HAL
open science

Rapport de Prospectives du CSI-INP 2019-2023

Claudine Crépin, Erwan Paineau-Lanone, Noël Dimarcq, Laurence Ramos, Antoine Ronda, Gregory Abadias, Livia Bove, Anna Ceresole, Xavier Chaud, Jérôme Crassous, et al.

To cite this version:

Claudine Crépin, Erwan Paineau-Lanone, Noël Dimarcq, Laurence Ramos, Antoine Ronda, et al.. Rapport de Prospectives du CSI-INP 2019-2023. CoNRS. 2023. hal-04232515v3

HAL Id: hal-04232515

https://hal.science/hal-04232515v3

Submitted on 27 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CSI
INP

2023

RAPPORT DE PROSPECTIVE

CONSEIL SCIENTIFIQUE D'INSTITUT

Comité national de la recherche scientifique

COMITE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CSI INP
INSTITUT DE PHYSIQUE

Claudine CREPIN-GILBERT (présidente du CSI) ; Erwan PAINEAU-LANONE (secrétaire scientifique) ; Noël DIMARCQ (membre du bureau) ; Laurence RAMOS (membre du bureau) ; Antoine RONDA (membre du bureau) ; Grégory ABADIAS ; Livia BOVE ; Anna CERESOLE ; Xavier CHAUD ; Jérôme CRASSOUS ; Delphine DEBARRE ; Carine DOUARCHE ; Fabienne DUC ; Philippe DUGOURD ; Ivan FAVERO ; Stéphane FUSIL ; Vincent GARCIA ; Gert-Ludwig INGOLD ; Agnès MAITRE ; Yann MAMBRINI ; Philippe SINDZINGRE ; Sandro VAIENTI ; Stéphane VEZIAN ; Jean-Marc VICTOR

Anciens membres du CSI (année de départ) : Bénédicte WAROT-FONTROSE (2019) ; Cécile SYKES (2019) ; Samy MERABIA (2020) ; Olivier BUISSON (2020) ; Annick LESNE (2021) ; Mauro ANTEZZA (2021)

Table des matières

Bilan et rôle du CSI 4
Travaux du mandat 2019-2023, bilan du CSI 4
Propositions sur l'évolution du fonctionnement du CSI-INP 5
Préambule 7
I. Interactions fondamentales 8
1. Matière Noire et Univers primordial 8
2. Physique des particules 9
3. La théorie des cordes et holographie 10
4. La constante cosmologique, un problème transversal 10
5. Ondes gravitationnelles 11
6. La physique nucléaire et hadronique 11
II. Quantique 12
1. Technologies quantiques 12
Calcul et simulation quantique 12
Communications quantiques 13
Capteurs quantiques 13
2. Radio-fréquences quantiques 13
3. Atomes et gaz quantiques, molécules, métrologie 14
4. Simulations classiques des systèmes quantiques 14
5. Physique quantique et intelligence artificielle 14
III. Nouveaux matériaux 15
1. Energie 16
2. Électronique, nanomagnétisme et spintronique 17
Électronique 17
Magnétisme et spintronique 18
3. Matériaux 2D/ interfaces 18
IV. Conditions extrêmes 19
1. Hautes pressions 19
Quelques exemples 20
2. Physique des plasmas 21
3. Champs magnétiques intenses 23
V. Optique 24
1. Matériaux pour l'Optique 24
Nanomatériaux luminescents 24
Scintillateurs et cristaux grandes tailles 24
2. Lasers 24
Sources THz 25
Sciences attosecondes 25
3. Métrologie 25
4. Nano-Optique et ingénierie de l'interaction lumière matière 26
Sources actives en nanophotonique et plasmonique 26
Interaction nanomatériaux/lumière en nanophotonique et plasmonique 26
Interactions optiques à l'échelle nano : couplage fort et non linéaire 26
5. Imagerie 27
Imagerie pour le vivant 27
Imagerie multipixel de grande sensibilité et imagerie rapide 27
Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) 27
Optique en milieu diffusant 28
VI. Complexité 28
1. Matières complexes 28
Systèmes désordonnés 28

Auto-assemblage et auto-organisation 29
2. Interactions complexes 29
Architectures moléculaires 30
Propagation d'onde 31
Turbulences 31
3. Climat 32
VII. Physique et vivant 33
1. Visualiser, manipuler et quantifier le vivant 33
Aller vers le vivant 33
Complexification 34
2. Systèmes modèles pour l'expérimentation 34
Développer des modèles pertinents du vivant 34
Systèmes modèles pour la physique 35
3. Concepts et modèles théoriques 35
VIII. Intelligence artificielle, machine learning et données 37
1. Calcul neuromorphique et réseaux de neurones à impulsions 37
2. Réseaux de neurones informés par la physique (PINN) 38
IX. Infrastructures de recherche 39
1. Sources Synchrotrons 39
2. Sources de Neutrons 40
3. XFEL 41
4. Champs magnétiques intenses 41
5. Microscopie électronique 42
6. Laser intenses 43
X. Physique et société 44
ANNEXE 1 – Interdisciplinarité à l'étranger 47
1. Phase A – Enquête sur « L'interdisciplinarité à l'International » : stratégie et premiers pas 47
2. Phase B - Analyse des données en libre accès 48
3. Phase C – Bilan 49
ANNEXE 2 – Enquête concernant les IR* 50
ANNEXE 3 – Intelligence artificielle 52
ANNEXE 4 – Climat 54
ANNEXE 5 – Sciences Ouvertes 56
1. Pratiques de publication en Science Ouverte à l'INP 57
2. Pratiques des données ouvertes de la recherche à l'INP 58
ANNEXE 6 – Collectif Labos 1point5 58
ANNEXE 7 – Place des femmes en physique 60
ANNEXE 8 – Glossaire 62
ANNEXE 9 – Informations sur les figures 65

Bilan et rôle du CSI

Les principales missions des CSI sont définies sur le site du CoNRS par : « (1) *Le Conseil scientifique d'institut conseille et assiste par ses avis et ses recommandations le directeur de l'institut de manière prospective sur la pertinence et l'opportunité des projets et activités de l'institut. Pour aider le Conseil scientifique d'institut à assurer ses missions, des groupes de travail peuvent être constitués.* (2) *S'agissant des créations et suppressions d'unités, le Conseil scientifique d'institut est informé de l'ensemble des avis des sections et des positions des instituts. Il est consulté sur les points de divergences entre les avis des sections et les positions des instituts, constatés lors d'une réunion entre le directeur de l'institut, le président du Conseil scientifique de l'institut et les présidents de sections concernés par ces divergences.* ». Le premier point laisse beaucoup de liberté sur les travaux que le CSI peut entreprendre. Par ailleurs, son interprétation peut varier d'un Institut à l'autre. Le second point ne concerne (heureusement) qu'un nombre très faible de créations ou suppressions d'unités. A la date de juin 2023, le CSI n'a eu à traiter que deux cas de divergence. Le bilan des travaux (hors prospectives) menés par le CSI-INP est résumé ci-dessous. Des suggestions et souhaits sur l'évolution du rôle du CSI sont décrits en fin de ce chapitre introductif. Les autres chapitres constituent le rapport de prospective proprement dit.

Travaux du mandat 2019-2023, bilan du CSI

Les interactions du CSI avec la direction de l'INP sont suivies avec une présentation régulière des actualités de l'Institut par la ou le DI à chaque réunion plénière (cinq réunions par an). Le CSI interagit également très régulièrement avec les sections du CoNRS. Les président.e.s des sections 2, 3, 4, 5, 11 et de la CID 54 sont invité.e.s à chaque réunion et présentent au moins deux fois par an un résumé des sessions d'automne ou de printemps, ainsi que des concours. Le CSI garde ainsi une vision globale des questions scientifiques et institutionnelles en cours à l'INP. Les interactions avec le CS du CNRS ont été malheureusement beaucoup plus rares. Le CSI a eu une présentation des projets du CS en début de mandat et un bilan de leurs travaux à mi-mandat. Une discussion avec la présidente du CS est prévue en fin de mandat. Le rôle du CSI comme « intersection constructive » entre la direction de l'Institut, les sections et le CS est important pour la vie de l'Institut et pourrait être mieux exploité.

Les questions traitées par le CSI sont soit choisies par le CSI lui-même, soit suggérées par l'INP. Le début de mandat a été marqué par la mise en place de la LPR. Nous avons débattu sur les propositions à faire remonter pour intégrer la loi, puis sur les corrections à apporter, ainsi que sur les actions à mener pour une amélioration et/ou une suppression de certains points. Cela a conduit à plusieurs recommandations[1,2,3,4]. Le CSI reste vigilant sur le fonctionnement de la recherche en général et en Physique en particulier. Il a donné son avis sur les changements qui ont eu lieu dans le fonctionnement de l'HCERES[5], dans la diffusion des résultats des concours CNRS[6] ou plus récemment sur la question des collaborations avec la Russie[7]. Malgré son rôle officiel de conseil sur les projets de l'Institut, il n'a eu connaissance du texte de Contrat Objectif et Performance (COP 2019-2023) que très tardivement par rapport à sa parution et n'a pu que très peu influer sur son contenu. Cela a conduit à une recommandation[8].

Le CSI du mandat précédent avait entrepris une grande enquête sur le métier de chercheur, en particulier en lien avec la question des financements sur projet, auprès des personnels chercheurs et enseignants-chercheurs. Nous avons continué le dépouillement des réponses et produit un document résumant les résultats et les principales tendances[9]. Ce travail donne une image non seulement très instructive de la communauté d'il y a cinq ans, mais montre également les évolutions très perceptibles des dernières années.

[1] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandatation_INP_LPPR.pdf
[2] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSINP.pdf
[3] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_INP_LPR-du-19.10.20.pdf
[4] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSI_INP_suite_au_vote_LPR.pdf
[5] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_evaluation_hceres.pdf
[6] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_Affichage_resultats_jurys_admissibilite.pdf
[7] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_evenements_ukraine.pdf
[8] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandatation_INP_COP.pdf
[9] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_INP_GT1_du-14.10.20.pdf

Les sections et CID ont été renouvelées en 2021 et le CSI s'est penché avec les sections et les DAS sur leurs évolutions possibles (contours, mots-clés) en amont de ce renouvellement. Nos propositions sont résumées dans une recommandation[10]. La question de la création ou du renouvellement de CID était particulièrement importante. Le CSI a travaillé sur le devenir de la CID 54, dont l'Institut principal est l'INP, lié à la représentation de la biophysique au CNRS (nouvelle section ou nouvelle CID notamment). Nos propositions[11] ont été examinées et prises en compte par l'INP dans le processus de renouvellement de cette CID.

Les présentations de l'INP sur les actualités scientifiques ou sur la mise en place de nouvelles structures, fonctions ou appels à projet ont continûment alimenté nos discussions. Nous avons ainsi par exemple eu une présentation des actions faites pour les GDR qui nous a montré l'importance de ces structures[12], une présentation des Grands Instruments et Infrastructures de Recherche (IR*) et des questions qui se posent à eux (ANNEXE 2 – Enquête concernant les IR*), des actions pour la Science Ouverte (ANNEXE 5 – Sciences Ouvertes) ou pour la place des femmes (ANNEXE 7 – Place des femmes en physique). Des groupes de travail sur ces deux derniers sujets ont été mis en place. Suite à une enquête auprès de collègues, nous avons émis une liste de bonnes pratiques de publication dans le cadre de la Science Ouverte[13] et ce travail en lien étroit avec l'Institut a abouti à la publication d'un livret de bonne conduite[14] diffusé à toutes les unités de l'INP. Les discussions autour de l'égalité homme-femme à l'INP ont conduit à des recommandations du CSI auprès de l'INP[15]. La direction de l'INP a d'autre part incité le CSI à identifier les thèmes émergents à l'international, ainsi que les moyens mis en place à l'étranger pour traiter la question de l'interdisciplinarité. Ce travail particulièrement difficile avec les moyens d'un CSI a conduit à de premières conclusions rapportées dans l'ANNEXE 1 – Interdisciplinarité à l'étranger. Si ce travail est repris par le CSI dans le prochain mandat, il serait souhaitable que le Conseil soit épaulé par les moyens institutionnels.

Le CSI s'est également intéressé de près aux questions d'évaluation et d'accompagnement des chercheurs. Il a fait des propositions sur ce dernier point dans une recommandation[16] et a participé à la très récente mise en place du mentorat à l'INP[17]. Le CSI s'est par ailleurs interrrogé sur l'intégration du développement durable dans nos métiers. Il a invité le collectif Labo1.5 à présenter ses travaux et recommandations (ANNEXE 6 – Collectif Labos 1point5) et a envoyé ses propres recommandations à l'INP et au CNRS[18,19]. Certaines réunions plénières du CSI ont d'autre part été dédiées à des questions scientifiques d'actualité comme l'IA (ANNEXE 3 – Intelligence artificielle) ou le climat (ANNEXE 4 – Climat).

Propositions sur l'évolution du fonctionnement du CSI-INP

Le point (1) des missions du CSI pourrait être interprété avec une vision plus active du CSI dans le fonctionnement de l'INP qu'elle ne l'a été lors de ce mandat. Le rôle de conseil du CSI n'a jamais été utilisé sur des questions essentielles dans la vie de l'Institut comme le fléchage ou le coloriage des postes, la définition des CPJ, ou la mise en place de nouveaux appels à projet. Le CSI a certes toujours été informé des décisions prises mais il n'a jamais pu donner son avis avant décision. Le CSI pourrait par exemple servir de réservoir d'expertises sur des projets comme Emergence. Néanmoins plusieurs travaux effectués de concert avec l'Institut ont été très fructueux (Sciences Ouvertes, mentorat). Les échanges avec les Délégué.e.s Scientifiques et les DAS pourraient être renforcés car ils sont toujours bénéfiques quand ils ont lieu. Les journées de réunions plénières ont parfois facilité les échanges informels avec la direction et cela est à préserver. Certains des travaux du CSI bénéficieraient grandement d'interactions facilitées avec les services ou organismes du CNRS comme la MITI ou la DDOR, ou simplement d'un meilleur accès aux listes

[10] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandatation_INP_Contours-et-mots-cles-des-sections-de-l-inp.pdf
[11] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandatation_INP_le-devenir-de-la-CID54.pdf
[12] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/RECOMMANDATION_INP_11022020.pdf
[13] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSI_%20INP_Pratiques%20de%20Publication%20en%20Science%20Ouverte.pdf
[14] https://www.inp.cnrs.fr/sites/institut_inp/files/download-file/Fiche_Publier%20%C3%A0%20l%27INP_2022_web_VF_0.pdf
[15] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_place_femme_physique.pdf
[16] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_INP_accompagnement-des-chercheur.e.s.pdf
[17] https://www.inp.cnrs.fr/fr/Mentorat
[18] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_referents_dev_durable.pdf
[19] https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_valorisation_enjeux.pdf

de diffusion pour mener les enquêtes. L'interaction avec le CS pourrait également être renforcée pour une meilleure synergie sur des questions dépassant un seul Institut. Le CSI-INP avait initié un travail inter-CSI autour du devenir de la CID 54 qui n'a pas pu aboutir de façon collégiale à cause de la pandémie. Ces interactions entre CSI sont à renforcer sur les sujets abordés dans plusieurs Conseils Scientifiques d'Instituts.

Les travaux du CSI se font souvent à côté et non avec l'Institut. Cela garantit son indépendance et permet à l'Institut de disposer d'un avis autre qu'un avis interne, mais cela freine et entrave par ailleurs ses possibilités d'action et minimise son rôle. Un exemple récent concerne le travail de prospective. Par un hasard de calendrier, l'INP doit faire ce travail cette année, en même temps que le CSI. Bien que le CSI fasse un travail de prospectives « pour demain » et l'Institut « pour après-demain », les enquêtes et interviews nécessaires sont très semblables. Des actions concertées entre CSI et INP auraient pu être menées conjointement et un rapport global publié. Nous devons avouer que la rédaction du rapport de prospective du CSI (présenté ci-après) a pâti de cette mise en parallèle, bien que nous approuvions totalement les principes de l'enquête à grande échelle et des ateliers mis en place par l'INP.

Préambule

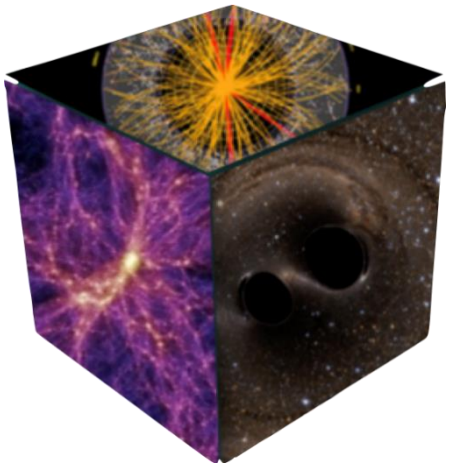
Le travail de prospectives est un travail éminemment difficile, les sujets émergents de demain n'étant pas forcément présents à bas bruit dans les recherches actuelles, et des sujets promis à un brillant avenir pouvant se trouver dépassés par une approche ou une technologie inattendues, ou simplement atteignant rapidement une limite infranchissable. Il est malgré tout logique de partir d'un état des lieux pour mettre en avant les pistes qui semblent les plus prometteuses pour les recherches de demain. Dans un travail préliminaire, le CSI a discuté avec les représentants des sections dépendant de l'INP, s'est nourri des lectures des bilans et prospectives des GDR, des rapports de conjonctures des sections et des exposés scientifiques présentés en séances plénières. Cela engendre le défaut difficile à combattre de mélanger bilan et prospective, défaut qui peut rester présent dans ce rapport.

La Physique est très vaste, elle dépasse d'ailleurs l'INP, mais le rapport s'est restreint aux thématiques présentes dans les sections et CID dépendant de l'INP en Institut principal ou secondaire. Il est, de plus, loin de couvrir l'ensemble des domaines que l'on retrouve dans ces sections et CID. L'exhaustivité n'a jamais été son but. Le choix des sujets traités est inévitablement corrélé aux expertises des membres du CSI qui ne représentent qu'une partie de la Physique. Malgré tout, le CSI a bien sûr cherché à dépasser ces limites structurelles dans l'élaboration du rapport.

En tant que CSI de l'INP, il nous a semblé intéressant de diviser le rapport en chapitres déconnectés des divisions de l'INP en sections. Cet essai de transversalité par rapport aux thématiques des sections met bien en avant les relations entre les différents sujets, et montre que l'interdisciplinarité ou la pluridisciplinarité sont importantes et nécessaires dans un très grand nombre de domaines. Les grands chapitres retenus sont : I. Interactions fondamentales, II. Quantique, III. Nouveaux matériaux, IV. Conditions extrêmes, V. Optique et VI. Complexité. A ces chapitres formant le cœur de l'INP, ont été ajoutés des chapitres transverses mettant l'accent sur des questions interdisciplinaires importantes pour l'INP : VII. Physique et vivant, VIII. Intelligence artificielle, machine learning et données et IX. Infrastructures de recherche. Le rapport se finit sur un chapitre X. Physique et société apportant quelques pistes pour améliorer le rapprochement entre la société et les physiciens et physiciennes. L'écriture du rapport s'est faite par groupes de travail associés à chaque chapitre. Ce découpage en dix chapitres et le début de nos travaux ont été présentés à l'Institut le 21 juin 2022. Le CSI est impliqué au travers de ses membres dans les ateliers « prospectives » mis en place par l'INP, mais ce rapport n'est pas un reflet du travail de ces ateliers (cela sera effectué par les responsables d'ateliers, lesquels ne sont pas dans le CSI). En revanche, les discussions qui ont eu lieu dans ces ateliers ont pu à l'occasion nourrir nos réflexions (et réciproquement). Comme cela a déjà été souligné, chaque chapitre ne prétend pas traiter de tous les aspects reliés à la thématique du chapitre. Il peut résumer des sous-domaines généraux mais parfois montrer un focus sur certains sujets nous ayant plus particulièrement interpelés. On pourra noter une montée en puissance rapide de l'IA dans tous les domaines et remarquer que beaucoup d'avancées importantes actuelles et futures proviennent de l'intrication fructueuse de différentes méthodes expérimentales et théoriques venant de branches variées de la Physique.

Le travail de prospectives a donné lieu à de nombreux échanges avec de nombreux collègues. Nous leur adressons nos plus vifs remerciements pour leurs apports et les discussions qui s'en sont suivies.

I. Interactions fondamentales



De la récente découverte des ondes gravitationnelles, à la confirmation de l'existence de matière noire et d'énergie noire, en passant par le mystère toujours persistant de la masse des neutrinos, la physique des hautes énergies n'a jamais autant eu besoin d'une extension à la fois sur le plan gravitationnel et quantique. Des efforts expérimentaux considérables visent à explorer ces domaines, notamment grâce, au Einstein Télescope[20], à Euclid[21], LiteBIRD[22], au run3 du LHC[23] (*Large Hadron Collider*) et à DUNE[24] (*Deep Underground Neutrino Experiment*). Ces instruments nous délivreront une multitude de résultats sur une période de 20 ans. Il est intéressant de remarquer que, tandis que le continent américain se concentre sur une recherche au-delà du Modèle Standard (MS) dans le domaine des neutrinos, l'Europe et l'Asie misent sur les grands instruments.

Il est fondamental que la physique théorique, au sein de l'INP, soit en mesure d'analyser les futures données dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation, ou le cadre d'une extension cohérente du MS, seule capable de justifier de l'accélération de l'Univers, du phénomène d'inflation et *reheating*[25], tout en proposant une explication microscopique au phénomène des ondes gravitationnelles. Que ce soit la mesure précise d'une largeur invisible du Higgs, la polarisation du CMB (*Cosmic Microwave Background*), l'oscillation des neutrinos, ou une carte en onde gravitationnelle du ciel, chacune de ces mesures apportera un œil nouveau sur le chemin à prendre vers cette **nouvelle physique** au-delà des modèles standards (BSM – *beyond Standard Model*).

1. Matière Noire et Univers primordial

Le domaine de recherche concernant la **Matière Noire** est en plein développement actuellement, autant du point de vue théorique que plus phénoménologique. Si les modèles proposés dans le passé (notamment les WIMPS - *Weakly Interacting Massive Particle*) restent d'actualité et ne sont pas encore complètement exclus, il est vrai que la communauté des théoriciens explore de plus en plus de nouvelles directions. Pour schématiser, on pourrait identifier trois frontières : haute masse, basse masse, faible couplage.

Haute masse : les avancées récentes, notamment concernant la formation d'états liés entre particules de matière noire et la possibilité de cosmologies non-standard, pointent vers des masses au-delà de la limite supérieure traditionnelle des WIMPs, i.e. ~10 TeV, et possiblement au-delà de la limite d'unitarité (~200 TeV). La construction de modèles viables dans cette plage de masses est actuellement très active.

Basse masse : l'activité est extrêmement intense également dans cette direction, des modèles de matière noire sub-GeV jusqu'aux particules de type axion en passant par les neutrinos stériles qui restent des candidats prometteurs dans le domaine du keV.

Faible couplage : l'activité reste soutenue dans ce secteur également. Pour ce qui concerne le régime de masses de type WIMP, on explore les moyens de descendre en dessous du "plancher des neutrinos", par exemple en exploitant la directionalité du signal de matière noire. Le problème de la production de matière noire (FIMP pour *Feebly Interacting Massive Particle*) est également un sujet de recherche dynamique, puisque faisant appel aux conditions d'un Univers primordial post-inflationnaire, dont le mécanisme de *reheating* n'est pas encore compris.

D'un point de vue phénoménologique, les trois frontières sont également au centre de nombreux projets futurs, qui sont en début d'exploitation ou en phase avancée de construction et qui donc produiront un grand

[20] https://www.et-gw.eu/%20
[21] https://www.euclid-ec.org/
[22] https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/future/litebird.html
[23] https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider
[24] https://www.dunescience.org/
[25] période post-inflationnaire correspondant à une transition de phase entre un Univers dominé par un champ d'inflation, et un Univers fait de radiation

nombre de données dans les 5 à10 prochaines années. Les données de ces expériences seront précieuses pour tester les modèles.

