femmes dans notre section demande d'abord un encouragement aux femmes de tenter l'aventure de chercheuse en physique théorique. La forte pression sur les postes d'entrant au CNRS et à l'université est particulièrement néfaste pour la parité. L'évaluation tout au long de la carrière

et la compétition pour les promotions jusqu'à la retraite ajoutent des barrières et des leviers de discrimination additionnels pour celles et ceux impliqués dans la vie familiale.

## G. Recherche et changement climatique

Plusieurs laboratoires de la section 02 ont pris en main la question de l'impact de la recherche sur le changement climatique et les possibilités de réduire cet impact. Dans les spécificités de la physique théorique, il s'agit essentiellement des missions (et surtout celles en avion) et des calculs numériques. Certains laboratoires ont effectué un bilan des émissions de gaz à effet de serre et pris des mesures en assemblées générales. Toutes les missions ne contribuant pas également à la qualité de la recherche, leur rationalisation ne devrait pas impacter profondément l'excellence scientifique. De nombreux membres de la section 02 se disent sensibles aux enjeux environnementaux, certains participent à des activités d'enseignement, de vulgarisation et certains ont même orienté leur thématique de recherche. Ces enjeux sont évoqués par plusieurs candidates et candidats lors du concours CRCN. Le Comité national, dans sa manière d'évaluer les dossiers, a une responsabilité dans la nécessaire sobriété et devrait favoriser un usage raisonnable des ressources. De fait, à l'heure actuelle, le nombre de conférences ou de collaborations internationales, tout comme la bibliométrie, ne sont pas des facteurs déterminant dans les critères d'évaluation du CoNRS section 02. Cette dernière soutient en cela les propositions élaborées concernant l'évaluation et l'accompagnement des membres du CNRS par le groupe de travail intersection du CoNRS. Malgré tout, comme le discute le récent rapport de prospective CNRS Physique, les enjeux environnementaux vont prendre une place grandissante dans la conduite de la politique de recherche ainsi que des contraintes qui vont se poser aux laboratoires, directement ou indirectement. Il apparaît donc essentiel de poursuivre et d'amplifier les réflexions et les actions dans ce domaine.

## H. Soutien des enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs

Le CoNRS donne son avis sur les demandes des universitaires pour une délégation au CNRS. Un ou une universitaire en délégation au CNRS bénéficie d'un soutien significatif en termes de temps qui peut être consacré à la recherche. Ce gain de potentiel de recherche est considérable compte tenu du coût modeste engagé et le place dans une situation comparable à la charge d'enseignement des universitaires dans d'autres pays développés. La possibilité d'être en délégation peut favoriser l'intégration des universitaires nouvellement recrutés et garantir que les universitaires plus expérimentés puissent poursuivre leurs activités de recherche et développer de nouvelles lignes de recherche. En même temps, une délégation permet aux universitaires qui ont pris des responsabilités scientifiques pour le CNRS, tels que la direction de laboratoire ou la participation au CoNRS, d'accomplir ces fonctions sans impact négatif sur leur activité de recherche. Étant donné le coût relativement faible, nous pensons que le CNRS devrait augmenter les possibilités pour les universitaires ayant une activité de recherche d'être en délégation au CNRS. Souvent et par choix, les délégations au CNRS sont des délégations à mi-temps et sont renouvelées chaque année. Il serait judicieux d'attribuer automatiquement des délégations pour deux ans, sans besoin de demander le renouvellement de la délégation avant même qu'elle n'ait commencé. Dans le même temps, il convient de noter que dans certaines universités (par exemple, à Sorbonne Université *via* le dispositif dit ABER – Accord de binôme d'enseignement et de recherche), des chercheurs et des chercheuses du CNRS ont la possibilité d'effectuer des activités d'enseignement pour leurs collègues universitaires (sans être payés). Ils ou

elles bénéficient ainsi de la possibilité de transmettre leur expertise scientifique à la prochaine génération tout en renforçant la capacité de recherche de leur propre équipe de recherche.

## I. Pression bureaucratique

La bureaucratie ressentie par les chercheurs et chercheuses prend une place qui augmente de plus en plus, au point de devenir souvent prépondérante. Cette évolution, constante depuis longtemps, est nuisible à la recherche en général, et à celle de la section 02 en particulier. Les ingénieures, ingénieurs, techniciennes et techniciens (IT) des unités dépendant de la section 02 ont vu leurs tâches devenir d'année en année plus complexes et leurs charges s'accroître (voir récemment l'épisode du déploiement raté des logiciels Etamine-Notilus-Goelett censés simplifier les ordres de mission). La diversité des contrats (ANR, programmes européens etc.), leur hétérogénéité et leur complexité ont renforcé les besoins en gestion. Il en est de même pour les postes d'informaticien avec l'évolution incessante des outils. L'augmentation des contrats précaires, le non renouvellement des postes pérennes entraînent une perte massive des savoir-faire et compétences au sein des laboratoires. C'est une baisse d'efficacité et un coût trop élevé que ne peut se permettre le monde de la recherche. Un renforcement des effectifs de soutien à la recherche est nécessaire : une reconnaissance et une validation des acquis de l'expérience est indispensable pour motiver et stabiliser les IT très compétents dont la recherche a un besoin essentiel.

Pour terminer, nous voudrions remercier les collègues qui nous ont aidés dans la rédaction de certains des paragraphes de ce rapport. Elles et ils se reconnaîtront.

---

### Notes

(1) <https://cpesr.fr/lentree-dans-la-carriere-des-enseignants-chercheurs/>