Les **trous noirs primordiaux** méritent une attention particulière. Ce sont des candidats qui ont connu un retour spectaculaire ces dernières années. La possibilité qu'ils constituent la totalité de la matière noire reste ouverte dans la fenêtre 10^{-16} - 10^{-12} masse solaires (dans l'hypothèse d'une distribution de masse concentrée; la fenêtre est plus grande pour des distributions élargies). L'étude des mécanismes de formation de ces objets dans l'Univers primordial est un secteur extrêmement actif. L'exploration de la fenêtre mentionnée ci-dessus est aussi un champ de recherche en plein essor.

L'Univers primordial reste un sujet d'étude extrêmement ouvert, en particulier concernant le problème du *reheating*. C'est un domaine où relativité générale, théorie quantique des champs et effets à température finie s'entremêlent. C'est donc également un domaine où les extensions gravitationnelles du modèle standard peuvent être testées. Même si dès les années 90, différents groupes ont lancé la thématique, ce n'est que récemment que de nombreux logiciels ont vu le jour afin de calculer les processus en discrétisant l'espace-temps, à la manière de la QCD (*Quantum Chromodynamics*) sur réseau. Ceci a permis de mieux comprendre les effets non-perturbatifs en jeu, en particulier lors de la période où les oscillations de l'inflation débutent à peine (preheating).

Le problème majeur qui reste à comprendre est également relié à la radiation de Hawking : comment produire des quanta de radiation à partir d'un Univers en expansion ou comment transformer l'énergie d'une expansion accélérée en particules ?. Ce domaine est en plein développement, et des interrogations demeurent sur la validité des techniques issues de la physique des particules dites « à la Feynman », qui sont parfois en contradiction avec des techniques dites « Bogoliubov » pour lesquelles les calculs bruts ne nécessitent pas le passage au travers d'un développement en amplitude. La compréhension profonde de ces différences soulèvera une partie du voile qui empêche aujourd'hui l'émergence d'une théorie d'unification des forces fondamentales.

2. Physique des particules

Les directions de recherche à privilégier en **physique des neutrinos** concernent l'origine de leurs masses, leur rôle dans la génération de l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers via la leptogenèse, et l'effet de la nouvelle physique dans les expériences de physique des neutrinos. Différents mécanismes sont susceptibles d'engendrer les masses des neutrinos. D'une part, l'étude de leurs manifestations expérimentales (contributions aux processus violant la saveur, la double désintégration bêta, production directe de neutrinos stériles lourds aux collisionneurs...), ainsi que de leur capacité à expliquer l'asymétrie matière-antimatière, est cruciale. D'autre part, la précision croissante des expériences de physique des neutrinos les rend sensibles à des effets de second ordre prédits par certaines extensions du MS (interactions non standard des neutrinos, neutrinos stériles...). Cette physique des neutrinos permettra de tester d'éventuels nouveaux concepts dans le secteur des leptons.

La recherche de particules fondamentales, motivées par des théories à haute énergie (Grand Unification Theory – GUT ; ou supersymétrie par exemple), ainsi que l'analyse détaillée de la physique du Higgs restent parmi les objectifs prioritaires, notamment avec l'arrivée prochaine du LHC à haute luminosité (HL-LHC) ainsi que pour des expériences à plus basse énergie de type BELLE. Que ce soit au travers d'une cinquième force (boson Z'), de la production de matière noire, voire la présence de leptoquarks, ce domaine de recherche reste l'un des plus actifs en physique des particules. Les études microscopiques deviennent de fait complémentaires aux études effectuées dans le cadre de théories effectives (**EFT**).

Concernant la **physique de la saveur**, l′objectif principal est à la fois de comprendre l′origine de la saveur des quarks et leptons, mais aussi d′explorer de nouveaux phénomènes à travers la physique de précision. Plusieurs axes semblent prioritaires dans les prochaines années. D'une part, une nouvelle physique à basses énergies a comme obstacle principal la maîtrise des effets de la QCD non-perturbative. Les simulations numériques de la QCD sur réseau ont permis d′obtenir des prédictions robustes pour le modèle standard (MS) et pour certaines observables, mais plusieurs problèmes restent encore ouverts. Par exemple, l′extraction des éléments de la matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) montre un désaccord important entre les méthodes dites exclusives avec celles dites inclusives. Un autre problème majeur est le désaccord entre les différentes déterminations de la contribution de la polarisation hadronique

du vide pour le g-2 (moment magnétique anomal) du muon. Plusieurs nouveaux résultats expérimentaux sont attendus dans les 5 prochaines années pour la physique des kaons, du charm et des mésons-B, ainsi que pour la recherche de la violation de la saveur leptonique. L'objectif principal sera alors de déterminer l'échelle de la nouvelle physique et la structure de la saveur des opérateurs sous-jacents, ce qui pourrait servir de guide pour les expériences à hautes énergies.

Les simulations numériques de **QCD sur réseau** sont effectuées pour prendre en compte les effets de l'interaction forte dans son régime non perturbatif en s'appuyant sur les premiers principes de la théorie quantique des champs. Les équipes concernées devront poursuivre l'activité menée pour réduire l'incertitude théorique sur les éléments de matrices hadroniques qui paramétrisent les processus intéressants. Par ailleurs il est vivement encouragé d'accroître l'effort mis sur l'étude des observables de la physique hadronique « sur le cône de lumière », et d'approfondir les méthodes élégantes en train d'émerger pour l'étude des processus inclusifs en physique du B, en physique du tau ou en diffusion profondément inélastique du proton.

L'arrivée dans le paysage international des machines « Exascale », d'une puissance de calcul à l'échelle Exaflops, ne doit pas reléguer la France à un rang secondaire. A ce titre il est essentiel que les chercheurs basés à l'étranger et qui collaborent avec les équipes de nos laboratoires aient accès aux machines du GENCI. Actuellement cela est impossible, ou alors au prix de contorsions administratives sans réel objet. Les transferts massifs de données, de l'ordre du petabyte voire davantage, sont aussi plus laborieux qu'ailleurs. Cette particularité de notre système d'infrastructure est malheureusement un frein à l'attractivité de notre pays auprès de nos collègues étrangers.

3. La théorie des cordes et holographie

Un sujet d'étude toujours très dynamique en progressant vers une théorie quantique de la gravité concerne la théorie des cordes. Cette théorie a connu aussi des applications importantes en matière condensée et en description des fluides quantiques. Les méthodes holographiques ont commencé à être utilisées pour contraindre les mécanismes de stabilisation des moduli. Des études plus approfondies sont en cours pour décider de la viabilité des scénarios populaires, utilisés pour les applications à la physique des particules et à la cosmologie.

Si une construction rigoureuse du Modèle Standard en théorie des cordes semble encore lointaine, une direction de recherche très active consiste à déterminer les contraintes sur les théories effectives en dimension 4, posées par l'existence d'une théorie quantique complète à très haute énergie incluant la gravitation. Au-delà de ces motivations phénoménologiques, la théorie des cordes fournit aussi un cadre cohérent pour élucider des problèmes conceptuels liés à la gravité, tels que l'origine microscopique de l'entropie de Bekenstein-Hawking associée aux trous noirs, et la violation potentielle d'unitarité causée par leur évaporation. La correspondance holographique joue un rôle central et implique de nombreuses interactions avec le domaine de l'information quantique.

Indépendamment des applications aux théories des champs fortement couplés, les relations entre amplitudes de diffusion dans les théories de jauge et théories de gravité ont permis de développer des méthodes de calculs très efficaces pour les amplitudes de diffusion à multiplicité et ordre élevés, utiles à la fois pour l'analyse des données aux collisionneurs de particules et le calcul des fronts d'ondes gravitationnelles émises par les collisions de trous noirs. Enfin, la recherche en théorie des cordes entretient un dialogue très fructueux avec de multiples domaines des mathématiques, incluant la topologie, la géométrie algébrique et symplectique, la théorie des représentations et la théorie des nombres (comptage des micro-états de trous noirs supersymétriques par exemple).

4. La constante cosmologique, un problème transversal

Un axe de recherche à surveiller concerne les interrogations liées à la constante cosmologique. L'énergie noire est la substance qui serait à l'origine de l'accélération récente de l'expansion de l'Univers. Sa nature est inconnue et pourrait être une simple constante cosmologique ou le résultat d'une physique plus complexe dont la dynamique sous-jacente reste à découvrir. Dans les cinq prochaines années, deux sujets théoriques devraient faire l'objet de clarifications :

1) Le statut de la constante cosmologique en **théorie des cordes** est très controversé. Certains évoquent un paysage d'états fondamentaux dont une grande partie aurait une constante cosmologique positive.

D'autres affirment que l'existence d'un horizon pour l'espace-temps de de Sitter rend ceci impossible. Enfin des conjectures affirment l'impossibilité d'une constante cosmologique positive en théorie des cordes et l'existence nécessaire de champs scalaires dont la dynamique mènerait à l'énergie noire. Ces positions sont incompatibles et devraient être démêlées.

2) L'accélération de l'expansion pourrait être une illusion et résulterait d'une incompréhension de la gravitation à grande échelle. La construction de modèles de **gravitation massive** qui seraient cohérents physiquement, c'est-à-dire calculables depuis les courtes distances submillimétriques jusqu'à l'horizon cosmologique, pourrait être une alternative aux modèles de champs scalaires. Remarquons également que les dernières **mesures de précision du taux de Hubble** sont en désaccord (à 5 sigma) avec la prédiction du modèle Lambda-CDM (*Cold Dark Matter*) calibrée sur les données de Planck. La "tension de Hubble" pourrait être une indication de la nature fondamentale de la matière noire et de l'énergie noire, et affecte jusqu'à notre compréhension du mécanisme d'inflation.

En parallèle d'un effort expérimental qui s'intensifie, notamment via les observations de haute précision du satellite Euclid, des télescopes LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*) et Simons Observatory dès 2023/2024, il est essentiel de renforcer le développement théorique de modèles qui permettent d'expliquer ces mesures et d'établir les implications pour notre compréhension de l'Univers primordial et du secteur sombre. Pour exploiter pleinement les relevés à venir, il faudra améliorer grandement la précision des prédictions actuelles, notamment dans le régime non-linéaire, par **des méthodes semi-analytiques et numériques**, ce qui représente un défi majeur pour les théoriciens dans la prochaine décennie.

5. Ondes gravitationnelles

L'analyse des formes d'ondes pour les ondes gravitationnelles est un sujet ancien, entamé par Einstein lui-même dès 1918, et qui aujourd'hui se combine avec les approches post-Newtoniennes (relativité générale numérique et Effective One Body), qui permettent l'identification des formes des ondes gravitationnelles. Ces techniques sont, depuis quelques années, accompagnées de techniques de calcul d'amplitudes dans un formalisme relativiste, de théorie des champs et de supergravité. Ces approches complémentaires apportent un éclairage nouveau sur les structures fondamentales et seront encore développées dans les années à venir.

Comprendre comment calculer les observables de la gravitation classique à partir d'amplitudes quantiques a nécessité une reformulation des calculs de perturbations en théorie des champs pour l'interaction entre deux corps massifs. Les calculs post-minkowskien donnent des expressions analytiques exactes à tous les ordres, ce qui réduit grandement l'incertitude théorique dans l'analyse des formes d'ondes. Afin d'avoir une compréhension fine des observations, il est nécessaire d'obtenir des meilleurs résultats analytiques pour les formes d'ondes en perturbation, de mieux déterminer la dépendance dans les spins des objets massifs, les effets de marées et les divers phénomènes radiatifs. Enfin, il sera nécessaire de penser la théorie de gravitation dans le cadre des théories effectives pour envisager une analyse plus générale de la physique gravitationnelle, au-delà de la théorie d'Einstein.

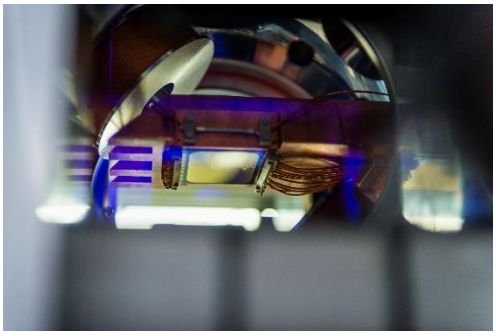
6. La physique nucléaire et hadronique

La physique nucléaire et hadronique évolue vers une description unifiée d'une variété de phénomènes complexes à différentes échelles d'énergie et de taille. Des sujets tels que la connexion entre la QCD et les forces nucléaires, la description des réactions nucléaires dans les noyaux exotiques, les collisions d'ions lourds et la physique des étoiles à neutrons sont aujourd'hui abordés dans un cadre plus synergique, comme l'exigent les récents progrès expérimentaux. Cependant, un effort théorique substantiel est nécessaire pour concilier les théories modernes de l'interaction nucléaire aux basses et moyennes énergies avec les observations astrophysiques. Des scénarios similaires ont régulièrement émergé également dans le domaine de la physique des neutrinos, des expériences de détection de matière noire et des faisceaux d'ions rares. Un autre aspect important est lié au développement continu de méthodes théoriques qui capitalisent sur les ressources de calcul à haute performance.

La recherche future s'attaquera à différents problèmes concernant la structure des noyaux atomiques, les réactions nucléaires et la matière en interaction forte. En particulier, il y aura un effort important pour étudier à la fois théoriquement et phénoménologiquement les propriétés de la matière en interaction forte à haute température, qui, en conséquence de la QCD, devrait subir une transition de phase vers un nouvel

état de la matière, connu sous le nom de Quark Gluon Plasma (QGP). L'objectif des recherches futures est d'étudier les propriétés de la matière QGP reliant les résultats les plus récents de QCD sur réseau avec la phénoménologie observée dans les collisions ultra-relativistes. Cela nécessite également un développement théorique de l'hydrodynamique relativiste et de la théorie relativiste du transport dans des conditions extrêmes, pour effectuer des simulations réalistes de la dynamique des collisions nucléaires dans le but d'une comparaison directe avec des données expérimentales. La recherche sur les hadrons et les noyaux a comme contreparties expérimentales les expériences sur les collisions relativistes d'ions lourds menées dans diverses installations, en particulier au collisionneur relativiste d'ions lourds (RHIC) et au grand collisionneur de hadrons (LHC) et, dans un futur proche, sur l'installation de recherche sur les antiprotons et ions (FAIR) et l'installation de collisionneur d'ions basée sur le nucléotron (NICA).

II. Quantique



© Cyril FRESILLON / SYRTE / FIRST-TF / CNRS Images

Le paysage de la recherche en quantique a fortement évolué en France au cours des cinq dernières années, accompagnant la mise en action d'un plan quantique national, auquel le CNRS et l'INP ont été associés. On peut à présent observer une forme de continuum entre la recherche la plus fondamentale sur le sujet et le développement économique de jeunes pousses. Des acteurs industriels français historiques de grande taille se sont également insérés dans la dynamique. Dans ce paysage mouvant, nous mettons ici l'accent sur les développements de physique amonts qui préparent le futur de ce qui est parfois appelé la « filière quantique ». Nous proposons une brève analyse sur les technologies quantiques, qui font l'objet de rapports beaucoup plus détaillés ailleurs. Le rôle de l'INP est ici clair : au-delà des effets de bulle, garder le cap de la recherche la plus amont sur le sujet, et ouvrir le futur.

1. Technologies quantiques

Calcul et simulation quantique

Constituant deux des piliers structurant l'effort européen et national dans les technologies quantiques, ces deux thèmes ont connu une forme de convergence de fait. En effet, malgré des réalisations spectaculaires utilisant des qubits supraconducteurs, l'objectif d'un calculateur quantique universel semble encore largement hors de portée, et nécessitera encore plusieurs sauts conceptuels et technologiques pour être approché. Face à ce constat, un objectif moins ambitieux mais de plus court terme vise à réaliser une tâche spécifique de traitement de l'information à l'aide d'une machine quantique dédiée. Un simulateur quantique constitue précisément une telle machine spécifique, et contrairement au cas de l'ordinateur quantique universel, certains simulateurs quantiques ont démontré des preuves académiques de fonctionnement.

En conséquence, on peut distinguer pour le futur, deux niveaux de recherche : (i) une recherche qui va rester très amont (10 à 30 ans) sur la compréhension et le contrôle des processus de décohérence affectant les qubits (recherche de matériaux, chimie, codes correcteurs d'erreur, système de rétro-contrôle sur les qubits, schémas d'implémentation), pour s'approcher des conditions de réalisations d'un calculateur universel ; (ii) une recherche sur certaines tâches très spécifiques, peut-être restreintes, mais qui pourra s'approcher d'un transfert technologique (5 à 10 ans). Les équipes françaises sont positionnées sur les deux niveaux de recherche.

Communications quantiques

Si la cryptographie quantique peine encore à convaincre les cryptographes de métier, les efforts en technologie quantique européens et français permettent d'amorcer la constitution de réseaux fibrés de communications quantiques, et même de communications satellites. Ceci devrait permettre d'explorer de nouveaux usages (calcul distribué, réseaux de capteurs) et de se confronter aux problématiques techniques de l'industrie des télécommunications.

Au niveau du laboratoire, les avancées récentes et les perspectives sur 5 à 10 ans concernent les mémoires et les convertisseurs quantiques. Certaines mémoires fondées sur des ensembles atomiques ont acquis une robustesse et une efficacité suffisantes pour envisager une commercialisation (longueur d'onde de travail d'environ 800 nm), alors que des efforts sont menés sur l'ingénierie et l'intégration de matrices solides contenant des ions de terres rares, afin de tirer profit des bonnes propriétés de cohérence de ces systèmes. Du côté des convertisseurs, on peut noter un effort important pour transférer des états quantiques électromagnétiques entre le domaine optique (ou télécom) et le domaine radio-fréquence (notamment proche des fréquences des qubits supraconducteurs). Deux approches, l'une électro-optique et l'autre électro-optomécanique, sont récemment parvenues à atteindre des efficacités de conversion importante (>10%) avec un bruit ajouté faible (<10 quanta). Dans les 5 ans, on peut imaginer que ces technologies trouvent certaines applications, au moins en science fondamentale.

Capteurs quantiques

Des capteurs fondés sur l'interférométrie atomique sont commercialisés depuis quelques années, et encore dominés dans de nombreuses plages de fréquence par des bruits classiques. Dans le cas des détecteurs d'ondes gravitationnelles, c'est au contraire le bruit quantique de la lumière qui domine à certaines fréquences d'intérêt. Ceci a motivé l'utilisation de techniques de compression de bruit quantique, pour gagner en sensibilité et en volume de l'espace observable par ces instruments. Ceci constitue un des rares cas avérés de gain instrumental concret permis par un capteur travaillant à la limite quantique. Pour beaucoup d'autres capteurs, le fait de travailler à la limite quantique n'est pas l'essentiel. En pratique, plutôt que d'assister à l'amélioration « quantique » de capteurs existants, on assiste plutôt à la création de nouveaux concepts de capteurs, issus des recherches en quantique. C'est le cas par exemple des centres NV (azote-lacune) et autres atomes artificiels en matière condensée. On citera également les capteurs électromécaniques et optomécaniques issus de recherches visant à contrôler des systèmes mécaniques quantiques à l'aide du champ électromagnétique, et qui sont aujourd'hui utilisés pour mesurer des forces, des radiations, des températures ou des objets biologiques. Notons également le développement important de techniques d'amplification bas bruit (proche de la limite quantique) du signal (électromagnétique, mécanique), issues elles aussi des recherches en quantique, et ayant initié la création de jeunes pousses en France.

2. Radio-fréquences quantiques

Le domaine de la détection de photons uniques radio-fréquence a connu des percées récentes remarquables, qui devraient bientôt permettre d'importer dans le domaine des micro-ondes les nombreux concepts issus de l'optique quantique, utilisant des mesures projectives (les clics d'un photon sur un photo-détecteur).

Les magnons ou ondes de spin peuvent fonctionner dans une large bande de fréquences (du sub-GHz au THz) et peuvent se coupler à divers autres systèmes physiques tels que les photons optiques (via la magnéto-optique), les photons micro-ondes (via le dipôle magnétique) ou les modes mécaniques (via l'interaction magnétostrictive). Le couplage d'un magnon avec un qubit (magnonique quantique) via un photon micro-onde a été démontré dans une preuve de concept. Dans un futur proche, on peut envisager l'exploration d'autres systèmes de matériaux au-delà de l'archétype « grenat de fer et d'Yttrium (YIG) », permettant d'introduire des degrés de liberté additionnels (ferroélectricité, antiferromagnétisme) et de commutabilité. On explorera également de nouveaux schémas de couplage magnon-qubit.

Plus généralement, on note une hybridation des technologies, les techniques micro-ondes quantiques étant à présent interfacées avec un grand nombre de systèmes de matière condensée, comme les défauts

dans les semiconducteurs, les résonateurs nanomécaniques, ou les systèmes à deux niveaux (TLS : Two-Level Systems) fluctuant dans la matière. Le sujet des TLS apparaît d'ailleurs comme transverse en physique quantique en matière condensée : ce sont eux qui limitent la cohérence dans les meilleurs dispositifs. Leur identification et leur contrôle systématique apparaît donc comme un enjeu majeur pour les 10 ans à venir.

3. Atomes et gaz quantiques, molécules, métrologie

Les approches de physique atomique appliquée ont enclenché une phase de miniaturisation : miniaturisation des horloges, miniaturisation des interféromètres atomiques, hybridation avec des techniques radio-fréquences et techniques MEMS (microsystème électromécanique). Dans le champ de la simulation et du calcul quantique, c'est le besoin d'accroissement d'échelle qui semble apparaître le plus nettement (viser quelques milliers d'atomes en interaction), avant de penser miniaturiser.

Sur le plan de la physique fondamentale, l'effort sur la métrologie des atomes et des molécules est constant pour sonder les limites de l'interaction lumière-matière (voir également chapitre V. Optique). Améliorer la mesure des constantes fondamentales et/ou observer des processus chiraux sur des molécules individuelles bien contrôlées demandent de développer constamment de nouvelles techniques. Améliorer le contrôle du front d'onde, contrôler le bruit des lasers dans la gamme du lointain infra-rouge, améliorer les performances des détecteurs de photons dans des gammes de longueur d'onde encore marginales contribuent en retour à des innovations en physique plus appliquée. Les projets en cours sur le contrôle de l'antimatière (l'antimatière gravite-t-elle comme la matière ?), qui s'étireront sur au moins une décennie, devraient être riches de tels développements techniques.

Sur le plan des gaz d'atomes en interaction, on note un regain d'intérêt pour le traitement des interactions à longue portée, en lien avec l'émergence de nouvelles méthodes théoriques permettant d'en tenir compte dans les simulations numériques (voir ci-dessous). Ces travaux permettront de mieux illustrer l'émergence des corrélations étendues, un enjeu également pour la compréhension de la matière condensée.

4. Simulations classiques des systèmes quantiques

Les méthodes numériques pour les systèmes quantiques à N corps ont connu des développements remarquables impactant la physique de la matière condensée, de la physique atomique, et le calcul quantique, avec des applications en apprentissage automatique. On distinguera les trois approches que sont : les diagonalisations exactes, limitées à des petits nombres de problèmes mais utiles pour valider de nouvelles approches ; le Monte-Carlo quantique, affecté pour les fermions par le "problème de signe" ; et les autres principales approches de nature variationelle.

Dans le prolongement du groupe de renormalisation des matrices de densité (DMRG), bien adapté aux systèmes 1D ou quasi 1D, la représentation des états quantiques en produit de tenseurs généralise aux systèmes de dimension supérieure les états de produits de matrices (*Matrix Product States*) du 1D. Malgré la puissance croissante des ordinateurs, ces approches de type réseaux de tenseurs nécessitent des approximations pour atteindre des systèmes de taille significative, comme par exemple l'approche de type "*corner transfer matrix*" importée de la physique statistique classique. Ces approches stimulent l'exploration de problèmes conceptuels, par exemple pour la compréhension de l'intrication quantique (entropies d'intrication).

D'autres types d'Ansatz, fondés sur des Machines de Boltzmann, décrivant potentiellement des classes d'états plus larges que les réseaux de tenseurs, et pour lesquels il est possible de bénéficier des algorithmes très efficaces de l'apprentissage machine, sont en fort développement. Les avancées continues d'autres approches numériques comme le Monte-Carlo diagrammatique, le Monte-Carlo variationel ou le champ moyen dynamique (DMFT) constituent également des approches en émergence.

5. Physique quantique et intelligence artificielle

Les méthodes d'apprentissage automatique gagnent en intérêt pour l'étude des systèmes quantiques avec par exemple la recherche de nouveaux matériaux, l'analyse de systèmes fortement

corrélés, ou la génération de nouveaux schémas expérimentaux en optique quantique. Tandis qu'il est possible de développer une intuition pour le cas de deux ou trois qubits, cela demeure une gageure pour un nombre croissant de qubits. L'apprentissage automatique pourra permettre de repousser cette limite. La représentation en graphe d'un arrangement expérimental peut être optimisée par un réseau de neurones selon l'état quantique prescrit. Le graphe optimisé résultant peut ensuite être traduit dans un arrangement expérimental à réaliser. Même s'il est à ce jour difficile de trouver la solution sans intelligence artificielle, on peut donc développer une intuition pour la solution une fois qu'elle est trouvée.

De manière réciproque, la physique quantique contribue à l'implémentation des ordinateurs neuromorphiques. Contrairement à l'architecture standard dite de von Neumann, où processeur et mémoire sont séparés, les ordinateurs neuromorphiques suivent le modèle du cerveau. Un réseau de neurones dans un ordinateur quantique neuromorphique peut être réalisé sur différentes plateformes quantiques comme des circuits supraconducteurs, spintroniques ou photoniques. Un réseau de neurones quantiques pourrait permettre de réaliser des tâches d'apprentissage sur des données classiques avec un plus petit nombre de dispositifs physiques par rapport à un réseau de neurones classiques, et pourra permettre par exemple la reconnaissance d'états quantiques.

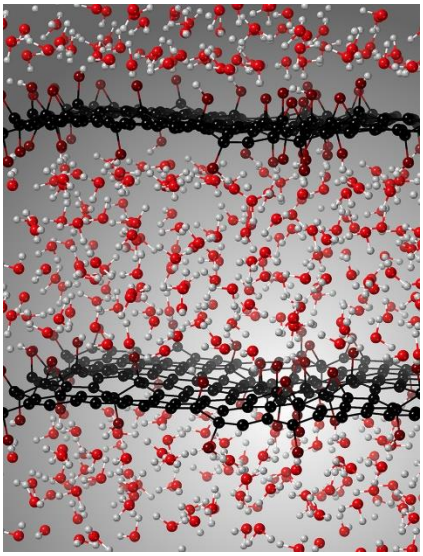
Un objectif initial serait de reconnaître des propriétés qualitatives d'états quantiques, telles que l'existence ou non d'intrication dans l'état d'entrée. Puis, des tâches quantitatives pourraient suivre en démonstration de principe (voir également chapitre VIII. Intelligence artificielle, machine learning et données).

III. Nouveaux matériaux

De très nombreuses avancées (fondamentales ou technologiques) bénéficient des progrès dans les connaissances sur les matériaux et dans le développement de matériaux innovants. Les progrès sont constants dans la maîtrise de la synthèse et l'élaboration par différentes voies, physiques ou physico-chimiques, de matériaux de différentes classes et structures, du massif au nano-objet. L'ingénierie des surfaces, interfaces ou encore des défauts permet également la création de nouvelles fonctionnalités des matériaux et dispositifs. L'apport d'outils de nano-fabrication/structuration disponibles en particulier au sein des centrales de technologie nationales ou régionales constitue souvent un prérequis essentiel à la plupart de ces développements.

Aux développements de matériaux et fonctionnalités sont nécessairement associés des progrès dans les techniques de caractérisation, en termes de précision, sensibilité, résolutions spatiale ou temporelle, avec une part de plus en plus importante dédiée aux aspects *in situ*, résolues en temps ou *operando*, sous sollicitations diverses (électrique, mécanique, rayonnement). Dans ce cadre, la contribution apportée par les IR* est majeure. Les études de matériaux menées par la communauté au sein de l'INP sont largement interdisciplinaires et fédèrent, notamment au travers de plusieurs GDR ou réseaux de métiers, les différents laboratoires de l'INP et plus largement des acteurs d'autres instituts tels que l'INC, l'INSIS ou encore l'INSB.

Les problématiques matériaux sont souvent centrales dans de très nombreux champs (inter)disciplinaires et dans leurs applications associées. Dans le périmètre limité de ce document, et sans recherche d'exhaustivité, nous avons choisi pour cette section spécifique sur les nouveaux matériaux, d'aborder trois champs thématiques : (i) l'énergie, (ii) l'électronique, le magnétisme et la spintronique, et (iii) les matériaux 2D. Le caractère très interdisciplinaire de la thématique matériaux est illustré par le fait que ces derniers sont également évoqués dans plusieurs autres sections thématiques de ce document (chapitres II. Quantique, IV. Conditions extrêmes, V. Optique, VI. Complexité & VII. Physique et vivant).



© Marie-Laure BOCQUET / PASTEUR / ENS / CNRS Images

1. Energie

La décarbonation des activités humaines, les transitions écologique et énergétique constituent des urgences mondiales. Le déploiement de nouvelles technologies énergétiques à faible émission de carbone, nécessaires pour atteindre les objectifs énergétiques et climatiques de l'Europe en 2030, est basé sur les avancées de la recherche de matériaux aux propriétés remarquables. La recherche fondamentale au sein de l'INP sur les matériaux pour l'énergie porte sur la synthèse, la caractérisation et la compréhension théorique des matériaux fonctionnels prometteurs pour les applications énergétiques. On peut retrouver ces matériaux nouveaux parmi les thermoélectriques, les semi-conducteurs, le photovoltaïque, les piles à combustible, les matériaux de stockage de l'énergie et les supraconducteurs. Ces matériaux peuvent inclure, entre autres, des matériaux polymères, des oxydes complexes, des matériaux nano-ioniques, des matériaux bidimensionnels, des matériaux caloriques et poreux pour des applications énergétiques potentielles. Il s'agit d'un domaine de recherche très actif qui sera de plus en plus pertinent pour relever les principaux défis intrinsèquement pluridisciplinaires, à l'interface entre la physique, la chimie, la biologie- pour ce qui concerne l'exploitation des biomasses- et le génie des procédés.

Une large partie de la communauté de l'INP s'occupe déjà avec succès de la modélisation de ces matériaux. Citons comme exemple les études de plusieurs équipes françaises sur des nouveaux **supraconducteurs** à haute température critique sous haute pression, ou les nouvelles **hétérostructures** semi-conductrices à base de GaN qui peuvent fonctionner à des températures, des niveaux de puissance, des tensions et des fréquences plus élevés que l'arséniure de gallium et le silicium. Cependant la maîtrise de leur croissance et leur caractérisation structurale à l'échelle atomique restent un défi, et un écart important apparaît entre le passage pour ces nouveaux matériaux du laboratoire à la production à l'échelle industrielle.

Des nouveaux matériaux sont aussi développés pour la mise en œuvre des vecteurs énergétiques alternatifs. Pour ce qui concerne l'**hydrogène**, le développement de la Fédération hydrogène en 2020 a fédéré l'expertise des chercheurs de l'INP sur deux thèmes principaux (i) la production de l'hydrogène, qui s'intéresse par exemple à l'étude théorique et à la caractérisation d'électrolyseurs haute température, (ii) le stockage, sous forme gazeuse et sous forme solide dans des nouveaux matériaux, comme les MOF (*metallic organic framework*), les clathrates, les zéolithes, ou les hydrures métalliques. Une forte impulsion est aussi attendue pour les matériaux naturels sources de gaz, comme les hydrates de gaz. L'exploitation de ces matériaux, représentant le double des réserves de gaz, de charbon et de pétrole réunis, nécessite une

compréhension au niveau moléculaire des processus de déstabilisation, séquestration de gaz (en particulier de CO_2) et stockage à l'intérieur de nano-cavités constituant le squelette de ces hydrates. La communauté neutronique française est en particulier très active dans la caractérisation des structures riches en hydrogène et de la dynamique de l'hydrogène à l'intérieur de ces matériaux. La caractérisation de la cinétique rapide de réaction est aussi en fort développement, grâce au développement des techniques spectroscopiques THz et femto seconde (voir chapitre V. Optique).

Pour les applications dans le **photovoltaïque**, trois types de matériaux sont actuellement explorés : (i) le silicium, (ii) les matériaux organiques et (iii) les pérovskites hybrides. Les pérovskites hybrides sont les candidats les plus récents et ont rencontré un fort intérêt pour les applications photovoltaïques. Cependant, ces matériaux mous restent mal compris car ils possèdent une dynamique de réseau très complexe avec des effets d'anharmonicité. Il est notamment difficile de comprendre le lien entre le désordre du réseau et les propriétés électroniques, ce qui constitue un verrou empêchant d'améliorer la mobilité des porteurs. Leurs propriétés électroniques se décrivent par des mécanismes à l'interface entre les matériaux organiques et les semi-conducteurs, avec des processus de saut (*hopping*) et de diffusion classique. Les films minces de pérovskites hybrides sont actuellement polycristallins avec la présence de nano-domaines ce qui accroît leur complexité. Des monocristaux sont également à l'étude pour comprendre leurs propriétés fondamentales. Un des défis majeurs sur le plan applicatif reste de démontrer une stabilité équivalente au silicium. En effet, bien que les rendements démontrés en photovoltaïque soient très compétitifs, ces pérovskites hybrides ont un problème de stabilité chimique (notamment à l'eau) ainsi qu'au photodopage.

2. Électronique, nanomagnétisme et spintronique

Électronique

Le développement de l'épitaxie de matériaux pour **l'électronique de puissance** se poursuit. Dans la filière des nitrures d'éléments III (III-N), la tendance est à l'augmentation des tensions de claquage des transistors. Une des solutions passe par l'accroissement de la teneur en aluminium dans les hétéro-structures HEMT (transistors à électrons de haute mobilité) de type AlGaN/GaN. Une autre tendance est le développement de dispositifs verticaux. Une nouvelle famille de matériaux appelés semi-conducteurs à bande interdite ultra-large est en émergence. Parmi ces derniers, l'oxyde de gallium (Ga_2O_3) suscite beaucoup d'intérêt en raison de ses propriétés intrinsèques. L'absence de substrat compatible continue à confiner le diamant à des niches. Enfin le carbure de silicium demeure le matériau de choix pour l'électronique de puissance et de fait, malgré une certaine maturité, les développements de la phase cubique ou du semi-isolant semblent prometteurs. Dans le domaine de l'électronique radiofréquence, la recherche s'effectue dans un contexte économique et stratégique particulièrement tendu où il est primordial de développer des solutions bas coût garantissant une indépendance notamment par rapport aux matériaux critiques et/ou énergétiquement coûteux à élaborer. Les matériaux III-V arséniés, phosphorés et antimoniés continuent à faire la course en tête dans le domaine des composants millimétriques mais avec des puissances qui restent limitées. Dans ce contexte, le développement d'hétérostructures III-N épitaxiées sur substrat silicium grande surface (substrat 200 mm, voire 300 mm de diamètre) semble être une voie prometteuse pour réduire les coûts mais jusqu'ici au prix de performances inférieures par rapport aux III-N sur substrat SiC. Les semi-conducteurs à large bande interdite, tels que le SiC, le diamant, ou le GaN sont aujourd'hui des candidats privilégiés pour dépasser les limitations des matériaux utilisés dans le domaine des capteurs MEMS, du fait de leurs propriétés physiques (grand coefficient de température de résistance, inertie chimique et résistance au rayonnement).

Plus petit, plus rapide, moins cher : voici le credo de l'industrie des semi-conducteurs depuis la fabrication du premier transistor bipolaire en 1947. La loi de Moore en est le parfait exemple et les performances des composants n'ont cessé d'être améliorées durant les dernières décennies. Face aux exigences et aux besoins toujours plus grands, les dispositifs se sont considérablement complexifiés et mettent en jeu des phénomènes physiques toujours plus ultimes. Dès lors, le concept d'intégrer différentes fonctionnalités au sein d'un même composant ou circuit est devenu une voie incontournable pour les futures générations de dispositifs. On peut citer à titre d'exemple l'utilisation de demi-métaux tels que Fe_3O_4 comme contact pour l'injection de spin dans des dispositifs à base de ZnO, ScAlN pour ses propriétés piézoélectriques et ferroélectriques, ou NbN pour son état supraconducteur dans les nitrures d'éléments III. Il est aussi impératif

dans un avenir proche de réduire la consommation en énergie des composants. Pour ce faire, les matériaux à transition de phase comme par exemple les GST ($Ge_2Sb_2Te_5$), semblent une piste intéressante pour les applications mémoires.

Magnétisme et spintronique

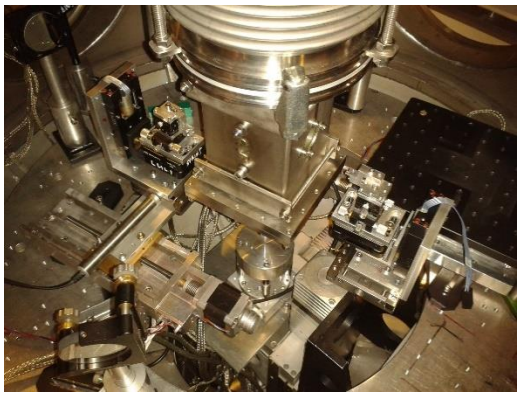
L'intérêt récent dans le domaine de la spintronique pour le contrôle de l'aimantation, de l'anisotropie magnétique, des textures de spin, de la polarisation en spin et des conversions spin/charge, repose sur l'optimisation de la croissance des hétérostructures de matériaux et le contrôle des interfaces. De par l'interaction forte entre leurs degrés de liberté (spin, charge, orbitale), les oxydes suscitent un fort intérêt pour le magnétisme et la spintronique. On peut citer le développement de films minces de grenats d'yttrium fer (YIG) qui, de par leur très faible coefficient d'amortissement de Gilbert, sont utilisés pour le contrôle ultrarapide de l'aimantation. Les gaz bidimensionnels (2D) formés à l'interface entre deux isolants suscitent toujours un large intérêt pour la spintronique, par la présence d'états Rashba de surface qui induisent de forts coefficients de conversion spin/charge. Ces gaz 2D sont maintenant étendus à des hétérostructures impliquant des isolants magnétiques ou ferroélectriques, avec la possibilité de pouvoir contrôler le signe de la conversion spin/charge de manière non volatile, voire d'induire un gaz 2D polarisé en spin ou de stabiliser un état ferroélectrique métallique. Pour le contrôle magnétoélectrique, non volatile et à faible énergie, de l'aimantation ou d'ondes de spin, les composés multiferroïques tels que le $BiFeO_3$ sont encore très intensivement étudiés avec des progrès très récents en lien avec la croissance de ces films. De plus, les nouvelles techniques d'imagerie des textures polaires et magnétiques permettent de mieux comprendre les couplages entre ces ordres à l'échelle locale. Les matériaux antiferromagnétiques, jusqu'à récemment utilisés comme composés passifs en spintronique, suscitent actuellement un fort intérêt de par leur dynamique d'aimantation qui se situe dans le domaine du THz. Un effort important de développement de ces matériaux sous forme de couches minces avec un contrôle des domaines magnétiques est une thématique en très forte croissance.

3. Matériaux 2D/ interfaces

Depuis la démonstration de l'exfoliation de feuillets de graphène, la recherche sur les matériaux bidimensionnels (2D) s'est fortement développée. Isostructural avec le graphène, le **nitrure de bore hexagonal** (h-BN) est un isolant 2D à la fois prometteur pour ses propriétés optiques dans l'UV, électroniques comme filtre à spin efficace, mais également pour ses caractéristiques chimiques qui le rendent incontournable pour l'encapsulation d'autres matériaux 2D sensibles à l'air. Ainsi, de nombreux groupes français s'intéressent aujourd'hui à la combinaison d'hétérostructures de van der Waals, avec un effort important dédié aux semi-conducteurs de **dichalcogénures de métaux de transition** (TMDs). Pour la microélectronique, ces matériaux représentent le canal ultime des transistors à effet de champ. Il est possible actuellement d'élaborer des matériaux tels que le MoS_2 sur de grandes surfaces (300 mm²) par différentes techniques de dépôt (Chemical Vapor Deposition - CVD, Atomic Layer Deposition - ALD, MetalOrganic Chemical Vapor Deposition - MOCVD). Comparé au silicium, l'absence de liaisons pendantes à la surface de ces matériaux 2D permet de s'affranchir du piégeage de charges à l'interface avec le HfO_2 ; cependant, la non maîtrise du dopage des TMDs rend la prise de contacts électriques délicate. Par ailleurs, ces matériaux 2D sont polycristallins sur SiO_2 avec des grains de moins de 50 nm, ce qui représente un défi majeur pour améliorer la qualité cristalline des couches 2D pendant le dépôt. De ce fait, la croissance par épitaxie par jets moléculaires (MBE) de TMDs (WSe_2, WS_2) est actuellement explorée et vise un contrôle de nucléation orientée ainsi qu'une maîtrise des défauts. Une voie prometteuse consisterait à transférer ces couches 2D optimales sur les puces de silicium par différentes techniques (voie humide, voie sèche, écaillage métal). A l'état de monocouches, ces TMDs deviennent des semi-conducteurs à gap direct. Pour l'optoélectronique, la très forte interaction coulombienne entre les porteurs de charge dans le plan des TMDs conduit à une énergie de liaison des excitons de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle des semi-conducteurs classiques, les rendant extrêmement stables à température ambiante. La brisure de symétrie d'inversion de ces cristaux et leur fort couplage spin-orbite conduisent à des propriétés de couplage spin/vallée très intéressantes, offrant la possibilité de contrôler à la fois la vallée et le spin par des règles de sélection optique chirales (« valleytronique »).

La **ferroélectricité** dans les matériaux 2D suscite également beaucoup d'attrait technologique de par leur compatibilité CMOS avec l'absence de liaisons pendantes et d'épaisseur critique, et génère des interrogations sur les limites de miniaturisation, l'origine de la ferroélectricité, et les mécanismes de renversement de la polarisation. Ainsi, dans les matériaux lamellaires tels que SnSe, SnTe, GeSe, un ordre ferroélectrique avec une polarisation dans le plan et une température critique au-delà de la température ambiante sont attendus. Néanmoins, la croissance de ces 2D ferroélectriques est rendue complexe par l'existence d'autres polymorphes. Un autre aspect intéressant de ces matériaux ferroélectriques lamellaires est la possibilité d'abaisser leur symétrie en diminuant leur épaisseur. Ainsi, alors que le SnS (ou SnSe) massif est centrosymétrique et possède un ordre antipolaire, un nombre impair de couches 2D devient non centrosymétrique et ferroélectrique. De plus, alors que le champ dépolarisant induit une épaisseur critique dans les ferroélectriques classiques, les ferroélectriques lamellaires y sont moins sensibles car (i) ils possèdent des porteurs libres ou des ions mobiles ($CuInP_2S_6$) capables d'écranter ces charges, (ii) les valeurs de polarisation sont plus modestes (μC/cm^2), (iii) ils possèdent des caractéristiques uniques telles qu'une imbrication des dipôles dans le plan et hors plan. Enfin, le caractère semi-conducteur des ferroélectriques 2D et la possibilité de moduler le gap avec le nombre de feuillets ouvre des perspectives en photonique. On parle aussi de ferroélectricité synthétique émergeant de deux matériaux 2D non polaires quand ils sont empilés avec des désorientations de réseau (h-BN/graphène). Ces effets sont maintenant étendus à d'autres dichalcogénures. Un autre défi avec les matériaux 2D est de pouvoir stabiliser un ordre ferromagnétique à longue distance à l'échelle de la monocouche. Parmi les matériaux possibles, les tellurures sont des candidats intéressants avec des températures de Curie proches de la température ambiante (180 K à 300 K). Ils présentent néanmoins de multiples phases et un contrôle fin de leur structure, stœchiométrie, anisotropie est nécessaire. Enfin, la forte sensibilité des matériaux ferromagnétiques 2D aux stimuli extérieurs tels que les contraintes, les effets du champ électrique, la lumière, et les effets de proximité ouvre le champ des perspectives avec un ajustement possible de leurs propriétés et fonctionnalités.

IV. Conditions extrêmes



© Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI)

La physique en conditions extrêmes est particulièrement vaste : dans tous les domaines, la possibilité de varier sur plusieurs dizaines d'ordres de grandeur des paramètres tels que pression, température, densité, champ électromagnétique ou encore la combinaison de plusieurs de ces paramètres permet d'étendre les connaissances au-delà des conditions standards, complétant la description et la compréhension des systèmes et milieux étudiés. Développées dans plusieurs laboratoires et présentes de façon évidente dans certains grands instruments (voir chapitre IX. Infrastructures de recherche), les mesures en conditions extrêmes permettent d'aborder de multiples sujets, faisant émerger de nouvelles techniques et ouvrant ainsi des perspectives riches et variées, aussi bien expérimentales que théoriques. En raison de la grande diversité des thématiques, motivations et pratiques, ce chapitre ne prétend pas traiter de toute la physique en conditions extrêmes, et se concentre de manière certainement non exhaustive sur les paramètres de pression, températures et champs électromagnétiques.

1. Hautes pressions

L'application de hautes pressions (HP) est un outil extrêmement puissant permettant d'induire des changements uniques dans la structure, les propriétés et le comportement de la matière. Au sein de l'INP on peut distinguer quatre domaines scientifiques fondamentaux :

Géophysique et physique planétaire : De nombreux domaines des géosciences reposent sur la reproduction des conditions extrêmes qui existent dans les corps planétaires. Caractériser la matière en conditions extrêmes peut fournir des informations précieuses sur de nombreux processus géophysiques, tels que (i) la compréhension de l'absorption et le transport d'eau dans les minéraux terrestres, (ii) les diagrammes de phase pression-température des minéraux, (iii) la formation des nouvelles structures avec des stœchiométries inusuelles et, (iv) les propriétés physiques de la matière dans les corps extraterrestres tels que les glaces planétaires, l'hydrogène ou d'autres éléments légers.

Physique à haute pression des matériaux quantiques : La haute pression permet de sonder les phénomènes émergents dans les matériaux quantiques. Par exemple, l'application de hautes pressions est nécessaire pour la caractérisation et la compréhension des diagrammes de phase magnétiques. En outre, la haute pression peut être utilisée pour induire différents comportements et propriétés, par exemple en magnétisme avec la stabilisation de nouvelles textures de spin (skyrmions…) ou l'émergence de la supraconductivité dans de nouveaux matériaux.

Science des matériaux sous haute pression : Les conditions extrêmes permettent un accès unique aux minima locaux dans le paysage énergétique d'un matériau. Cet accès est très pertinent pour la physico-chimie à haute pression, qui permet de synthétiser de nouvelles structures sous pression, ou pour les sciences des matériaux qui visent à élaborer de nouveaux matériaux synthétisés sous haute pression mais stabilisés à pression ambiante. L'application de la haute pression est également essentielle pour comprendre comment les matériaux se comportent dans des conditions externes extrêmes.

Biosystèmes et matière molle : L'application de la haute pression peut jouer un rôle essentiel dans les sciences biologiques et la matière molle et fournit des informations uniques pour une grande variété de problèmes tels que le prétraitement de la biomasse pour les applications biocarburants, l'amélioration du traitement des aliments ou de la stabilité des protéines, et l'étude de l'absorption du CO_2, de l'eau ou d'autres substances dans les matériaux poreux.

Quelques exemples

Nous détaillons ici quelques exemples de défis technologiques à relever dans les prochaines années dans le domaine des hautes pressions. Ces défis nous semblent fournir un angle de vue intéressant (quoique non exhaustif) sur l'état de l'art actuel de la technologie des hautes pressions en France et à l'international, ainsi que ses perspectives qui montrent la nécessité de poursuivre l'investissement du CNRS dans ce domaine, dans les années à venir.

Mesures de la supraconductivité sous HP : Depuis 5 ans, un intense programme de recherche a permis la synthèse sous haute pression de nouveaux hydrures aux propriétés exceptionnelles, potentiellement très prometteurs pour de réelles ruptures technologiques dans le stockage de l'hydrogène ou la supraconductivité haute Tc. Cela dit, les verrous technologiques constituent un défi et peu d'équipes à travers le monde (parmi lesquelles des équipes françaises rattachées au CNRS) maîtrisent une technologie permettant la mesure *in-situ* d'une résistivité nulle et la détection de l'effet Meissner, signatures indiscutables de la supraconductivité. Pour cela, des cellules amagnétiques miniaturisées devront être développées avec des solutions toroïdales pour atteindre les très hautes pressions nécessaires (supérieures à 200 GPa). Ces recherches ont initié de nouveaux designs d'enclumes et l'utilisation de nouveaux matériaux ultradurs pour les cellules HP pour obtenir « en routine » des pressions extrêmes. Ces développements technologiques auront aussi un impact sur la recherche en planétologie (par exemple pour la détermination des cœurs de Neptune ou d'Uranus qui sont principalement composés de matériaux hydrogénés à très haute pression).

Génération de pressions dynamiques : la compression dynamique de la matière, qu'elle soit provoquée par des sources de lasers pulsés ou des canons à gaz, permet d'explorer des états extrêmes de la matière, bien au-delà de la limite statique permise par la traditionnelle cellule à enclumes de diamant (CED). Cette approche explore des états « exotiques » de la matière comme la matière dense et chaude (*warm dense matter* -WDM) où la plupart des approximations utilisées en physique de la matière condensée ou en physique des plasmas deviennent caduques. Cette approche permet également le développement de thématiques multidisciplinaires pour la compréhension de la réponse mécanochimique de la matière (pouvant conduire à la synthèse de nouvelles phases métastables) sous des vitesses de déformation très élevées, et sur des échelles spatiales (microns ou moins) et/ou temporelles (ns) pertinentes. Cet effet cinétique de la compression sur les transitions de phases est également étudié en utilisant de nouvelles CED à membrane équipées d'un actionneur piézoélectrique, permettant d'atteindre 140 GPa en 2.5 ms. Les

développements actuels consistent à repousser cette limite pour atteindre des temps de compression de la centaine de microsecondes.

Reproduire en laboratoire les conditions de synthèses prébiotiques pour comprendre l'origine de la vie : Depuis les expériences de Miller en 1953, consistant à créer les briques élémentaires à l'origine de la vie par une combinaison d'arcs électriques et d'une atmosphère gazeuse, les avancées sur le sujet ont stagné. Les critiques émises sur ces expériences, portant notamment sur la faible probabilité d'avoir une atmosphère terrestre de cette composition, ont élargi le champ d'investigation. Différentes « sources » de recherche ont vu ainsi le jour, avec par exemple des sources extraterrestres via les météorites qui sont composées jusqu'à 10 % de matière carbonée, ou des sources hydrothermales associées à une vie foisonnante. La question de l'origine de cette vie en profondeur sans lumière et au contact d'un fluide à haute température et à haute pression reste à élucider. L'observation de ces sources hydrothermales à l'aplomb des dorsales océaniques indiquent clairement l'existence de toutes les conditions requises pour recréer en milieu aqueux, une « soupe » primitive favorable à l'émergence de la vie (i) les différents ingrédients, dihydrogène, ammoniac, méthane, gaz carbonique, monoxyde de carbone y sont présents, (ii) ces fluides concentrent des éléments chimiques qui peuvent servir de catalyseurs (métaux précieux), (iii) les synthèses des molécules organiques complexes à partir de composés simples sont des réactions qui nécessitent un catalyseur et des conditions de pression et température très similaires à celles des systèmes hydrothermaux. Si la technologie des autoclaves est aujourd'hui largement maîtrisée pour reproduire les conditions de pression et température des sources hydrothermales, le développement de modèles permettant de comprendre au niveau moléculaire les interactions clés nécessaires à la synthèse de molécules élémentaires constituant les organismes (acides aminés) à partir des éléments en jeu (gaz, minéraux, métaux catalytiques), demeure un défi scientifique majeur.

2. Physique des plasmas

Electrodynamique quantique en champ fort : Les installations laser de ~10 PW (ex : laser Apollon-Saclay, programmes ELI - Extreme Light Infrastructures-) produisent des intensités >10^{22} W/cm² capables d'accélérer des électrons et des ions à haute énergie. Des effets non-linéaires de nature relativiste et quantique décrits par l'électrodynamique quantique apparaissent alors : génération de sources gamma intenses, diffusion Compton non linéaire, phénomène de freinage radiatif, possibilité de s'approcher du champ de Schwinger (champ seuil de l'électrodynamique quantique à champ fort), ou encore production de paires électron-positron par les processus Breit-Wheeler et Bethe-Heitler. Un objectif majeur du domaine est la production d'un plasma d'électrons-positrons, aux propriétés exotiques, pour aborder en laboratoire les problématiques d'objets astrophysiques. L'électrodynamique quantique en champ fort (SFQED - *Strong Field Quantum Electrodynamic*) est actuellement en plein essor et ce d'autant plus que l'installation de recherche Apollon à Saclay, avec ses faisceaux PW et multi-PW, est idéale pour en explorer de nombreux aspects. De plus, les défis théoriques sont immenses car abordant des domaines inconnus. Afin d'obtenir les financements nécessaires aux futures expériences en champs forts, la communauté française, réunissant les compétences théoriques et expérimentales d'un ensemble de laboratoires, se fédère autour de projets. Citons notamment la collaboration Apollon-QED qui a pour objectifs de mettre en place une expérience de collision d'un faisceau laser avec un faisceau d'électrons énergétiques accéléré par sillage laser pour générer des photons gamma et des paires électron-positron.

Matière dense et chaude/tiède : Les compressions statique (CED) ou par choc laser sont des outils matures pour atteindre le régime de matière dense et chaude (WDM) à l'équilibre thermique. Ces conditions extrêmes (P ≈ 1-100 Mbar, T≈ 0,1-10 eV≈ 1000 – 100000K) ont un potentiel unique pour appréhender des intérieurs et histoires planétaires dans notre système solaire et au-delà.

Ces progrès en WDM reposent notamment sur le couplage uni-site de diagnostics structuraux par rayons X (XRD, XANES sur synchrotron ou XFEL) et des lasers très énergétiques (e. g. LMJ - laser Mega-Joule - ou classes Joule à kilojoules LULI 2000). L'exploration des propriétés physico-chimiques de cette matière soumise au teraPascal se fait avec des sources X extrêmement brillantes et focalisées (typiquement à l'Eu-XFEL, au LCLS, à SACLA et à l'ESRF), pour caractériser des échantillons de taille de plus en plus réduite (sub-micronique). Ces développements récents ouvrent de nouvelles perspectives pour sonder des conditions de pression spatialement et temporellement plus homogènes et s'appliquent par conséquent à un large choix de matériaux.

Un autre champ d'investigation de la WDM consiste à utiliser des impulsions ultra-brèves (utilisation de lasers fs) pour produire des conditions hors équilibre thermique (électrons chauds et réseau encore froid). Dans les années à venir, des efforts seront réalisés pour développer les études dans le régime hors équilibre résolues en temps, en particulier l'étude de la dynamique du chauffage des électrons, du transfert de l'énergie vers les ions puis vers la détente hydrodynamique, en passant par la modification de la structure électronique hors équilibre et son impact sur la dynamique des transitions de phase.

L'astrophysique de laboratoire par génération de plasma-laser s'ajoute aux méthodes d'observation traditionnelles en simulant quantitativement, avec une mise en échelle, des données qui peuvent être répétées et itérées. Cela concerne des phénomènes de grande échelle, comme les instabilités hydrodynamiques, la turbulence et les chocs, ainsi que ceux à petite échelle, comme les opacités, les effets cinétiques et les micro-instabilités. De plus, les écoulements instables en rapport avec les instabilités hydrodynamiques (Rayleigh-Taylor, Kelvin-Helmholtz) propres à l'astrophysique sont étudiés non seulement pour comprendre la physique des chocs, mais également comme sources potentielles de turbulence pour la génération des champs magnétiques, ou pour l'accélération de particules. Ces études expérimentales et théoriques ont un impact sur l'ensemble des études plasmas-laser aux hautes densités énergétiques et s'appuient notamment sur la physique atomique des plasmas. La spectroscopie associée permet d'interpréter les observables en termes de paramètres utiles (densité, température, champ EM, etc) pour extraire les propriétés du plasma. Cette spectroscopie atomique en présence de champs magnétiques intenses est en fait essentielle à toutes les expériences plasma menées avec de très hautes densités de photons. Une partie importante en est la physique très complexe des atomes à nombre atomique élevé. La modélisation des propriétés radiatives ouvre de nouveaux challenges (modèles de cinétiques, d'hydrodynamique, profils de raies couplés à des modèles de transferts radiatifs pour le calcul de spectres synthétiques).

La fusion thermonucléaire par confinement inertiel (FCI) vise une production d'énergie nucléaire décarbonée encore plus propre que l'énergie de fission. L'intérêt de cette approche est tout particulièrement renforcé par les récentes démonstrations expérimentales de FCI à la National Ignition Facility (NIF, USA) montrant une production nette d'énergie en comparaison de l'énergie investie pour la mise en condition du combustible, même si ce résultat reste sujet à débats. Les recherches en FCI sont un moteur pour la construction des installations laser mégajoule actuelles (NIF et LMJ entre autres), pour la physique des plasmas à haute densité d'énergie avec des retombées pour l'astrophysique de laboratoire et les applications de radiographie (protons etc.), et pour les méthodes algorithmiques et numériques de modélisation de ces systèmes complexes. A titre d'exemple, l'amélioration des mécanismes de lissage optique des lasers énergétiques constitue un enjeu majeur pour pouvoir maîtriser le développement des instabilités hydrodynamiques et paramétriques se produisant dans les plasmas de la fusion laser. De tels progrès ne pourront être réalisés qu'en s'appuyant sur le développement d'outils de modélisation. Ces projets réunissant expérimentateurs et théoriciens français du domaine, en collaboration avec des équipes internationales, sont déjà en cours et se développeront dans les années à venir notamment sur l'installation LMJ-PETAL.

La fusion par confinement magnétique (FCM) : La mise en œuvre optimale de la fusion thermonucléaire comme source d'énergie requiert une meilleure compréhension de la turbulence et du transport de particules et d'énergie dans les plasmas magnétisés. Contrôler le transport turbulent est un enjeu majeur des recherches en FCM accompagnant la construction d'ITER. Un autre point crucial est le contrôle de l'interaction du plasma avec la paroi : les parois internes des réacteurs à fusion sont en effet soumises à des flux extrêmes de chaleur, de particules et de neutrons en provenance du plasma. Ces parois subissent des modifications, qu'il s'agisse d'érosion, de déformations ou d'évolutions de leurs propriétés. Pour répondre à ces nombreux défis, des outils de diagnostics de plus en plus précis sont développés et implantés dans différents tokamaks tels que WEST, ASDEX Upgrade en Allemagne et TCV (Tokamak à confinement variable) à Lausanne (Suisse) avec pour objectif de comparer les différentes machines et leurs paramètres. En parallèle se développent des modélisations numériques bénéficiant des dernières avancées en calcul de haute performance. La confrontation des observations aux simulations numériques a pour but de valider les nouveaux régimes de fonctionnement afin d'obtenir des simulations fiables avant la mise en opération du tokamak d'ITER (~2035). Pour permettre ces avancées, le développement de tokamaks dédiés à la recherche fondamentale, plus compacts que ceux existants déjà mais nécessitant des champs

magnétiques plus intenses pour réduire le volume de confinement, sera nécessaire pour optimiser les procédés et avoir une compréhension plus fine des modes dans le plasma.

3. Champs magnétiques intenses

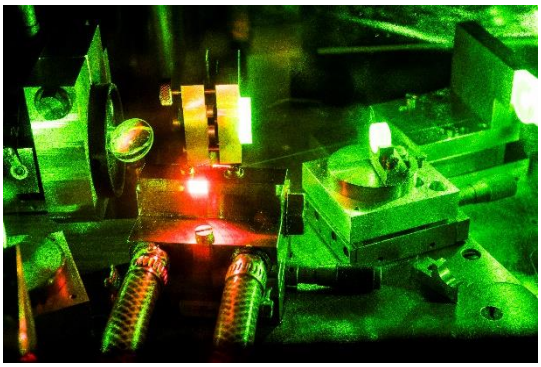
Les champs magnétiques intenses sont un outil extraordinairement puissant pour sonder en particulier la matière condensée mais aussi pour traiter des questions très fondamentales en électrodynamique quantique, physique des plasmas et astrophysique de laboratoire. Ils sont également de plus en plus utilisés en physique moléculaire, chimie, biologie, ingénierie et médecine. Combinés à des techniques de mesure et associés à d'autres paramètres externes comme la température ou la pression, ces champs offrent des capacités uniques pour étudier et contrôler les propriétés électroniques ou optiques des matériaux, observer des phénomènes inattendus et découvrir de nouveaux états de la matière. En faisant émerger de nouveaux concepts, ils génèrent des approches innovantes pour la physique à champ nul. Ces dernières années, les progrès des expériences en champs intenses (en termes de valeur maximale de champs, de volume et de temps disponibles, de stabilité temporelle et spatiale, et des conditions de températures et de pression) ont notamment conduit à des avancées incontestables dans la compréhension des diagrammes de phase (*H*, *P*, *T*) des matériaux quantiques comme les supraconducteurs, métaux fortement corrélés, semiconducteurs de basse dimensionnalité et systèmes magnétiques variés.

Dans les années à venir, les études en champs intenses à l'INP continueront de s'appuyer sur les opportunités uniques offertes par les installations de haut niveau du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (voir chapitre IX. Infrastructures de recherche) pour renforcer sa position dans les thèmes de recherche actuels ainsi que pour explorer des voies de recherche émergentes.

Les progrès technologiques pour la génération des champs magnétiques (statiques et pulsés) devraient notamment permettre de consolider et d'élargir la palette de techniques expérimentales et de ce fait être à l'origine de nouvelles découvertes en Physique. Ainsi, la mise en service prochaine du nouvel aimant hybride (champs statiques attendus à terme de 43 T) et le développement à plus long terme d'un aimant 40 T tout supraconducteur devraient conduire non seulement à une forte réduction de la consommation électrique mais aussi offrir une meilleure stabilité temporelle permettant la réalisation de certaines **expériences de spectroscopies** (optique, résonance magnétique) **nécessitant de très longs temps d'acquisition**. En champs pulsés, la fabrication de bobines multiples non destructives, dépassant les 100 T, s'appuiera sur les dernières avancées des recherches de **nouveaux conducteurs composites nanostructurés**, combinant conductivité électrique élevée et très haute résistance mécanique, ainsi que sur la modernisation récente du générateur (dont l'énergie est passée de 14 à 21 MJ) et de la fabrication récente d'un banc de condensateurs rapide. Les mesures de transport actuellement en développement pour des champs compris entre 150 et 200 T sur l'installation semi-destructive MégaGauss devraient également venir s'ajouter à l'éventail de techniques déjà disponibles (aimantation, spectroscopie THz). Souvent combinés à des conditions extrêmes de température (cryostat à ^{3}He ou à dilution ^{3}He/^{4}He) et de pression (quelques dizaines de GPa), ces progrès s'accompagneront inévitablement de nombreux développements des environnements échantillon pour conserver ou même étendre les gammes accessibles. L'accès à de telles conditions de mesure en champs devrait permettre d'explorer tous les états exotiques induits par le champ magnétique : **états liquides de spins**, **états supraconducteurs** réentrants ou texturés, ainsi que les **transitions de phase quantique** conduisant à de nouveaux états magnétiques ou électroniques. Il devrait également ouvrir de nouvelles perspectives dans l'étude des **matériaux 2D**, **matériaux topologiques** ou **supraconducteurs** dont l'intérêt pour des applications potentielles en informatique quantique, spintronique ou métrologie est croissant.

Ces progrès auront également des répercussions sur les installations de champs (statiques et pulsés) fabriquées spécifiquement pour **les sources de rayonnement** (synchrotrons, neutrons, sources laser et XFEL). Ces dispositifs de champs vont en effet continuer à se développer afin de pouvoir élargir la gamme de techniques (les mesures pompe-sonde ou de diffusion magnétique viendront s'ajouter aux mesures de diffraction et de spectroscopies) et de sujets possibles notamment en Physique de la matière condensée (ondes de densité de charges – synchrotron et XFEL, systèmes de spins quantiques – neutrons). En astrophysique de laboratoire, l'augmentation des champs produits pour les expériences sur les sources laser intense devrait quant à elle permettre d'étendre les études aux jets d'accrétion, à la formation et évolution des étoiles, formation des planètes ou encore au spectre des rayons cosmiques.

V. Optique



©Hubert RAGUET/LKB/CNRS Images

Dans les prochaines années, l'optique devrait connaître des développements dans les matériaux pour l'optique, les nanosources, les lasers avec des applications en nanotechnologies, éventuellement quantiques, en métrologie ou dans l'étude de l'interaction lumière-matière à de très courtes échelles temporelles ou spatiales. La plasmonique et la nanophotonique seront utilisées pour exacerber des propriétés optiques. Enfin l'imagerie en conditions extrêmes (très haute résolution, grande sensibilité, grande rapidité, en milieux diffusants) est un domaine très dynamique.

1. Matériaux pour l'Optique

Nanomatériaux luminescents

La nanophotonique étudie des nanomatériaux luminescents afin de réaliser des lasers ou des sources de photons uniques dans des circuits photoniques et autres technologies quantiques. Leur sensibilité à l'environnement permet de développer des capteurs et on commence aussi à les utiliser comme nano-absorbeurs.

Parmi les nanomatériaux dont le développement est le plus prometteur, on peut citer (i) les centres du diamant, en particulier pour les applications à la nanomagnétométrie, une de leurs transitions étant très sensible au champ magnétique, et pour l'optomécanique quantique, (ii) les pérovskites qui présentent un excellent rendement dans les cellules solaires, (iii) les nanocristaux semi-conducteurs dont la petite taille et la brillance en font d'excellents marqueurs en bioimagerie, (iv) les nanomatériaux à base de terre rare pour la réalisation de nanolasers ou pour leur utilisation en magnétométrie, en exploitant leur transition magnétique intense, (v) les matériaux 2D avec défauts pour créer des sources de photons uniques, tels que le nitrure de bore hexagonal (voir aussi chapitre III. Nouveaux matériaux).

Scintillateurs et cristaux grandes tailles

Les matériaux scintillateurs sont au cœur de la chaîne de détection des rayonnements ionisants dans de nombreux secteurs tels que la sécurité du territoire, l'imagerie médicale (radiologie, tomographie à émission de positron), la métrologie de la radioactivité, la recherche pétrolière…Avec les métamatériaux, obtenus par nano-assemblage, il s'agit d'implémenter des effets photoniques pour contrôler l'émission de lumière, pour l'imagerie ou pour augmenter la luminosité des grands instruments (synchrotrons, accélérateurs…). Les enjeux économiques sont liés aux capacités de synthèse de cristaux de très grande taille uniformes pour leurs performances. Ces composants optiques sont utilisés pour l'interférométrie gravitationnelle à température cryogénique ou pour les lasers de très haute puissance.

2. Lasers

Un effort important est dédié au développement de nouvelles sources laser opérant sur des gammes plus larges, allant du VUV (Vacuum UltraViolet) au terahertz (THz), à impulsions de plus en plus courtes (attosecondes - 1 as = 10^{-18} s), ou utilisant des nanomatériaux luminescents inclus dans des nanocavités photoniques.

Sources THz

Avec des applications dans le domaine de l'imagerie et du quantique, les sources THz se sont beaucoup développées, tout d'abord par les lasers à cascade quantique. Néanmoins, de gros efforts de développements sur les sources sont encore nécessaires pour exploiter pleinement les propriétés des ondes THz. On peut notamment citer les sources THz « électroniques » et celles fondées sur la différence de deux fréquences optiques générées dans un cristal non-linéaire, par des impulsions laser ultra-intenses, ces dernières ouvrant la voie à des mesures impulsionnelles.

Sciences attosecondes

Les technologies attosecondes basées sur l'optique hautement non-linéaire permettent l'étude de la dynamique des électrons à l'échelle de l'angström au moyen d'impulsions XUV (UV extrême). Au-delà de l'observation des processus ultrarapides impliquant les constituants élémentaires de la matière, elles permettent d'envisager des protocoles de contrôle en agissant de manière cohérente sur les électrons afin de façonner des réactions chimiques ou de modifier les propriétés de matériaux. D'abord appliquées à l'étude de systèmes quantiques en physique atomique, les sciences attosecondes évoluent vers l'étude de systèmes complexes : larges molécules isolées ou en phase liquide, matière condensée et matériaux. Elles permettront notamment d'identifier les premiers degrés de liberté microscopiques impliqués dans la photo-activation ou les dommages radiatifs de protéines, brin d'ADN et autres bio-polymères.

La lumière façonnée à l'échelle attoseconde permettra également la manipulation d'excitons dans les matériaux bidimensionnels, d'initier des transitions de phase, ou des ordres topologiques dans les matériaux. Les contrôles de la cohérence et de l'intrication pourront s'opérer à l'échelle sub-femtoseconde pour fabriquer des sources d'électrons et de lumière aux propriétés quantiques nouvelles avec des applications en information et détecteurs quantiques.

Les premières sources attosecondes de rayons X commencent à voir le jour sur les lasers à électrons libres (XFEL) mais également au moyen de sources laser de table. Elles permettent de combiner résolution temporelle (attoseconde) et spatiale (angström) pour suivre les dynamiques de charges et d'énergie dans la matière. La manipulation des propriétés spatiales et temporelles des impulsions attosecondes (polarisation complexe, moment angulaire) ouvrent de nouveaux champs d'applications pour l'étude des propriétés magnétiques, de spin, et de symétrie moléculaire ou de matériaux en général.

La description théorique en science attoseconde nécessite des approches combinant la description de l'interaction lumière-matière et de ses conséquences sur la dynamique des électrons et noyaux, jusqu'aux échelles de temps macroscopiques. Intrinsèquement multi-échelles, ces études bénéficieront des méthodes d'Intelligence Artificielle (IA) qui apportent de nouvelles approches pour obtenir des modèles prédictifs.

3. Métrologie

Les mesures de temps et d'intervalles atteignent aujourd'hui des niveaux de précision vertigineux, grâce notamment aux apports des domaines de l'optique et de la photonique. La spectroscopie de très haute précision est rendue possible par le développement de sources lasers de qualité métrologique de haute stabilité et de grande précision. L'équipex Refimeve (REseau FIbré Métrologique à Vocation Européenne) permet de distribuer une référence de temps et de fréquence de qualité métrologique à une vingtaine de laboratoires ainsi que vers les instituts métrologiques de différents pays européens avec des applications dans différents domaines scientifiques ou non, de la physique fondamentale à des applications variées. L'impact de Refimeve dans les années à venir devrait porter sur différents aspects de la métrologie : stabilisation de lasers ; élaboration de bases de données en physico chimie et en physique moléculaire de l'atmosphère et de l'univers ; redéfinition de la seconde et élaboration d'une échelle de temps internationale ; synchronisation pour la physique des hautes énergies et les observations astrophysiques ; synchronisation pour les télécommunications pour le très haut débit avec des applications à la finance, aux systèmes de navigation et aux communications quantiques ; application en géodésie pour le suivi du niveau des mers et en sismologie ; recherche de matière noire et tests de relativité générale.

Au-delà de la recherche faite au sein des laboratoires de métrologie aussi bien sur les horloges, les senseurs inertiels (gyromètres et gravimètres atomiques) que sur les mesures des constantes fondamentales pour des tests d'électrodynamique quantique (tels que par exemple, la mesure de m_e/m_p), la

métrologie quantique s'effectuera aussi dans le cadre de collaborations de laboratoires français avec de grandes installations scientifiques internationales. Citons par exemple la détection des ondes gravitationnelles (VIRGO[26]), les tests du principe d'équivalence (CERN) sur l'anti-hydrogène (GBAR) ou sur les états quantiques gravitationnels de l'hydrogène.

4. Nano-Optique et ingénierie de l'interaction lumière matière

La nano-optique se divise en deux branches : la plasmonique faisant intervenir les plasmons localisés ou propagatifs à la surface de nanomatériaux ou de surfaces métalliques, et la nanophotonique reposant sur des milieux diélectriques à fort indice. Le fort confinement et les forts champs dans les cavités photoniques ou plasmoniques permettent d'observer des effets de couplage fort pour des émetteurs placés dans ces cavités.

Sources actives en nanophotonique et plasmonique

En plasmonique, la forte concentration du champ aux interfaces permet d'exacerber l'interaction lumière-matière, d'augmenter la luminescence de nanomatériaux. Les nano-antennes plasmoniques permettent d'optimiser des caractéristiques spécifiques d'émission de nanomatériaux (efficacité, directivité, brillance…) et de renforcer certaines propriétés (polarisation, chiralité, …). La nanophotonique diélectrique, incluant les nanocavités de cristaux photoniques, est une alternative à la plasmonique. En effet, les pertes y étant bien plus faibles, des forts facteurs de qualité y sont atteints, aux dépens d'un moindre confinement. Les fortes interactions et les forts champs permettront de réaliser des nanosources non linéaires et intégrables avec des applications en technologies quantiques.

Interaction nanomatériaux/lumière en nanophotonique et plasmonique

Dans leur version passive, les métamatériaux plasmoniques permettent de réaliser une ingénierie du front d'onde et d'aller vers la réalisation de circuiterie à l'échelle nano. Comme alternative aux métaux, d'autres matériaux tels que les semi-conducteurs ou des nitrures métalliques réfractaires sont explorés pour accéder à d'autres plages de longueur d'onde, présenter des interactions lumière-matière renforcées, ou être utilisés dans des environnements plus extrêmes. Les pertes importantes des métaux conduisent à envisager d'autres options, tels que des milieux diélectriques à fort indice. A l'instar de ce qui est exploré avec les matériaux plasmoniques, les métamatériaux en tant qu'antennes diélectriques rencontrent un intérêt croissant. En particulier, ils jouent un rôle important dans l'étude de la chiralité. Le développement récent des surfaces topologiques plasmoniques ou diélectriques, ouvre la voie à des composants optiques résistants aux perturbations et aux défauts.

Interactions optiques à l'échelle nano : couplage fort et non linéaire

Le régime de couplage fort lumière-matière se produit quand l'interaction entre un photon et une excitation de la matière prévaut sur les pertes du système. Cette interaction ne peut alors plus être considérée comme une perturbation et des états hybrides exciton/photon sont créés. Ce couplage fort dans les milieux condensés a été mis en évidence pour un grand nombre d'émetteurs couplés à une cavité diélectrique ou plasmonique et très récemment avec un émetteur unique. Les efforts portent actuellement sur l'observation du couplage fort pour différents types d'émetteurs avec des cavités. Un des objectifs est d'observer des effets de cohérence soit entre émetteurs, soit entre différents systèmes (émetteurs+cavité en couplage fort).

Le couplage fort et les interactions non linéaires en microcavité de semi-conducteur ont permis de mettre en évidence la condensation de Bose et la superfluidité de polaritons. Le domaine ouvert par cette analogie de l'optique non linéaire des polaritons avec la physique des fluides, très riche, ouvre également le domaine émergent de la simulation de trous noirs et l'observation en laboratoire d'un équivalent de l'effet Hawking.

[26] http://public.virgo-gw.eu/la-collaboration-virgo/

Dans les années 2000, le couplage fort avec des matériaux organiques beaucoup moins ordonnés a également été mis en évidence. Deux directions en ont émergé : d'une part le couplage fort entre une molécule unique et un mode optique, en l'occurrence un mode plasmon très localisé, et d'autre part le couplage avec un grand nombre de molécules. Le couplage fort avec une molécule unique ouvre la voie à des applications dans le domaine de l'information quantique ou à des commutateurs tout optique à ultra basse puissance. L'intérêt du couplage fort sur un ensemble est plutôt relié au transfert d'énergie et à la cohérence induite entre les molécules. En effet, l'hybridation entre un mode électromagnétique étendu et un ensemble de molécules amène à la formation d'états étendus cohérents reliant les états excités d'un grand nombre de molécules. Des expériences de transfert d'énergie potentiellement utiles pour l'excitation de laser à polaritons organiques ou d'augmentation de conductivité induite par le couplage fort ont permis d'exploiter ces états étendus. Les développements récents du couplage fort ne s'intéressent plus uniquement aux modifications des propriétés optiques, mais cherchent à altérer des propriétés de la matière comme la réactivité chimique ou le magnétisme, en modifiant l'énergie de transitions intervenant dans ces phénomènes. Cette démarche générale est très prometteuse. Ainsi, en hybridant des transitions vibrationnelles de molécules bien choisies, une sélectivité chimique induite par du couplage fort a été démontrée.

5. Imagerie

Imagerie pour le vivant

L'imagerie optique poursuit son développement en lien avec la biologie (voir chapitre VII. Physique et vivant). Les questions de résolution, de contraste, de compatibilité avec le vivant, de possibilité de suivre en temps réel l'évolution, sont centrales et motivent les développements en cours. On distinguera deux types d'imagerie :

(i) l'imagerie avec marquage : l'imagerie de fluorescence avec ou sans résolution temporelle associée aux temps de vie (FLIM – Imagerie en temps de vie de fluorescence) permet de faire une imagerie plein champ et de suivre l'évolution temporelle d'un échantillon. On réalise ainsi une imagerie multidimensionnelle où la variable d'espace est associée à une variable temporelle caractéristique du milieu qui modifie le temps de vie de fluorescence.

(ii) l'imagerie sans marquage : l'imagerie non linéaire basée sur le doublement ou le triplement de fréquence dans des matériaux du vivant permet de gagner en résolution spatiale transverse et axiale.

Imagerie multipixel de grande sensibilité et imagerie rapide

Le développement et la commercialisation de cameras SPAD (Single-Photon Avalanche Diodes) permettant d'avoir une réponse de grande sensibilité non plus sur un unique pixel comme dans les photodiodes à avalanche mais sur un grand nombre de pixels, ouvrent la voie à l'imagerie de grande sensibilité et avec une excellente réponse temporelle. Il devient possible de faire des images FLIM sur une zone entière. Le domaine de l'imagerie quantique où il s'agit d'extraire une information sur des corrélations spatiales quantiques de faisceaux traversant un milieu diffusant est un domaine émergent grâce à de tels détecteurs. L'imagerie rapide se développe également autour des caméras dites évènementielles ou caméras neuromorphiques basées sur la détection de changements de luminosité, donc de mouvements. Les avancées en résolution temporelle sont liées aux progrès algorithmiques de traitement d'image.

Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

L'imagerie élémentaire basée sur le principe de la LIBS (spectroscopie d'émission optique de plasma créée par laser) est en plein essor. Les domaines d'applications sont : la santé (imagerie de contaminant de cellules biologiques ou de biopsies), l'énergie (analyses du Lithium dans les batteries, photocatalyse), la culture (analyse d'objets du patrimoine et matériaux d'intérêt archéologique). Les verrous identifiés sont : (i) l'amélioration de la résolution spatiale, (ii) une quantification absolue de niveau métrologique, (iii) l'accélération de la prise de données, et accélération du traitement des données au travers de l'IA, (iv) la multi-modalité au travers par exemple du couplage de l'approche LIBS avec l'imagerie par spectrométrie de masse (LIBS-MALDI) ou la fluorescence (LIBS –LIF).

Optique en milieu diffusant

L'imagerie en profondeur ou l'imagerie de polarisation ont leurs performances fortement réduites par la transmission dans des milieux troubles. Les méthodes optiques pour s'affranchir de ces problèmes sont en constant progrès, en termes de résolution spatiale et temporelle, et de contraste. Elles utilisent des techniques d'optique adaptative, et de mise en forme ou gestion du front d'onde pour corriger les réponses linéaires et non-linéaires (voir chapitre VI. Complexité). On peut reconstruire l'image à partir des informations contenues dans les grains de speckle. Le traitement algorithmique des signaux détectés aboutit à la reconstruction des matrices de transmission. Les avancées sont très attendues pour les applications à la matière biologique et à la matière molle plus généralement, ainsi que pour les transmissions optiques au travers de brouillard, de turbulences atmosphériques, ou de milieux turbides.

VI. Complexité

La complexité est une propriété qui peut en fait s'appliquer à tous les systèmes et phénomènes physiques. Nous avons sélectionné dans ce chapitre deux classes de complexité. D'une part, la complexité liée à un grand nombre de degrés de liberté et aux processus multi-échelles (spatiales et/ou temporelles) de la matière, et d'autre part la complexité due aux interactions régissant le système physique d'intérêt. Les thèmes traités, plus ou moins détaillés, sont des exemples qui nous ont paru importants dans ce contexte. La dernière partie du chapitre est dédiée à un sujet d'intérêt fondamental et sociétal, qui combine les deux types de complexité : le climat.

© Antoine MATHIEU / LEGI / CNRS Images

1. Matières complexes

Systèmes désordonnés

Les milieux désordonnés rassemblent des systèmes extrêmement variés allant des matériaux vitreux aux bancs de poissons en passant par les tissus biologiques. La physique des milieux désordonnés propose d'étudier ces systèmes aux diverses échelles spatiales et temporelles en utilisant les approches méthodologiques de la Physique.

Les matériaux désordonnés "passifs" étudiés de longue date par les physiciens (par exemple les verres, les milieux granulaires, les matériaux amorphes, ...) bénéficient de progrès importants de la physique statistique hors-équilibre. L'étude de l'émergence et la description d'effets collectifs (formation de mémoire, de structures d'écoulements, ...) est un défi à la fois expérimental et théorique. L'identification des propriétés mécaniques complexes (zones fragiles, tremblements de terre, ...) par l'utilisation de méthodes d'apprentissage profond (deep learning) se développe activement. Les matériaux désordonnés (réseaux de matériaux anisotropes, diphasiques, polydisperses, ...) sont l'objet d'un intérêt renouvelé.

Amorphes, instables thermodynamiquement, fragiles, les **verres** suscitent encore de nombreuses questions au niveau fondamental. Les verres se déclinent en une large variété de familles : oxydes, chalcogénures, métalliques, pour des applications variées. On peut citer les grands enjeux suivants liés à une compréhension multi-échelles des verres : (i) dynamique de relaxation des verres : comment décrire les minima du paysage énergétique, les réarrangements atomiques, les mécanismes de vieillissement, les mécanismes de formation des nanohétérogénéités dans les verres lors de la trempe, la problématique des verres ultrastables, la rupture de l'ergodicité ?; (ii) réponse des verres à une sollicitation mécanique : améliorer la compréhension des mécanismes de l'initiation des fissurations dans les verres, établir des liens structure-plasticité-fragilité-chimie du verre (par exemple, pour les verres silicates, ajouts d'ions alcalins, alcalino-terreux, bore,…) ; (iii) polyamorphisme : concevoir des verres de densité et de structure différentes

en suivant des chemins de pression et température (proche ou au-dessus de la transition vitreuse), exploration du comportement thermodynamique de verres densifiés, …

Parmi les systèmes désordonnés, on trouve également la matière composée d'entités individuelles actives qui consomment de l'énergie localement afin de se propulser dans leur milieu environnant (particules Janus, rouleur de Quincke, nageurs interfaciaux…). Lorsque la fraction volumique de ces entités en interaction est suffisante, on peut voir émerger des **effets collectifs** dans ces systèmes. La description par la physique statistique hors d'équilibre de la matière active devient alors indispensable pour comprendre le comportement à grande échelle. Les développements expérimentaux visant à la création d'objets individuels auto-propulsés et dont on peut contrôler les interactions (champs extérieurs, chiralité…) vont continuer de prendre de l'ampleur dans les années qui viennent. L'extension à des assemblées d'entités vivantes (essaims d'animaux, foules humaines) ou complexes (essaims de drones), est un défi à la frontière entre physique et éthologie. Enfin, le comportement de la matière active en présence de désordre gelé (bactéries dans des milieux poreux) ou fluctuant (plancton dans un écoulement turbulent) est l'objet d'importants développements.

Auto-assemblage et auto-organisation

Les systèmes organisés résultent de l'auto-assemblage d'objets en modulant les interactions (électrostatiques, déplétion, van der Waals, hydrophobes…). Lorsqu'ils sont constitués, ces assemblages peuvent s'organiser entre eux pour former des structures plus complexes, en régime dilué ou concentré avec parfois de fortes hétérogénéités spatiales ou temporelles. Ainsi, il est essentiel de comprendre les aspects structuraux et dynamiques de ces assemblages multi-échelles à partir des interactions entre briques élémentaires (nanoparticules, colloïdes, (macro)molécules, cellules, bactéries…) constituant ces systèmes organisés. Les développements technologiques des dernières années (microscopie, sources lumineuses, …) permettent actuellement de suivre *in situ* la nucléation et la croissance des systèmes auto-assemblés ainsi que l'évolution de l'organisation de ces systèmes lorsqu'ils sont soumis à des champs extérieurs (électrique, magnétique, acoustique, écoulement…). Un intérêt majeur est porté depuis quelques années sur l'utilisation d'objets anisotropes tels que les nanotubes, nanofils, nanotriangles, formant des supracristaux aux propriétés optiques uniques. Les cristaux liquides nématiques sont aussi un exemple historique de phases ordonnées à l'équilibre thermodynamique qui reçoit un regain d'intérêt suite à la découverte récente de plusieurs nouvelles phases nématiques (splay, twist bend, ordre polaire) prédites théoriquement. En particulier, la phase nématique polaire induite couplant chiralité et polarisation des molécules (mésogènes) pourrait avoir des applications uniques pour l'optique photonique. Une des voies émergentes est de guider l'auto-assemblage des briques élémentaires pour l'optimisation de matériaux multifonctionnels, en particulier pour des applications dans le domaine de l'énergie. La physique de la matière molle reste un champ disciplinaire très actif. Une tendance actuelle est de réaliser des structures auto-assemblées bio-inspirées afin de concevoir des puces aussi efficaces que les cellules individuelles. De manière similaire, la physique aux interfaces des systèmes (auto)organisés est fortement étudiée avec une attention particulière aux effets de mouillage, de séchage et aux instabilités.

La séparation de phase liquide-liquide (LLPS) ou coacervation complexe est un exemple de processus thermodynamique conduisant à l'auto-organisation de mélanges de deux ou plusieurs espèces moléculaires, grâce à la séparation spontanée en deux ou plusieurs "phases" homogènes et où chaque phase est enrichie en l'une des espèces moléculaires. La LLPS est un phénomène général qui est souvent mis à profit en science des matériaux par exemple. La dernière décennie a vu une explosion de la recherche sur la séparation de phases liquide-liquide (LLPS) pour des édifices chargés (polyélectrolytes, ions mono ou multivalents) du fait de la description encore approximative qui existe des polyélectrolytes et à cause de leur implication dans des processus biologiques (voir chapitre VII. Physique et vivant). Une grande partie de la compréhension physique actuelle des LLPS est basée sur la modélisation de la séparation de phase des polymères, et s'appuie sur une théorie modifiée de l'adaptation aux systèmes chargés du modèle de Flory-Huggins, qui décrit la thermodynamique de la séparation de phase des polymères non chargés. Sur le plan fondamental, les grands enjeux concernent la modélisation des corrélations ioniques dans les polymères chargés, la compréhension des rôles du confinement, d'un environnement encombré et multi-composant et la caractérisation expérimentale multi-échelles qui nécessite analyse physique et chimique.

2. Interactions complexes

Architectures moléculaires

Les progrès récents en instrumentation et technologie, que ce soit les sources d'excitation, les techniques de détection, ou la mise en forme d'échantillons, vont permettre des avancées considérables dans la connaissance fine de systèmes moléculaires de plus en plus complexes ou exotiques, neutres ou ioniques, isolés ou en interaction avec des surfaces, des solvants ou des solides. La compréhension des architectures moléculaires dans la continuité des phases, de la phase gazeuse à la phase condensée, devient envisageable, comblant l'écart entre les visions actuelles des approches « bottom-up » (de la molécule isolée au complexe ou agrégat de plus en plus grand) et « top-down» (du système de dimension macroscopique aux particules nanoscopiques).

D'une part, l'accès aux sources de haute énergie, avec des temporalités extrêmes, notamment au travers des grandes infrastructures de recherche (IR*) internationales, ainsi que le développement du domaine THz, apportent de nouveaux moyens pour sonder les édifices moléculaires, de leurs signatures rotationnelles à la connaissance de leurs états très excités, des liaisons intermoléculaires faibles aux couplages forts entre entités formant l'édifice. D'autre part, les **méthodes spectroscopiques** se diversifient et se complexifient. On peut citer les évolutions toujours d'actualité en spectroscopie à base de peignes de fréquence, en spectroscopie non-linéaire et/ou multidimensionnelle, donnant par exemple accès aux processus cohérents, en spectroscopie chiroptique (développements récents en non linéaire, ou en résolution temporelle extrême) ; la spectroscopie d'action qui consiste à analyser un système moléculaire sur une observable (transition optique, masse, ..) en faisant varier un paramètre indirectement relié (transition optique différente, taille, charge, ..) s'enrichit en mêlant différents outils (optiques, mécaniques, acoustiques, électriques, ..). L'accès aux processus moléculaires ultra-rapides est en plein essor grâce aux sources femto- et maintenant atto-seconde. Les informations ainsi obtenues sur les propriétés structurelles et dynamiques deviennent plus complètes et plus précises. Les interactions laser-molécules peuvent servir non seulement à sonder les molécules, comme dans certaines des spectroscopies mentionnées précédemment, mais aussi à agir sur les processus moléculaires même (voir chapitre V. Optique).

L'analyse fait intervenir des **développements théoriques** (chimie quantique, physique statistique), et des modélisations numériques sophistiquées qui deviennent des outils extrêmement pertinents et indispensables. Les récentes avancées théoriques prometteuses se nourrissent des progrès obtenus dans des communautés différentes, combinant méthodes classiques et quantiques, avec notamment des approches multiéchelles ou dépendant du temps, nécessaires aux études dynamiques des systèmes complexes. L'utilisation de l'IA dans ce domaine est de plus en plus mise à contribution pour le traitement des données toujours plus nombreuses, voire massives, ainsi que pour la prédiction de processus moléculaires. Tout cela ouvre la porte à l'étude approfondie de systèmes très variés : outre l'analyse de systèmes de plus en plus grands, les études spectroscopiques et dynamiques d'espèces instables (radicaux, espèces transitoires) ou ioniques deviennent performantes ; les interactions avec un environnement (solvatation, édifices supportés, …) ou la réactivité seront ainsi mieux comprises.

Ces travaux au niveau moléculaire sont et seront de très grande importance pour aborder la complexité moléculaire du **milieu interstellaire**. Par exemple, les mesures spectroscopiques de plus en plus précises, notamment grâce au déploiement du réseau REFIMEVE+, servent à la détection et la prédiction de nouvelles espèces, en regard avec les données des nouvelles - et anciennes - missions spatiales (e.g. JWST). La compréhension de la formation des molécules en phase gazeuse ou sur grains a besoin des connaissances sur la dynamique des transferts d'énergie, sur les couplages entre états excités, ou sur la réactivité en surface, etc…Des effets quantiques spécifiques peuvent aussi intervenir dans les processus à basse température.

Les études sur les édifices moléculaires sont et seront également indispensables dans le domaine incontournable de la **physico-chimie des atmosphères**, avec notamment des expériences *in situ* de plus en plus fines, dans le THz en particulier. En lien avec la problématique climatique (voir plus loin), les aérosols, les gaz à effet de serre, la réactivité atmosphérique, la chimie radicalaire, les transferts radiatifs (entre autres) sont objets de travaux bénéficiant des avancées décrites précédemment. Les développements instrumentaux reliés donneront lieu par ailleurs à des applications industrielles plus faciles et plus courantes (détection de traces par exemple).

On n'oubliera pas le domaine des **biomolécules** avec la caractérisation structurale et dynamique d'édifices de plus en plus grands et une meilleure connaissance des processus biologiques à l'échelle moléculaire. Les phénomènes impliquant la chiralité de la matière ou le spin de l'électron attirent un intérêt

croissant. Le rôle de l'environnement, bien analysé, peut devenir contrôlé et manipulable. L'aspect multi-échelles temporel et structurel est crucial, son analyse permet de lier les travaux de différentes communautés et d'obtenir une vue plus complète des processus, dans les domaines biologiques ou atmosphériques notamment.

Enfin, la construction de nouveaux matériaux à base de molécules fonctionnalisées ou supportées ou de systèmes hybrides (pour le photovoltaïque, l'optronique, l'électronique moléculaire, …) passe par une connaissance en profondeur des propriétés moléculaires, notamment à diverses échelles spatio-temporelles.

Propagation d'onde

La complexité est un concept clé pour la recherche actuelle concernant la propagation d'ondes. Elle peut tout d'abord intervenir dans l'étude, la modélisation et le contrôle de la propagation d'ondes dans des milieux complexes caractérisés par un grand nombre de degrés de liberté et des variations aléatoires éventuellement rapides. Ce cas recouvre la propagation d'ondes optiques à toutes les longueurs d'onde, ainsi que d'ondes mécaniques (acoustiques, sismiques, de surface, …). Les grands sujets d'étude concernent la compréhension de la propagation dans ces milieux (effet mémoire notamment), mais aussi son contrôle (focalisation ou optimisation du transport en milieu diffusant, propagation d'information, optique adaptative "extrême"). Ces objectifs peuvent s'appuyer sur des interactions multi-ondes (acousto-optique ou opto-acoustique). Les grands domaines d'applications sont l'imagerie en milieu diffusant, la caractérisation des milieux complexes, la propagation dans les fibres optiques.

La complexité se retrouve également dans l'étude des ondes de surface, où elle provient des fortes non linéarités et instabilités.

Enfin, un domaine d'étude très dynamique est l'étude de la propagation d'ondes de matière dans le domaine de la matière active et la biophysique (étude de mouvements collectifs d'objets artificiels ou de cellules, par exemple *swarming*, mouvements collectifs dans les tissus), où la complexité provient de l'apport d'énergie dans le système, de la variabilité biologique, ou de mécanismes actifs de rétroaction cellulaire.

L'ensemble de ces sujets est porté par des innovations matérielles (modulation de front d'onde précis et rapide, imagerie haute résolution rapide) et l'augmentation des puissances de calcul (analyses de grands volumes de données, possibilité de rétroaction rapide), ouvrant la voie à l'étude de questions peu accessibles jusqu'alors (grand nombre de degrés de liberté, analyses multi-échelles spatiales et temporelles).

Turbulences

La turbulence est un phénomène complexe non linéaire et multi-échelles qui est, indépendamment de ses applications (transport de polluants, mélange, dynamique atmosphérique, ...) un objet d'intérêt pour de nombreux domaines de la physique.

La description des propriétés statistiques de la turbulence reste un problème d'intérêt (i) fondamental dans l'utilisation des méthodes de la physique statistique (par exemple, techniques de renormalisation pour une turbulence homogène, isotrope et pleinement développée), et (ii) expérimental (mesure de la cohérence des fluctuations de vitesse, ...). Les études sur la turbulence dans l'hélium superfluide sont des défis expérimentaux et théoriques. Si les similitudes avec la turbulence classique sont bonnes aux grandes échelles, les mécanismes aux plus petites échelles restent à comprendre. Le mélange turbulent, même dans son paradigme le plus simple (mélange d'un scalaire passif), est un problème difficile à traiter quantitativement, et présente des caractéristiques dont les aspects universels ou anomaux restent à élucider. Les interactions entre les écoulements turbulents et les structures déformables font l'objet de nouvelles études comme par exemple le rôle des fluctuations extrêmes des contours mécaniques, ou les interactions avec des milieux érodables. Les progrès instrumentaux tels que l'imagerie à haute résolution spatiale et temporelle permettent des avancées significatives dans la description des écoulements. Le développement de l'apprentissage automatique a de nombreuses applications telles que la détermination empirique des relations de fermeture.

Des études récentes montrent que des systèmes modèles de matière active (par exemple des micro-nageurs autopropulsés) présentent des fluctuations de vitesse suivant des lois d'échelle, dont les liens avec la turbulence inertielle usuelle restent à préciser.

3. Climat

L'urgence du réchauffement climatique a mis la science du climat au centre de l'attention et de l'intérêt de la communauté des chercheurs en Physique. Il ne s'agit pas que des préoccupations d'ordre sociétal et écologique qui demeurent, évidemment, fondamentales. On assiste aussi à des approches méthodologiques et théoriques nouvelles pour étudier des phénomènes qui échappent aux outils existants. Le cadre paradigmatique est celui d'un système complexe, le climat, qui, par sa nature, demande et favorise des compétences interdisciplinaires.

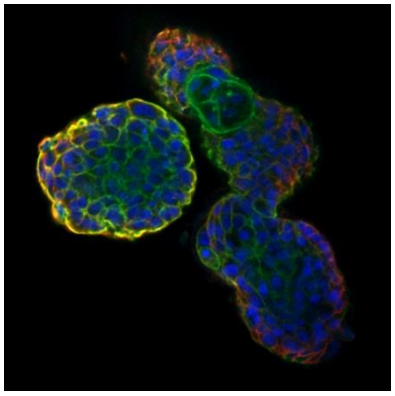
La physique statistique et les mathématiques jouent un rôle essentiel pour la compréhension du système climatique. Les études des physiciens de la turbulence seront fondamentales pour une meilleure compréhension du système climatique. De la même manière, la mécanique statistique est en train de développer de nouveaux outils et des nouvelles techniques, comme des algorithmes d'événements rares, machine learning, etc., qui permettent d'appréhender des phénomènes qui ne pouvaient pas l'être auparavant.

Une consultation rapide des objectifs et priorités des laboratoires en sciences du climat permet d'identifier certains axes stratégiques pour la connaissance du climat et des impacts environnementaux de l'activité humaine, tels que (i) comprendre et analyser la variabilité du climat passé et sa dynamique ; (ii) observer l'environnement actuel (augmentation des gaz à effet de serre, pollution atmosphérique, impacts environnementaux) ; (iii) simuler le changement climatique du passé vers le futur. Ces axes stratégiques engageront les physiciens du climat dans plusieurs directions visant à :

- Établir une archive et une cartographie historiques du climat pour disposer de séries temporelles passées. Intégrer cela avec l'analyse des échantillons collectés sur le terrain. Étudier les effets des composantes atmosphériques (naturelles et anthropiques) pour évaluer l'état et l'évolution du climat.
- Développer des instruments novateurs de mesures des concentrations de gaz (à effet de serre, réactifs, aérosols) dans l'atmosphère et étudier les transferts dans l'environnement (aérosols-rayonnement-nuages). Développer des instruments de spectroscopie et de bilan radiatif.
- Modéliser sur toutes les échelles de temps, du passé au futur, et du global au local, les événements climatiques extrêmes, en synergie avec les mathématiques et la physique statistique. Simuler numériquement sur des ordinateurs de plus en plus puissants en lien avec le développement de nouvelles techniques de mesure et d'observation ou d'analyse statistique.

On peut citer l'Institut *des Mathématiques pour la Planète Terre,* piloté *par* l'INSMI et dont le réchauffement climatique est un des axes prioritaires. Il est également important de rappeler la création en 2022 du GDR *Défis théoriques pour les sciences du climat* ; il s'agit d'une initiative de l'INP soutenue par l'INSU et l'INSMI. Au niveau de la prospective, le but de ce GDR est sans doute important et essentiel, dans la mesure où les progrès envisagés « permettront de réduire les incertitudes sur les impacts du changement climatique ».

VII. Physique et vivant



© Sophie FOPPOLO / LBP / CNRS Images

Ce thème transverse se situe à l'interface de plusieurs domaines traités dans les chapitres précédents : Complexité, Optique, Nouveaux matériaux et enfin Conditions extrêmes. Il concerne des domaines extrêmement variés qui se regroupent autour de trois thématiques principales : l'instrumentation pour le vivant, les systèmes modèles pour l'expérimentation, et les concepts et modèles théoriques.

Nous présentons ici les méthodes expérimentales et théoriques les plus prometteuses pour développer ces thématiques. Les perspectives qui s'y rattachent recouvrent principalement deux aspects : d'une part les enjeux sociétaux notamment en lien avec la santé ; d'autre part la complexification des approches et des problèmes traités, qui tient à la multiplicité des échelles d'espace et de temps mises en jeu dans le vivant, aux logiques spécifiques de ces échelles en termes d'organisation et de dynamique et enfin à leur couplage. On gardera à l'esprit que la physique permet de faire dialoguer des disciplines biologiques généralement étanches : biologie animale vs biologie végétale ; eucaryotes vs bactéries ; etc. C'est une des vertus notables des GDR interdisciplinaires.

1. Visualiser, manipuler et quantifier le vivant

Cette thématique très large se focalise principalement sur les concepts et développements instrumentaux permettant d'étudier le vivant. Une large partie utilise des techniques optiques (microscopie optique linéaire ou non linéaire éventuellement super résolue, mise en forme de front d'onde, optogénétique, pinces optiques, photoablation, photothérapie dynamique, spectroscopie ultrarapide ou ultrasensible, plasmonique, méthodes interférentielles, molécules uniques, XFEL et rayonnement synchrotron) sans exclusivité cependant (cryomicroscopie électronique - cryo EM - par exemple). Après un développement massif depuis une trentaine d'années, ce domaine arrive à une phase de maturation dans laquelle l'émergence de nouveaux concepts se fait plus rare. Au contraire, les progrès actuels et les perspectives se concentrent sur une intégration plus poussée en biologie et dans le domaine biomédical, ainsi que sur la complexification des questions abordées et des systèmes instrumentaux.

Aller vers le vivant

De nombreuses méthodes instrumentales récentes se sont initialement focalisées sur les concepts physiques sous-jacents, leur modélisation, ainsi que des démonstrations de principe sur des échantillons biologiques modèles. On peut par exemple citer la propagation d'impulsions brèves, la mise en forme de front d'onde et l'effet mémoire dans les tissus biologiques diffusants, la super-résolution optique ou encore de nombreux effets optiques non linéaires. Bien que certaines méthodes aient très rapidement trouvé des champs d'application pertinents (citons par exemple la microscopie deux photons en neurosciences, la tomographie à cohérence optique en ophtalmologie ou la super-résolution sur des échantillons minces fixés), un des enjeux majeurs actuels est d'adapter et d'affiner les méthodes issues de laboratoires de physique pour une large gamme de questions biologiques. Deux thématiques constituent des perspectives particulièrement actives : l'intégration dans structures hospitalières, et le passage du fixé ou *ex vivo* à des conditions plus réalistes biologiquement (cristallographie des protéines dans leur milieu) ou à l'*in vivo.*

Cette adaptation est largement portée par des efforts d'instrumentation qui seront amenés à se poursuivre dans les années à venir. L'amélioration de la sensibilité, la diminution des effets photoxiques, la rapidité d'acquisition sont portées par les développements techniques issus d'autres domaines (sources et capteurs notamment, lame de phase laser et cellules liquides pour la cryo-microscopie électronique). La compacité (voire la miniaturisation) et la robustesse des instruments sont également des points-clés pour sortir du laboratoire de physique (prototypage pour l'hôpital par exemple), de même que le développement d'appareils moins onéreux mais de performances équivalentes (microscope électronique utilisant des courants d'accélération plus faibles par exemple). Le travail sur les sources de contraste (résistance au

blanchiment, toxicité, photoactivation, sensibilité aux conditions intracellulaires - pH, viscosité, concentrations…) requiert une compréhension en profondeur de l'échantillon biologique d'étude mais aussi de la photophysique/photochimie des sondes utilisées. Enfin, les évolutions rapides des méthodes de traitement de données permettent pour un grand nombre de techniques d'envisager un traitement en temps réel (débruitage, reconstruction tomographique, suppression d'artéfacts, segmentation par réseaux de neurones par exemple) permettant la prise en main d'instruments par des non spécialistes, biologistes ou médecins.

L'ensemble de ces pistes, d'ores et déjà en plein développement, va placer de façon croissante la ou le physicien.ne au croisement de nombreuses autres disciplines (chimie, biologie, sciences de l'ingénieur, informatique) et amplifier l'aspect technique de ses apports par rapport aux concepts fondamentaux de Physique.

Complexification

Une autre direction d'évolution du domaine est la complexification des sujets d'étude, et par suite de l'instrumentation. D'une part, aborder des problématiques toujours plus complexes requiert la combinaison de multiples techniques de quantification et de manipulation : citons par exemple la cristallographie résolue en temps, la super résolution optique *in vivo* en profondeur dans les tissus, ou l'imagerie optique multimodale combinée à la mise en forme de faisceau pour l'optogénétique. Ces développements, déjà en cours mais pour lesquels une large part d'intégration reste à faire, pourraient s'accompagner du développement de plateformes permettant un partage d'expertise favorisant une intégration réussie.

D'autre part, une perspective thématique forte est l'intégration dans une même expérience de dimensions spatiales et temporelles très différentes : cartographie d'un organe entier avec une résolution subcellulaire, suivi d'évènements rapides à l'échelle de la milliseconde sur des durées de plusieurs heures (suivi du développement cardiaque par exemple). Ce type d'analyses multi-échelles requiert une imagerie haut débit qui questionne les capacités de stockage et d'analyse de volumes de données en augmentation constante. Deux développements importants en découlent : le stockage de données ouvertes permettant une multiplicité d'analyses bénéficiant des derniers progrès algorithmiques (*big data*, IA) sans multiplier inutilement les expériences coûteuses en ressources numériques ; et la réduction du volume de données acquises par l'utilisation d'algorithmes prédictifs ou de détection en temps réel permettant d'adapter de façon dynamique la cadence et la résolution d'imagerie au cours de l'acquisition pour extraire des évènements rares ou des données spatialement éparses. Cette approche devrait permettre de limiter le volume de données stockées en intégrant de plus en plus acquisition et traitement de données (par exemple à l'aide d'une carte graphique intégrée à la caméra d'acquisition).

2. Systèmes modèles pour l'expérimentation

Ce deuxième aspect de la Physique du et pour le vivant, également expérimental, appréhende les phénomènes biologiques par une approche réductionniste cherchant à isoler des éléments essentiels à une fonction. Cet aspect minimal caractérise l'approche physique des systèmes biologiques. Elle requiert le développement de systèmes modèles permettant de limiter le nombre de paramètres et de les contrôler précisément : composition (bio)chimique, types cellulaires, environnement mécanique par exemple. Ceci exige une forte intégration des aspects physiques, mécaniques, chimiques et biologiques. Ici encore, les perspectives d'évolution des recherches sont de deux types : l'intégration des approches physiques pour des questions biologiques ou médicales, et *a contrario* l'utilisation de systèmes biologiques modèles comme support de nouveaux formalismes en physique.

Développer des modèles pertinents du vivant

Le développement de modèles avancés pour le domaine médical est en forte croissance depuis de nombreuses années. Cependant, les apports de la Physique sont plus récents et permettent d'envisager des systèmes plus complexes et pertinents, notamment via la prise en compte de l'environnement mécanique sur la croissance et la différentiation cellulaire (rigidité du substrat éventuellement spatialement modulée, écoulements). Ces modèles sont d'un côté des objets d'étude mimant certaines propriétés des tissus biologiques, mais une autre perspective est leur utilisation pour des tests pharmaceutiques, voire leur

développement jusqu'à un organe fonctionnel implantable. Citons notamment les tissus synthétiques (peau artificielle) ou les structures artificielles ensemencées ou non avec des cellules (vaisseaux sanguins modèles ou modèles de jonctions neuronales/gliales par exemple). Mais ce sont surtout les organoïdes qui vont permettre les avancées les plus spectaculaires : ces structures tridimensionnelles, obtenues *in vitro* à partir de cellules souches, contiennent en effet sous forme minimale les différents types de cellules et couches de tissus présents dans un organe adulte. Ils offrent une possibilité unique de modéliser le métabolisme et les propriétés physiques à l'œuvre au cours du développement embryonnaire, et enfin de comprendre comment les organes se renouvellent et comment ils se réparent. Cette approche du vivant par des systèmes modèles porte des perspectives éthiques importantes permettant potentiellement de répondre à une problématique sociétale, puisque l'établissement de tels modèles pertinents permet de minimiser le recours aux modèles animaux dont l'usage tend à se restreindre et dont le coût environnemental est par ailleurs élevé. Ainsi, on peut anticiper une orientation de plus en plus biologique et médicale de ces sujets, posant une nouvelle fois la question de l'accompagnement et de l'évaluation des physicien.ne.s hors de leur domaine de compétence d'origine.

Par ailleurs, de tels systèmes permettent d'isoler et d'étudier avec l'œil du physicien les principes physiques gouvernant certains phénomènes biologiques : compartimentation intracellulaire (séparation de phase liquide-liquide - LLPS -, transport dans des modèles de pores nucléaires) ou membranaire (radeaux lipidiques et diffusion confinée dans des membranes modèles) ; équilibre entre tension de surface, élasticité, forces actives et croissance dans la formation de structures tissulaires (architecture des biofilms, embryologie, flambage et brisure de symétrie) ; écoulement dans des réseaux complexes (rein, microvasculature sanguine, microporosité osseuse, circulation de la sève et évaporation dans les plantes) avec ou sans fluides complexes ; rhéologie des tissus et mécanobiologie ; mécanismes de motilité cellulaire (nage, adhésion, motilité de surface, phénomènes collectifs) ; interactions cellule-cellule, cellule-substrat ou pathogène-cellule (*catch bonds*, interactions multivalentes et supersélectivité, biolubrification, « adhésion molle ») ; génération de forces cellulaires et transport actif (moteurs moléculaires, réseaux dynamiques de microfilaments). Ce domaine très dynamique a progressivement gagné en légitimité auprès de la communauté des biologistes et devrait continuer son développement avec un couplage de plus en plus poussé avec des études plus strictement biologiques (régulation génétique par exemple).

Systèmes modèles pour la physique

Les systèmes vivants sont aussi une source d'inspiration (biomimétisme) pour explorer de nouvelles questions de physique. C'est le cas notamment de la matière active, dont l'étude engendre une nouvelle physique statistique hors équilibre (voir chapitre VI. Complexité). L'utilisation de systèmes modèles (particules synthétiques mais aussi bactéries, microalgues, voire animaux) offre une flexibilité sur les paramètres expérimentaux permettant d'affiner les modèles ou de tester des prédictions théoriques (rhéologie, transitions de phase, etc.). La physique statistique de la matière active permet notamment d'aborder des questions biologiques aussi cruciales que la morphogenèse du développement embryonnaire, la formation de tumeurs et de métastases, le remodelage du cytosquelette au cours de la division cellulaire ou la cicatrisation des tissus. Citons également le transport de fluides, de particules ou d'information dans des réseaux complexes dont l'architecture peut être directement copiée ou inspirée de réseaux biologiques (écoulements sanguin ou osseux, réseaux de neurones) mais également modifiée ou simplifiée (par exemple circuit microfluidique modèle) afin de mieux théoriser le lien entre structure multi-échelles du réseau et propriétés de transport.

Dans ce domaine, le développement rapide des méthodes de la mécanique statistique hors équilibre permet une intégration toujours plus poussée des aspects multi-échelles (spatiaux et temporels). L'intégration multidisciplinaire est également une perspective importante permettant l'émergence de nouveaux concepts : couplages physico-chimiques (couplage chimiotactisme-mécanosensation, élasticité et interactions multivalentes…) ou multi-physiques (écoulement dans des réseaux et matière active, poro-élasticité).

3. Concepts et modèles théoriques

Comme illustrés dans le paragraphe précédent, les concepts et modèles théoriques se développent généralement en lien avec l'expérience. Pour la modélisation physique de systèmes aussi complexes que ceux de la matière vivante, on peut s'attendre à des développements majeurs en lien avec les progrès de la

mécanique statistique hors équilibre, des simulations numériques et de leur couplage avec l'IA (voir chapitre VIII. Intelligence artificielle, machine learning et données). C'est notamment le cas de la LLPS. Ce phénomène très général, connu de longue date en Physique, connaît depuis une décennie un intérêt renouvelé du fait de son rôle majeur dans de nombreux processus biologiques, et en tout premier lieu dans la formation d'organites sans membrane dans la cellule, contribuant à la régulation et la compartimentation des réactions biochimiques intracellulaires. Mais c'est surtout dans le noyau des cellules eucaryotes, où coexistent des polymères (les chromosomes) et une solution colloïdale complexe (le nucléosol), que la LLPS offre les perspectives les plus intéressantes : elle pourrait en effet expliquer comment tous les éléments nécessaires à une fonction biologique se retrouvent en même temps en un même endroit du noyau. Deux catégories de structures fonctionnelles sont ainsi appelées à être revisitées à la lumière de la LLPS : (i) on commence seulement à comprendre que les corps nucléaires sont en fait des gouttelettes de compositions variées obtenues par LLPS, contenant notamment de nombreux ARNs dont il s'agit maintenant de caractériser la nature et le rôle ; (ii) les unités physiques de transcription que sont les TADs (*Topologically Associating Domains*), après avoir été abondamment décrits en termes de physique des polymères, devraient être mieux compris en termes de gouttelettes résultant d'un mécanisme de LLPS hors équilibre couplé à une transition conformationnelle du chromosome. Notons enfin que la nucléation active des gouttelettes, qui est une question fondamentale à l'interface physique-chimie-biologie, reste un domaine trop peu exploré de la physique statistique hors équilibre.

Un autre domaine dans lequel la physique théorique joue un rôle très important est la biologie des systèmes, appelée aussi biologie intégrative, qui concerne la modélisation des systèmes au niveau des ensembles de composantes biologiques (neurones, gènes, cellules, individus dans une espèce, …) en interaction. La caractérisation multi-échelles de ces systèmes, tant sur le plan spatial que temporel (évolution sur des temps très divers) est difficile du fait de la présence d'interactions fortes et hétérogènes. Dans ces modèles, la physique statistique guide la compréhension du vivant en offrant un cadre conceptuel et technique adapté pour décrire des systèmes stochastiques avec un grand nombre des variables en interaction (modèle de Hopfield en neuroscience par exemple). La physique statistique est aussi centrale dans la biologie évolutive, où elle permet de décrire la dynamique de populations, de l'échelle moléculaire (protéines, ADN, ARN, …) jusqu'à celle des organismes qui évoluent sous l'effet de mutations aléatoires et de mécanismes de sélection. Dans ces deux exemples, on peut s'attendre à une augmentation de la complexité des problèmes traités avec l'augmentation des puissances de calcul numérique disponibles.

Enfin, les méthodes dérivées de la mécanique statistique pour l'inférence et l'échantillonnage de modèles de populations de variables en interaction à partir des données ont connu un succès grandissant dans les dernières années grâce à la disponibilité toujours croissante de mesures de haut débit dans un grand nombre des domaines en biologie et en médecine, et au développement de recherches interdisciplinaires à la frontière entre apprentissage machine, bio-informatique et mécanique statistique. Ces méthodes vont avoir entre autres un impact grandissant dans les neurosciences et dans l'immunologie, notamment pour le développement de vaccins et des thérapies immunitaires contre les tumeurs.

VIII. Intelligence artificielle, machine learning et données

Inspirés par la structure du cerveau, les réseaux de neurones artificiels implémentés sur des cartes graphiques modernes permettent de résoudre des tâches complexes avec des méthodes rassemblées sous la désignation d'intelligence artificielle (IA), ouvrant de larges possibilités d'applications pour la recherche en Physique. Une application bien connue de l'IA, dans la vie quotidienne comme en Physique, est l'analyse d'images. Plus généralement, elle peut servir à traiter des gros volumes de données (*big data*) ou des données bruitées. Elle peut également servir à piloter l'acquisition de données (voir également ANNEXE 3 – Intelligence artificielle). La valeur ajoutée offerte par l'IA est d'extraire des variables pertinentes à partir de données massives. Cela conduit à considérer l'IA comme partie intégrante du processus d'analyse d'un système complexe, permettant ensuite une modélisation physique et une compréhension théorique du système. A l'inverse, l'IA peut être utilisée pour prédire la structure et les propriétés des systèmes complexes tels que des matériaux ou des protéines. De cette manière, il est possible d'identifier des systèmes pertinents dans un espace de paramètres extrêmement vaste pour ensuite synthétiser et analyser ces structures. L'IA peut proposer des expériences innovantes capables de créer de nouveaux types d'états intriqués comme expliqué sous le thème Quantique (voir chapitre II. Quantique).

© Michel THIEBAUT DE SCHOTTEN / ICM CNRS Images.

Pourtant, il existe encore des questions ouvertes importantes, tant sur le plan théorique que sur le plan pratique, par exemple du fait des architectures hardware existantes et leur consommation d'énergie associée (la consommation du cerveau humain est typiquement de l'ordre de 20W, celle d'une unique carte graphique de dernière génération est de 500W, une intelligence artificielle de type ChatGPT nécessite environ 30000 cartes graphiques). La physique peut contribuer au développement du matériel informatique utilisé pour l'IA. Par exemple, le GDR « Implémentations matérielles du calcul naturel » (BioComp) a comme but d'établir un cadre interdisciplinaire pour finalement réaliser des puces bio-inspirées. De tels systèmes pourraient offrir des avantages importants en termes de consommation d'énergie ou de vitesse d'opérations.

La Physique peut aussi contribuer à une étape décisive pour le bon fonctionnement d'un réseau de neurones artificiels : l'entraînement avec une quantité de données aussi grande que possible et impartiale. Pour optimiser ce processus limitant, les réseaux de neurones artificiels informés par la physique (PINN : *physics-informed neural networks*) implémentent des contraintes physiques (équations aux dérivées partielles, conditions initiales et conditions aux limites). Cependant, l'utilisation de l'IA à grande échelle en physique implique la levée de quelques verrous. D'une part, l'aspect multi- ou interdisciplinaire de l'IA ne dispense pas de la nécessité d'adapter l'outil à un domaine de recherche particulier. L'application de l'IA comme outil de recherche pourrait donc être facilitée considérablement par une structure d'appui permettant aux physicien.ne.s d'utiliser l'IA sans en faire un sujet de recherche en propre. D'autre part, l'utilisation en émergence rapide de l'IA pour l'analyse de structures en science des matériaux et domaines connexes promet la production d'une quantité considérable de données. Pour limiter la redondance des calculs effectués, il est nécessaire de mettre en place une gestion efficace des données de recherche permettant la réutilisation des données obtenues, tant dans un souci d'efficacité que de sobriété. En France, le caractère bidirectionnel de l'IA évoqué ici pour la physique est reconnu pour la science en général par la MITI (Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires) qui a lancé un appel à projets intitulé « Sciences pour l'IA, l'IA pour les sciences » en 2022. Une bonne partie des activités de la physique pour l'IA s'est organisée dans le cadre du GDR BioComp, qui implique 60 laboratoires, ainsi que dans le cadre du GDR « Intelligence Artificielle en Sciences des Matériaux » (IAMAT).

1. Calcul neuromorphique et réseaux de neurones à impulsions

L'IA est inspirée par le fonctionnement du cerveau. Mais même si les réseaux de neurones profonds peuvent présenter une structure hiérarchique comme on la trouve dans le cerveau, il existe des différences importantes entre les réseaux neuronaux artificiels et leurs homologues biologiques. Les réalisations des réseaux de neurones profonds sont basées sur l'architecture de von Neumann caractérisée entre autres par la séparation entre l'unité arithmétique et logique, d'une part, et la mémoire, d'autre part, tandis que les deux composants sont intimement intégrés dans le cerveau. Une autre différence importante est la consommation d'énergie beaucoup plus faible réalisée par le cerveau, qui résulte en grande partie du fonctionnement asynchrone par impulsions des neurones physiologiques. Par conséquent, le développement des réseaux de neurones à impulsions (« *spiking neural networks* ») a suscité beaucoup d'intérêt. Ce type de réseaux de neurones n'exploite pas seulement la dimension temporelle en termes de durées entre les impulsions, mais utilise aussi des informations binaires au lieu des nombres réels pour mesurer les amplitudes dans les réseaux de neurones profonds, réduisant ainsi le coût de calcul. Un aspect important du cerveau, qui peut être réalisé également dans des réseaux de neurones à impulsions, est la plasticité des connexions synaptiques. Dans ce contexte, les memristors jouent un rôle important puisqu'ils possèdent une résistance variable qui peut être contrôlée par un courant, constituant ainsi des synapses artificielles. Un enjeu majeur consiste en une forte intégration des deux types de composants (neurones et synapses) au sein du même composant, donc tous deux réalisés avec des technologies compatibles en assurant l'interconnexion.

Au cours des dernières années, différentes réalisations de neurones ont été développées dans le contexte du calcul neuromorphique. Une approche emploie des jonctions Josephson et des SQUID (« *superconducting quantum interference devices* ») où les lignes des transmissions supraconductrices permettent une transmission d'informations presque sans pertes. De par leur nature, les circuits supraconducteurs fonctionnent avec une très faible consommation d'énergie. De plus, cette technologie peut être couplée avec des circuits optiques par des détecteurs supraconducteurs à un photon. L'utilisation des technologies quantiques est abordée plus en détail dans le chapitre II. Quantique. Une autre technologie en développement s'appuie sur les circuits spintroniques dans lesquels on peut utiliser des jonctions tunnel magnétiques ou des oscillateurs de spin. Certaines des technologies mentionnées ont bénéficié de nouveaux développements en science des matériaux, par exemple l'utilisation de chalcogénures, de ferroélectriques ou d'isolants topologiques au sein de dispositifs memristifs. A l'avenir, on peut s'attendre à ce que les nouveaux matériaux émergents continuent de jouer un rôle crucial. Même s'il existe déjà des implémentations de réseaux de neurones à impulsion, il reste de nombreux défis et questions à résoudre. La recherche de solutions à faible consommation d'énergie constitue un impératif global. Une autre propriété du cerveau qui n'est pas encore mise en œuvre est sa tridimensionnalité, qui permettrait une connectivité bien supérieure à celle des systèmes artificiels bidimensionnels actuels. Une autre question majeure relative aux réseaux de neurones physiques concerne le bénéfice des réseaux de neurones à impulsion comparé à celui des réseaux de neurones profonds quant à l'apprentissage continu ou l'apprentissage sur des ensembles de données restreints.

2. Réseaux de neurones informés par la physique (PINN)

Typiquement, l'entraînement des réseaux de neurones demande de grandes quantités de données, par exemple des images. Il existe pourtant des situations dans lesquelles on dispose de peu de données pour l'entraînement mais sur des systèmes dont on connaît certaines contraintes physiques. On peut coder des invariances connues par rapport aux translations ou rotations. On peut également utiliser des modèles sous-jacents exprimés en termes d'équations aux dérivées partielles. Ces équations peuvent être incorporées dans la fonction de coût utilisée pour l'entraînement. Une autre composante de la fonction de coût réside dans les conditions initiales et les conditions de bord. Cette approche est connue sous le nom de réseaux de neurones informés par la physique (PINN). Les PINN offrent une alternative aux approches numériques standards basées sur un maillage du domaine d'intérêt comme c'est le cas pour la méthode des éléments finis. En évitant le maillage, les PINN offrent des avantages pour traiter des problèmes sur des domaines irréguliers ou en mouvement ainsi que des problèmes avec conditions de bord libres. Un autre avantage des PINN concerne les problèmes de haute dimensionnalité où on profite entre autres de la possibilité d'une évaluation symbolique des dérivés partielles par des réseaux de neurones.

Le concept des PINN a déjà trouvé de nombreuses applications, par exemple en dynamique des fluides, pour la modélisation des océans et du changement climatique, pour le transport de chaleur, en physique

médicale, en science des matériaux et pour déterminer les surfaces d'énergie en dynamique moléculaire. Une application typique en physique médicale est l'amélioration des données à quatre dimensions du flux sanguin en fonction du temps obtenu par imagerie par résonance magnétique. Ces images sont souvent de basse résolution et bruitées. A l'aide d'un PINN, on peut les améliorer considérablement en les contraignant à respecter l'équation de Navier-Stokes déterminant le flux sanguin. En plus de l'amélioration des données, l'approche des PINN peut être utilisée pour déterminer des paramètres libres de l'équation aux dérivées partielles sous-jacente ou même proposer des équations appropriées pour la modélisation des données. Bien que les PINN aient déjà été appliqués à de nombreux problèmes, plusieurs extensions de la méthode ont été développées et il y a encore un potentiel important de développement ultérieur, par exemple pour résoudre des problèmes de chaos ou des problèmes impliquant la propagation de fronts d'ondes abrupts. La possibilité de traiter les effets de haute fréquence est particulièrement importante pour aborder des problèmes multi-échelles ou multi-physiques. Malgré le fort développement de ce concept, il existe actuellement un manque cruel d'activités de recherche sur les PINN en France.

IX. Infrastructures de recherche

L'INP coordonne la participation de la communauté française aux activités de recherche menées dans les infrastructures et très grandes infrastructures de recherche (IR*) telles que les synchrotrons (SOLEIL et ESRF), les sources de neutrons (ILL et ESS), le laser européen à électrons libres et rayons X (Eu-XFEL), les champs magnétiques intenses continus et pulsés (LNCMI), les lasers intenses (Apollon), les réseaux de microscopie électronique (METSA et superSTEM).

© Erwan PAINEAU-LANONE

La recherche contemporaine est de plus en plus multidisciplinaire et transdisciplinaire, notamment parce que les problèmes scientifiques et sociétaux sont souvent si complexes qu'il n'est pas possible d'y répondre à partir d'une seule perspective scientifique. La combinaison d'un certain nombre de disciplines et d'acteurs différents crée un besoin d'installations de recherche à grande échelle. Ces installations permettent, d'une part, de centraliser la recherche autour d'instruments uniques et, d'autre part, d'augmenter l'échelle en combinant et en intégrant des installations de recherche complexes et reliées entre elles. L'utilisation des IR* entraîne également des innovations dans la gestion de la science et sur le plan des collaborations internationales, donnant une plus grande visibilité aux groupes impliqués dans ces recherches et dans le développement des instruments reliés. Les activités de recherche menées dans les IR* par la communauté de l'INP s'inscrivent au coeur de cette interdisciplinarité et fédèrent, notamment à travers plusieurs GDR ou réseaux de métiers au sein de l'INP mais aussi de façon transverse, des acteurs d'autres instituts, principalement l'INC, l'INSB, l'INSIS ou l'INSU. Nous allons brièvement, et sans recherche d'exhaustivité, détailler les nouvelles possibilités offertes par ces instruments dans le futur proche.

1. Sources Synchrotrons

Le rayonnement synchrotron est un outil essentiel de la communauté des chercheurs de l'INP à l'interface avec la chimie, la biologie, la médecine, les géosciences et le patrimoine. Il offre des perspectives uniques pour sonder la structure et la dynamique de la matière dans des conditions de plus en plus extrêmes (pression, température) ou des échelles de temps ultra-rapides (jusqu'à une fraction de milliseconde) pour des expériences *in situ* et/ou *operando* (croissance, transitions de phases, physique mésoscopique, matériaux pour l'énergie…). Il y a également un développement fort vers les méthodes d'imagerie hyperspectrale ou fondée sur la reconstruction de phases (ptychographie).

La France a la chance de disposer sur son territoire d'une source nationale très performante (SOLEIL, plateau de Saclay) et d'accueillir à Grenoble le synchrotron de 4ème génération European Synchrotron Radiation Facility (ESRF). Ces deux sources offrent une forte complémentarité en termes d'approches expérimentales et de gamme en énergie accessible. Le synchrotron SOLEIL propose un ensemble complet

de diffraction, diffusion élastique et inélastique, cohérence, dichroïsme magnétique, imagerie et spectroscopies sur une gamme allant du THz à celles des rayons X durs, peu ou pas accessible par les autres synchrotrons dans le monde. SOLEIL dispose de la seule ligne haute pression (HP) à faisceau blanc en Europe permettant de réaliser entre autres de la tomographie plein champ HP, des mesures de densité ou de suivre la structure des liquides. L'attractivité de SOLEIL passe également par une grande diversité de capacités de spectroscopies d'électrons et de photons (absorption, émission, IR), indispensables pour étudier les propriétés électroniques, magnétiques et chimiques de matériaux variés ou complexes (cf. chapitres III. Nouveaux matériaux & VI. Complexité). Comme toutes les installations de rayonnement synchrotron, SOLEIL mène une réflexion sur la jouvence de l'anneau de stockage. Le but est de minimiser l'émittance du faisceau d'électrons pour maximiser la cohérence et la brillance des rayons X. Cela permettra d'avoir des performances uniques sur la gamme des X mous (1-3 keV) tout en étant compétitif dans la gamme 5-30 keV. La programmation de cette jouvence est d'autant plus critique qu'il existe un risque de pertes de connaissance sur l'expertise des accélérateurs si le projet était retardé.

La communauté française bénéficie aussi de l'ESRF, une des sources synchrotron les plus intenses au monde suite à la finalisation du programme de jouvence. Avec le retour des scientifiques de lignes et des utilisateurs, on constate que l'augmentation du flux cohérent permet d'accélérer et d'améliorer en qualité et résolution l'imagerie d'objets en 2D et 3D, aussi bien en transmission pour la reconstruction de la densité électronique, qu'en géométrie de Bragg pour la déformation dans les nano-objets. L'accélération de la collecte de données permet aussi une meilleure résolution en temps pour les expériences *in situ* ou plus généralement de dynamique. L'augmentation du flux cohérent à haute énergie permet de sonder des objets plus volumineux et absorbants. Cela permet aussi de modérer les dommages liés à l'irradiation et de gagner en résolution angulaire pour les expériences de diffraction. Cela a ouvert de nouvelles possibilités pour le développement de nouvelles techniques combinant l'imagerie cohérente et la spectroscopie ou le magnétisme.

Pour finir, l'amélioration des performances de ces installations combinées à l'acquisition de données sur des temps très courts ou la réalisation de cartographie multispectrale, conduit à la génération d'une quantité importante de données. Une réflexion est en cours sur la transformation numérique pour gérer cette masse de données et les exploiter de façon efficace. Cette gestion passe par l'établissement d'infrastructures spécifiques permettant le stockage ainsi que l'accès aux utilisateurs pendant et après les expériences. Ces outils s'inscrivent également dans un contexte d'ouverture des données intégrant leur traçabilité.

2. Sources de Neutrons

Les neutrons constituent une sonde unique pour révéler la structure et le fonctionnement de la matière, de l'échelle microscopique à l'échelle atomique. La diffusion de neutrons est très largement utilisée par les chercheurs de l'INP, la communauté neutronique française étant une de plus actives au niveau mondial. La recherche qui utilise la diffusion des neutrons a profité d'une large gamme de méthodes puissantes capables d'extraire des informations très détaillées sur les propriétés et le comportement de nombreux matériaux. Les propriétés spécifiques du neutron, tels que sa sensibilité aux éléments légers, dont l'hydrogène, son spin, la sensibilité isotopique, ainsi que la faible absorption, rendent la diffusion neutronique irremplaçable dans les études expérimentales de la matière condensée.

De nos jours, les neutrons sont fréquemment utilisés pour relever les grands défis sociétaux, ainsi que pour améliorer et trouver de nouvelles solutions aux questions de la vie quotidienne. La neutronique fournit de plus en plus de réponses dans des domaines tels que l'énergie propre, le stockage d'hydrogène, la santé, l'environnement, les sciences de la vie. Les recherches menées à l'aide des neutrons ont aussi permis de résoudre certains problèmes anciens et très complexes, en particulier dans le domaine de la médecine. Les solutions à certains des défis les plus redoutables dans le domaine des sciences de la vie reposent sur la cartographie et la modélisation tridimensionnelle des protéines, que seuls des instruments neutroniques plus puissants et plus sophistiqués permettront.

Les techniques de diffusion des neutrons attirent de plus en plus des communautés scientifiques variées et interdisciplinaires, qui bénéficieront de la mise en service de sources de spallation de nouvelle génération de grande puissance (ESS sera en opération en 2027), de l'amélioration des lignes existantes (programme endurance de l'ILL, programme ISIS au Royaume-Uni), de nouvelles sources compactes dont l'optimisation est très prometteuse et de nouveaux instruments sophistiqués et nouvelles techniques à haute performance mises en place dans ces sources – parmi lesquelles nous pouvons citer l'imagerie à haute résolution, les expériences de diffraction à très court temps d'acquisition permettant des études cinétiques, les mesures

quasi-élastiques à très haute résolution en conditions extrêmes – ainsi que de nouveaux outils d'analyse des données utilisant des approches multi-échelles avec le support de l'intelligence artificielle. Cependant, la réduction du nombre de centres de recherche en neutrons en Europe (LLB, HZB) et l'indisponibilité prolongé d'autres (FMR II) entraine une certaine inquiétude de la communauté des neutroniciens, en particulier l'inévitable perte de savoir-faire et de communautés.

Le panorama français a évolué vers une concentration des efforts sur les lignes CRG françaises mises en place à l'ILL (5+1) et à PSI (1) et sur la participation (à hauteur de 15%) à la nouvelle source de spallation européenne. Les sources compactes sont vues comme un moyen indispensable de soutenir localement une communauté importante et bien reconnue au niveau mondial.

3. XFEL

Les XFEL font partie de grands instruments de nouvelle génération produisant des impulsions de lumière (UV ou X) ultra-brèves caractérisées par une brillance de 9 ordres de grandeur plus élevée que les synchrotrons de quatrième génération. La brièveté (5-100 fs), l'intensité (10^{10}-10^{12} photons/impulsion) et la haute focalisation (0.1-20 µm) des impulsions, ainsi que les gammes étendues d'énergie de photon accessibles (des XUV aux X durs) permettent la réalisation d'expériences innovantes, jusqu'ici impossibles avec d'autres sources de rayonnement. Les thématiques scientifiques concernées vont de la physique de matière condensée à la géoscience, en passant par l'astrophysique de laboratoire et les plasmas, la photochimie, la physique atomique et moléculaire et la biologie structurale. Les caractéristiques uniques des impulsions lumineuses permettent, dans chacun des domaines évoqués, de réaliser des expériences résolues en temps et d'étudier la dynamique des systèmes jusqu'à des échelles de temps ultra-courts. Un nombre grandissant de chercheur.se.s français, récemment fédéré.é.s par le GDR « Science avec les XFEL » (XFEL) est utilisateur des XFEL, avec plusieurs projets internationaux portés par le CNRS. Les recherches actuellement menées au XFEL ouvrent déjà de nouvelles voies, avec des études dans de nombreuses disciplines : détermination des structures de molécules essentielles à la biologie, observation des transferts d'énergie ultrarapides au sein des molécules, étude des caractéristiques des états extrêmes de la matière, observation du comportement des électrons dans des molécules complexes. Les longueurs d'onde des flashs de rayons X sont si petites qu'il est possible d'étudier la composition et la structure de biomolécules et de matériaux complexes à l'échelle atomique. Les recherches menées permettent de mieux comprendre la structure des cellules biologiques et de développer de nouveaux matériaux aux propriétés optimisées. Pareillement, les éclairs de rayons X sont si courts que les scientifiques peuvent les utiliser pour filmer des phénomènes ultrarapides tels que la formation ou la rupture de liaisons chimiques, ou sonder des états métastables ou transitoires. Ces recherches permettent aux scientifiques de mieux comprendre les processus physico-chimiques, avec la possibilité de développer des méthodes de production industrielle plus efficaces dans le développement de nouveaux médicaments. Enfin, les éclairs des lasers à rayons X peuvent également être utilisés pour étudier la matière dans des conditions extrêmes de température et de pression, comme celles qui règnent à l'intérieur des planètes, et à des intensités de champ électrique ou magnétique extrêmes. Cela permettra d'acquérir de nouvelles connaissances sur les propriétés des matériaux dans de telles conditions qui peuvent guider l'interprétation des données provenant des missions spatiales. D'autres études portant sur de petits objets, des molécules uniques ou des atomes dans des champs de rayons X extrêmes ouvriront la voie à de nouvelles méthodes de radiographie.

4. Champs magnétiques intenses

Les études dans le domaine des champs magnétiques intenses, supérieurs typiquement à la vingtaine de Teslas, sont réalisées au Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI). Une grande variété de techniques expérimentales y sont développées et sont accessibles dans différentes gammes de température et de pression : sondes macroscopiques (optique, thermodynamique, transport électrique ou thermique), sondes locales (résonance paramagnétique électronique, résonance magnétique nucléaire, y compris en champ pulsé pour cette dernière), techniques de diffraction et de spectroscopie X.

Le champ magnétique intense est un outil unique pour l'exploration de nouveaux matériaux (supraconducteurs, métaux et semiconducteurs, systèmes magnétiques variés) ainsi que pour l'étude de phénomènes physiques très fondamentaux (biréfringence du vide, recherche de matière noire). Il est également utilisé en magnétoscience (effet du champ sur les procédés physiques, chimiques et biologiques)

ou comme environnement de caractérisation (câbles supraconducteurs par exemple) (voir chapitre IV. Conditions extrêmes).

Avec le LNCMI, la France bénéficie de deux installations au niveau de l'art mondial pour la génération de champs continus jusqu'à 37 Tesla à Grenoble et de champs pulsés jusqu'à 90 T (voire 200 T en semi-destructif) à Toulouse. Le LNCMI est aussi le concepteur et l'opérateur de stations mobiles de champs pulsés pouvant être utilisées en combinaison avec un faisceau de neutrons, un rayonnement synchrotron ou un laser intense.

Sur le site de Grenoble, différents projets de mise à niveau des installations du LNCMI sont actuellement en cours et vont se poursuivre dans une démarche continue de réduction du coût énergétique de ses expériences. Le projet de mise à niveau pour installer une nouvelle ligne d'alimentation de 60MVA et un transformateur dédié progresse et devrait pouvoir fournir à la communauté des utilisateurs dès 2024 un accès à des champs résistifs allant jusqu'à 40 T. La construction de l'aimant hybride de Grenoble (projet LASUP) entre désormais en phase de mise en service. 2023 verra les premières expériences au-dessus de 37 T. A terme, ce projet permettra en 2025 de réaliser des champs plus importants (43 T au lieu de 37 T) et, à champ magnétique équivalent (36 T par exemple), de diminuer la consommation électrique de la mesure jusqu'à 50%. Un autre grand projet a débuté en 2022 à Grenoble avec pour objectif la construction en 2027 d'un aimant utilisateur 40 T entièrement supraconducteur. Cet aimant va permettre non seulement d'effectuer des mesures plus longues (plusieurs jours), mais aussi de remplacer une partie des mesures effectuées sur les aimants résistifs en diminuant leur consommation électrique.

En ce qui concerne les champs pulsés, trois grands axes de développement sont envisagés pour les années à venir bénéficiant directement de la mise à niveau récente des générateurs – qui leur a permis d'atteindre une fiabilité et une ergonomie accrues – et des recherches de nouveaux matériaux pour la production de champs intenses réalisées au LNCMI. La production de champs pulsés de 100 T avec des bobines non-destructives constitue le premier axe avec pour objectif de développer les expériences utilisateurs à des champs aussi élevés. Le second axe concerne la génération de champs magnétiques pulsés non destructifs au-delà de 100 T (objectif 120 T) avec le projet de développement d'aimants à courte durée d'impulsion (< 0.1ms). Enfin, le troisième axe s'inscrit directement dans le cadre des collaborations entamées depuis plusieurs années par le LNCMI avec d'autres IR* : sources de neutrons (ILL), synchrotrons (ESRF) et lasers intenses (LULI). Plusieurs voies sont envisagées qui conduiraient soit à l'augmentation des champs disponibles (>40 T pour les sources X et neutrons et >60 T pour les sources laser), soit à des géométries de bobines optimisées ou encore à des temps de mesure plus longs.

5. Microscopie électronique

La fédération de recherche METSA (FR3507) est un réseau national qui s'articule autour de 9 plateformes régionales mettant à la disposition de la communauté scientifique des instruments uniques en France dans le domaine de la Microscopie Electronique en Transmission et de la Sonde Atomique tomographique. Mis en place par le CNRS et le CEA il est financé à 100% par l'INP mais a vocation à mettre à disposition des chercheurs et industriels des instruments de haute technicité et performance permettant de répondre à des besoins spécifiques dans des domaines allant de la physique fondamentale, science de la matière condensée, aux géosciences ou encore la biologie, qui ne trouvent pas de réponse dans les techniques de microscopie électronique en transmission (MET) "conventionnelles". Les progrès technologiques réalisés ces dernières années en matière de porte-objets environnementaux et en termes de résolution spatiale, spectrale et temporelle ont ouvert de nouvelles voies d'études des phénomènes physiques ultra-rapides ou de suivi des cinétiques de mécanismes réactionnels *in situ* et *operando* (en milieux liquide ou gazeux, ou à température cryogénique) dans des objets nanométriques à 0, 1 ou 2D (nanofils, nanoparticules, etc). Ces avancées technologiques se situent au niveau des caméras dites à détection directe qui ont une sensibilité incomparable par rapport aux caméras CCD utilisées jusqu'à présent et une capacité à atteindre des résolutions temporelles en-dessous de la nanoseconde, et également au niveau des monochromateurs qui permettent des émissions d'électrons avec une largeur spectrale de 10 meV, révolutionnaire pour la spectroscopie de pertes d'énergie des électrons (EELS). Enfin le développement des microscopes électroniques résolus en temps (balayage ou transmission) permet d'observer les phénomènes dynamiques avec une résolution spatiale nanométrique. En ce qui concerne la sonde atomique, l'utilisation de différents types d'impulsions laser ultra-brèves permet de caractériser de nombreuses classes de matériaux organiques et inorganiques. Couplée à un système de transfert de l'échantillon sous ultra-vide et à température cryogénique, il est désormais possible d'obtenir une

quantification locale de l'hydrogène, ce qui s'avère primordial pour les problématiques liées au stockage et à la production d'hydrogène. La microscopie corrélative, en combinant MET et SAT dans les mêmes zones d'observation, permet ainsi de revisiter des problématiques de métallurgie physique comme la fragilisation par l'hydrogène ou les mécanismes de dégradation/oxydation/corrosion en science des matériaux, en reliant l'information chimique locale aux défauts structuraux.

Dans les prochaines années, ces progrès technologiques vont être consolidés et mis à profit de la communauté pour répondre à des enjeux clés en matière de recherche fondamentale, d'innovation mais également pour relever les défis sociétaux (informatique quantique, transition énergétique). Citons par exemple la possibilité d'étudier grâce aux caméras à détection directe des échantillons très sensibles aux électrons comme en biologie, ou avec peu de contraste comme en holographie hors-axe, ou encore d'obtenir des informations *in situ* ou *operando* du champ électrique dans des matériaux semiconducteurs. Ces caméras favorisent aussi l'évolution du 4D-STEM et de la ptychographie. Cette technique permet entre autres de remonter au champ électrique et magnétique, et offre une alternative prometteuse aux cartographies de champ obtenues par holographie ou contraste de phase différentiel. Encore émergente, elle nécessitera le développement de techniques de traitement et d'acquisition automatisée des données, et pourra bénéficier dans les années à venir d'algorithmes basés sur l'IA. La combinaison des caméras à détection directe pour la spectroscopie de pertes d'énergie et les monochromateurs ouvre tout un nouveau champ de recherche. La mise en évidence récente du couplage fort entre phonons et excitons dans des matériaux 2D ou l'observation de l'excitation directe (et donc cohérente) d'un exciton par un électron ouvre potentiellement la voie à l'étude d'interaction fondamentale avec un microscope électronique. La microscopie électronique ultrarapide basée sur des expériences de type pompe-sonde avec une source d'électrons pulsée ou bien bénéficiant des prochaines capacités de détecteurs à pixels offre ainsi un pendant très précieux aux expériences menées sur rayonnement synchrotron, avec l'avantage de sonder le champ proche optique avec des résolutions atomiques. Il existe actuellement deux microscopes à transmission résolus en temps en France à l'IPCMS (Strasbourg) et au CEMES (Toulouse) et des développements sur la partie détection sont menés au LPS (Orsay).

6. Laser intenses

L'Infrastructure de recherche (IR*) Apollon est une installation laser multi-Pétawatt, multifaisceaux opérée par le Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI) dédiée à l'étude de la lumière extrême. Cette infrastructure est ouverte depuis 2019 à la communauté internationale par le biais d'un appel à propositions annuel. Conçu pour atteindre une puissance multipetawatt (1PW en 2019, 4 PW en 2023, et 9 PW en 2024), Apollon permet de produire des faisceaux de particules et des rayonnements aux paramètres uniques. Deux salles expérimentales permettent de mener des expériences soit à très haute intensité (Short Focal length Area, SFA), soit à plus faible intensité mais avec des longueurs Rayleigh très importantes (Long Focal Length Area, LFA). La salle dite SFA, est dédiée à l'étude de la production de protons/neutrons notamment pour l'étude de la nucléosynthèse en laboratoire. Elle permet également de générer d'intenses sources de rayonnement gamma pour l'étude de la matière comprimée ou des expériences d'électrodynamique quantique en champ fort (SFQED) par collision de faisceaux gammas (voir chapitre IV. Conditions extrêmes).

La salle d'expérience dite LFA, permet à ce jour d'étudier l'accélération d'électrons par laser à très haute énergie (>GeV). Courant 2025, elle permettra également l'étude de l'interaction d'un faisceau laser ultra-intense avec un faisceau d'électrons multi GeV, pour l'étude de la création de paires dans un régime SFQED. L'étude de la matière dense et chaude (densité du solide entre 1 et 50 eV) sera bientôt possible grâce à la présence d'un faisceau de rayon X ultra bref de type bétatron créé par laser, couplé à un second faisceau laser multipetawatt chauffant la matière aux conditions utiles.

X. Physique et société

Le postulat initial est que la Physique est sans conteste utile à la société. Les efforts intenses de recherche en nanoélectronique, visant à diminuer la consommation des composants actifs jusqu'au femto joule par bit pour la manipulation des données, constituent par exemple un impératif de développement technologique durable. Cependant, force est de constater que la communication vers le grand public pourrait être grandement améliorée. Cette communication pourra s'appuyer sur « l'année de la physique » qui débutera en octobre 2023. Cette prospective choisit donc de se focaliser sur l'aspect communication.

Les débats scientifiques contradictoires, nécessaires à la fabrication du consensus scientifique, et autrefois réservés à une audience spécialisée, se font désormais sur la place publique et irriguent de façon polémique la société. Les exemples les plus notables concernent par exemple les sciences de l'environnement (changement climatique…) ou la biologie (gestion du Covid…), mais aussi la physique (intelligence artificielle, réseaux micro-ondes, humanité « augmentée »…). Ces quelques exemples semblent appelés à se multiplier du fait du foisonnement de l'information disponible numériquement. La transparence de la démarche scientifique est saine mais peut troubler la confiance que les citoyens placent dans la parole scientifique institutionnelle, rendue confuse et lui conférant un caractère relatif d'opinion si l'état synthétique des connaissances établies n'est pas clarifié. L'INP, dans le cadre plus général du CNRS, est une institution indépendante et jouit d'une crédibilité certaine, de par le statut des fonctionnaires qui y travaillent au bénéfice de la collectivité, sans suspicion de biais au service d'intérêts particuliers. Cette institution peut donc, et doit servir de référence en synthétisant l'état de l'art des connaissances issues des laboratoires labellisés CNRS, sous la forme d'un rapport vulgarisé et lisible par tous sur des questions d'intérêt publique, sans prérequis de connaissances. Il s'agit de reproduire à l'échelle nationale, pour des thèmes relevant de la physique, le modèle d'entités internationales telles que par exemple l'UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) concernant l'impact des rayonnements ionisants, ou le célèbre GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) concernant le changement climatique. Cette démarche n'entravera en rien la liberté qu'ont les chercheurs et chercheuses d'intervenir individuellement sur tout média de leur choix, mais permettra d'établir un point de référence synthétique sur l'état du consensus scientifique relatif aux questions physiques d'intérêt général. La sélection des questions méritant synthèse à destination du public peut être laissée à l'appréciation de l'INP ou à d'autres instances (CSI, Sections…) qui pourraient désigner un comité d'experts en charge de cette synthèse dont les conclusions tiendront en une page rédigée à l'intention du grand public. Les questions les plus pérennes pourront être traitées dans le cadre de structures telles que les GDS (Groupements de Service), mais dans une approche inverse de celle en place aujourd'hui : les demandes de création de GDS sont à l'initiative des chercheurs et évaluées par les instances. L'INP pourrait créer des GDS sur la base de ses priorités identifiées avec des moyens associés, puis lancer un appel à la communauté de la Physique pour faire vivre ces structures. A l'instar de ce qui existe pour certains GDS[27], un site web dédié pour chaque grande question d'intérêt général pourrait être alors mis en place comme outil de référence. Ce GDS pourrait devenir l'interlocuteur scientifique privilégié des diverses instances politiques désireuses d'éclairer de façon factuelle les débats, pour les médias et pour les citoyens plus généralement.

Les questions générales relatives à la « Science ouverte » sont liées au thème plus spécifique « Physique et société ». La disponibilité des publications et des données vise à conforter la transparence et la confiance dans les résultats scientifiques. Cependant, si cette disponibilité peut être utile pour les communautés de spécialistes qui prendront le temps de lire les articles ou de traiter les données brutes disponibles, favorisant ainsi le débat contradictoire et la convergence vers un consensus scientifique, on peut sérieusement douter du fait que les citoyens auront le temps et la volonté nécessaires pour profiter de cette disponibilité sur des sujets relevant de la Physique, à l'exception peut-être du cadre de l'astrophysique qui jouit d'un intérêt populaire. La « Science ouverte » peut donc être considérée comme un outil essentiellement interne bénéficiant exclusivement à la communauté scientifique.

[27] https://ecoinfo.cnrs.fr/

Les outils de communication externes mis en place par l'INP au travers de ses pages « actualités » ou sa présence sur les réseaux sociaux sont des outils pertinents mais pourraient être complétés dans une démarche de communication plus ambitieuse. La forme de communication la plus consommée aujourd'hui est incontestablement la vidéo de format court (< 15 min). De nombreuses chaines scientifiques françaises traitant des thématiques relatives à la physique (Dr Nozmann, e-penser, astronogeek, Science étonnante…) présentes sur les plateformes vidéo recueillent un grand succès d'audience avec un nombre d'abonnés de l'ordre du million, malgré des moyens de production limités et aucun accès aux laboratoires et chercheurs par le biais d'un canal institutionnel. Le renforcement du lien entre « Physique et société » bénéficierait d'une action de communication de l'INP sous la forme de vidéos postées régulièrement sur une plateforme de grande audience. Les formules de communication existantes initiées par le CNRS (« Zeste de Science », 45000 abonnés ; « Brèves de science » monologue en plan fixe au format court) n'ont pas jusqu'ici rencontré un succès d'audience équivalent et une nouvelle approche plus distincte car impliquant plus directement les scientifiques dans les thèmes et contenus, au sein même de leurs laboratoires respectifs, pourrait être envisagée. Cela suppose de mettre en place une structure légère avec quelques personnels dédiés à l'écriture, au montage, à la réalisation d'animations et d'illustrations, tâches qui sont parfois assumées aujourd'hui par les chercheurs désireux de communiquer plus largement leurs résultats, mais qui ne peuvent, faute de temps à y consacrer, qu'élaborer des textes illustrés correspondant à des pages web statiques. La sélection de vidéos « grand public » à produire pourrait se faire sur la base du vivier des communications INP et des communiqués de presse CNRS concernant le périmètre de la Physique, sur sélection de l'INP ou autre instance (CSI, sections…), et avec la participation des chercheurs impliqués alors soutenus par la structure proposée.

Dans un format de communication plus direct en présentiel avec le grand public, les entités telles que la Cité des Sciences et de l'Industrie, et le Palais de la Découverte rénové qui rouvrira ses portes en 2025 pourraient être des partenaires de choix de l'INP pour accueillir des exposés, ateliers et expériences de Physique. Ici encore, la sélection d'une ou plusieurs thématiques pertinentes pourrait être laissée à l'initiative de l'Institut. Un laboratoire ou consortium de laboratoires compétents serait alors mandaté et doté d'un budget pour le montage des ateliers/expériences ainsi que pour le paiement d'heures aux divers intervenants présents.

La Physique pratiquée dans le cadre des laboratoires relevant de l'INP doit irriguer l'ensemble de la société. Dans cette perspective, les concepts physiques, les principes de la démarche scientifique, et la nature des activités de recherche doivent d'abord être diffusés auprès des élèves de l'enseignement primaire, secondaire, et des étudiants de l'enseignement supérieur. Les outils mis à la disposition des divers intervenants peuvent inclure les contenus de sites CNRS[28] ou ceux des sites initiés par des physicien.ne.s de l'INP[29]. Ces outils doivent être amplifiés et multipliés. Les actions de communication du type DECLIC (Dialogues Entre Chercheurs et Lycéens pour les Intéresser à la Construction des Savoirs)[30], initié par la communauté des biologistes, constitue un exemple à suivre pour la communauté de la physique. Enfin, les actions de formation du type « main à la pâte »[31] doivent également être soutenues et amplifiées. L'incitation à s'impliquer dans la diffusion des savoirs à une population plus large que celle des doctorant.e.s pourrait être renforcée. Cette démarche pourrait également être étendue à l'ensemble des personnels techniques (ITs) qui forment déjà les doctorants et post-doctorants au sein des laboratoires et qui présentent également toutes les compétences les qualifiant pleinement pour ces missions.

Le renforcement du lien entre les sciences et la société est incité par les pouvoirs publics. C'est la motivation et la raison d'être principale de l'appel à projets « Sciences avec et pour la société » lancé dans le cadre de l'ANR. S'il est possible d'impliquer les citoyens dans le processus de recherche pour la collecte de données dans le cadre des sciences humaines, des sciences de l'environnement et du vivant par exemple, il apparait plus difficile de reproduire cette démarche pour les thématiques relevant de la Physique. Aucun projet relevant du périmètre de la Physique n'a d'ailleurs été sélectionné dans l'édition 2022 de l'appel

[28] https://images.cnrs.fr/
[29] https://kezako.unisciel.fr/
[30] www.cerclefser.org/fr
[31] https://fondation-lamap.org/

à projet. La recherche en Physique, du fait de ses spécificités et de l'instrumentation complexe qu'elle requiert aujourd'hui, est bien conduite « pour » la société, mais il est plus difficilement envisageable de la conduire « avec » la société. Une démarche plus adaptée visant à renforcer la visibilité de la Physique et de sa fonction d'utilité au sein de la société pourrait bénéficier d'une nouvelle forme d'appel à projet. La forme la plus classique des appels en cours part du projet de recherche, et pourra diffuser le cas échéant au travers de l'impact sociétal identifié dans le projet. Les financements sont donc aujourd'hui exclusivement délivrés sur des projets ou sur des thématiques dont la proposition est à l'initiative de la communauté des chercheurs. Il pourrait être envisageable de proposer aux institutions publiques, collectivités, et même à des entreprises ou groupement d'entreprises (GIE, branches…) de formuler des problématiques physiques auxquelles elles pourraient être confrontées, puis d'évaluer par les méthodes usuelles la pertinence et qualité scientifique de ces problématiques. Dans l'hypothèse où un financement dédié, par exemple dans le cadre de l'ANR, serait attribué à certaines problématiques d'intérêt scientifique avéré, des consortiums de laboratoires compétents pourraient alors se former pour traiter ces problématiques. Il ne s'agit ici que d'inverser la démarche des consortiums qui doivent justifier l'intérêt sociétal de leur thématique pour satisfaire une partie des critères des appels à projet, mais en partant d'un intérêt sociétal déclaré pour une problématique physique. Cette inversion renforcerait la visibilité du lien entre Physique et société, sans modifier de façon majeure la conduite effective des opérations de recherche, si les thématiques les plus fondamentales continuent de bénéficier d'un financement dédié à volume constant.

ANNEXE 1 – Interdisciplinarité à l'étranger

Vu son intérêt particulier pour le sujet, la direction de l'INP a proposé au CSI d'aborder dans un contexte international les thématiques scientifiques en émergence et avec un caractère d'interdisciplinarité dans les secteurs en lien avec l'INP. Le CSI a formé un groupe de travail (GT) pour prendre en charge le sujet. Les travaux ont débuté en 2020 et se sont déroulés en 3 phases jusqu'en 2022.

Questions générales :
- Quelle échelle de temps faut-il considérer pour l'émergence ?
- Comment détecter la naissance d'un nouveau sujet ?
- L'interdisciplinarité et sa classification: Instituts du CNRS ou Sections de l'INP ?

Le sujet est très vaste et a des ramifications importantes sur les volets :
- Évaluation (évaluation par panel croisé, différentes méthodologies, comment évaluer l'originalité)
- Formation (haute spécialisation vs large formation en dehors du domaine principal)

1. Phase A – Enquête sur « L'interdisciplinarité à l'International » : stratégie et premiers pas

Anna Ceresole, Sandro Vaienti et Livia E. Bove ont rédigé une lettre/questionnaire (français, anglais & italien) qu'ils ont soumis à des partenaires initialement italiens avec l'objectif d'échanger sur les deux points évoqués au CSI :

Interdisciplinarité
- Votre institut est-il impliqué dans des recherches interdisciplinaires ?
- Pourriez-vous préciser celles que vous considérez les plus marquantes ?
- Sont-elles favorisées par des recrutements réguliers (et spécifiques) et soutenues par des projets nationaux et internationaux ?
- Plus généralement, quels sont les moyens et outils que votre Institut met en place pour favoriser la recherche interdisciplinaire ?
- Le développement de la recherche interdisciplinaire est-il une priorité dans l'avenir de votre Institut, et si oui, comment comptez-vous le promouvoir au niveau des partenaires institutionnels pour l'acquisition de fonds et de postes ?

Thèmes émergents
- Développez-vous des recherches sur des questions nouvelles et/ou émergentes ? Si oui est-il possible de donner quelques détails ?
- Au-delà de la dynamique interne du développement de la recherche, disposez-vous d'outils ou d'instances qui visent à identifier des enjeux innovants, compétitifs et à haut risque ?
- Quel est le degré d'investissement de votre institut pour soutenir les orientations de recherche les plus innovantes et les plus risquées ?
- Avez-vous des projets émergents avec des partenaires européens et internationaux et si oui, comment la gestion du personnel, des moyens et des fonds est-elle pratiquée ?

Les destinataires contactés ont été identifiés à l'aide de l'attaché scientifique de l'ambassade Italienne à Paris. Il s'agit d'institutions internationales aussi comparables que possible à l'Institut de Physique du CNRS, et pour lesquelles nous avons cherché des contacts directs. Nous avons également étendu cette enquête pilote à d'autres pays européens (Suisse, Espagne, Allemagne) grâce aux contacts des autres membres du GT. Au final, le GT a adressé ce questionnaire à 14 institutions différentes :
- Italie : INFN, CNR, Université Polytechnique, ICTP, ENS.
- Suisse : EPFL, ETH.
- Allemagne : Instituts Max Planck.
- Espagne : CSIC.
- Royaume-Uni : Imperial College, King's College.
- Suède : Université de Stockholm, Université d'Uppsala, Nordita

Nous avons obtenu quelques réponses de l'INFN (applications médicales telles que la thérapie hadronique, la radiobiologie, le diagnostic par imagerie, la microdosimétrie ; physique de l'environnement ; patrimoine culturel. Émergence : radiomique, progrès dans la thérapie hadronique du cancer, thérapie flash, production de radio-isotopes pour les produits radiopharmaceutiques) mais pas beaucoup des autres instituts. Le sujet est très vaste et il a été difficile d'obtenir des informations comparables.

Parallèlement à cela, nous avons regardé les pages web de ces institutions qui contiennent des informations intéressantes quant à l'interdisciplinarité et aux perspectives. Nous avons contacté directement des chercheurs pour nous aider sur des questions spécifiques. Nous avons également examiné des documents de programmation pluriannuelle et des rapports sur la recherche et l'innovation scientifique quand ils étaient disponibles. Nous avons aussi contacté le directeur de l'ERCEA qui nous a mis en contact avec le responsable scientifique qui coordonne le panel 2 de l'ERC (qui comprend la physique fondamentale). Celui-ci nous a indiqué les documents existants concernant les politiques de l'ERC sur les nouvelles tendances interdisciplinaires en physique et leur base de données de propositions réussies, à utiliser pour une analyse plus approfondie de notre côté.

Il nous semblait opportun de travailler en parallèle avec la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI), notamment sur les articulations au niveau européen. Malgré plusieurs demandes auprès de la MITI, nous n'avons pas pu établir de contact. Nous avons essayé d'avoir, pour chaque institut qui a répondu :

-- une fiche récapitulative CNR, INFN, ICTP….
-- une liste de sujets émergents
-- des contacts directs pour approfondir

Réponses :

-- Presque tous les instituts ont une structure dédiée à l'interdisciplinarité
-- Ils ont des postes *entry level* dédiés, des *calls for proposals*, workshops, …

Nous avons essayé de faire la distinction entre les sujets interdisciplinaires au sein de l'INP et ceux qui impliquent plus d'un CSI.

Conclusions : Les orientations émergentes et interdisciplinaires identifiées ne s'écartent pas des orientations générales relevées dans les travaux des DAS, dont il a été rendu compte lors de diverses réunions du CSI, ou lors des présentations données par les président.e.s de section sur le bilan de leur mandature. Le CSI avait par ailleurs interrogé régulièrement les représentant.e.s des sections sur ces questions (Quels sont les sujets émergents et/ou les sujets ayant pris une place de plus en plus importante dans votre section ? Pensez-vous que cette évolution est spécifique à la France /au CNRS ou reflète une évolution au niveau international ?).

Il est très difficile d'obtenir des informations formelles de la part des chefs de département car la rédaction d'un document de réponse à l'enquête est souvent une tâche lourde. Les collègues préfèrent fournir des informations informelles mais ces renseignements n'ont pas montré d'écart par rapport aux informations obtenues par d'autres voies officielles.

2. Phase B - Analyse des données en libre accès

Afin d'évaluer la position de la recherche française en physique à l'international, on peut recourir à des données accessibles au public. Les programmes des grandes conférences comme le March Meeting de l'American Physical Society sont une source de données intéressante. Une évaluation à la main pour certains sujets relevant de l'INP avec un regard particulier sur les contributions européennes a confirmé la présence des équipes reconnues à l'international pour une certaine thématique. Si, en général, les laboratoires français semblent être un peu sous-représentés dans les contributions au March Meeting, l'analyse des données effectuée a plus ou moins confirmé les attentes.

Il nous semblait également intéressant d'effectuer une analyse des données disponibles sur les projets de l'European Research Council (ERC), analyse initiée par Gert Ingold. La promotion de l'interdisciplinarité

par l'ERC était le thème d'un discours du Président de l'ERC, le Professeur Jean-Pierre Bourguignon le 18/09/2019 à Lisbonne (ERC: Supporting interdisciplinarity, a challenge obligation).[32]

La base de données européenne CORDIS donne un accès libre aux données structurées qui peuvent être évaluées numériquement. Une évaluation des projets ERC permet de comparer des idées scientifiques jugées particulièrement prometteuses pour le futur et de mieux concentrer l'analyse sur les pays européens. Sur les 7605 projets enregistrés du programme "Horizon 2020" présents dans la base de données CORDIS au 16 juillet 2021, le GT s'est limité à l'analyse des panels PE2 (Fundamental Constituents of Matter) et PE3 (Condensed Matter Physics) et des bourses individuelles, soit respectivement 128 et 120 ERC starting grants, 110 et 98 ERC consolidator grants ainsi que 72 et 63 ERC advanced grants. Afin de classer les projets par thématique, le GT a eu recours aux termes European Science Vocabulary (EuroSciVoc) et aux sous-rubriques d'évaluation. Pour établir une relation entre les thématiques des projets et les sections CNRS, nous avons associé les termes EuroSciVoc avec les mots-clés utilisés pour couvrir tous les domaines des sections. Nous avons également établi une relation entre les sous-rubriques et les périmètres des sections relevant de l'INP. Une attribution unique entre projets et sections du CNRS par des moyens numériques s'est avérée impossible dans la plupart des cas. Au-delà des difficultés pour établir des relations uniques entre les termes EuroSciVoc et les mots-clés des sections, l'attribution des termes EuroSciVoc dans CORDIS semble être le résultat d'une analyse de texte automatisée des résumés de projet et ne se révèle pas toujours fiable.

En dépit des difficultés d'un tri automatique par section, quelques analyses à la main ont confirmé essentiellement les sujets émergents déjà notés par les présidents de section. Les liens interdisciplinaires des projets ERC relevant de la physique existent surtout avec la CID54, l'IN2P3 ainsi que l'INSU, avec quelques cas vers l'INC et l'INSIS. Cette analyse a également permis d'avoir une vision globale de la répartition par pays des projets ERC liés aux panels PE2 et PE3. Pour le PE2, on retrouve sur les premières places l'Allemagne (74), le Royaume-Uni (47,33), la France (41,33), l'Italie (32,5) et la Suisse (23,67). Pour le PE3, les 5 premières nations sont l'Allemagne (55), la France (48), le Royaume-Uni (40), les Pays-Bas (26) et la Suisse (25). Les fractions dans les chiffres s'expliquent par des projets entre plusieurs nations. Les différences entre la physique fondamentale (PE2) et la matière condensée (PE3) est en bon accord avec les axes de recherche dominants dans les pays mentionnés.

3. Phase C – Bilan

Après l'envoi d'un questionnaire aux laboratoires et GDR relevant de l'INP par la direction de l'Institut, et suite à la discussion avec l'INP en juin 2022, le CSI a proposé au GT de ne pas aller plus loin dans la recherche des sujets à aborder. Le CSI-INP est bien conscient de la non-exhaustivité de cette recherche, et comme elle se trouve mise en parallèle temporel avec le travail de l'Institut sur la prospective, l'utilité d'aller au-delà indépendamment du travail sur la prospective ne semblait plus avérée. Il est toutefois intéressant de constater que des outils similaires pour révéler l'émergence de nouvelles orientations de recherche et l'interdisciplinarité existent dans différentes organisations au niveau européen.

Conclusions

L'analyse proposée par la direction de l'INP nous a permis de prendre conscience de la complexité de la question de l'interdisciplinarité et de l'émergence, et de la façon dont elle est traitée par des outils similaires dans différents organismes à l'échelle européenne.

Nous concluons que ce type de recherche concernant des sujets aussi ramifiés que l'émergence et l'interdisciplinarité devrait, pour réussir, être mis en œuvre avec une plus grande synergie avec les différents niveaux du CNRS qui s'occupent de la politique scientifique.

[32] https://erc.europa.eu/news/supporting-interdisciplinarity-challenging-obligation

ANNEXE 2 – Enquête concernant les IR*

Lors de son intervention au CSI du 20 octobre 2020, Emmanuelle Lacaze, DAS en charge des très grandes infrastructures de recherche (IR*), a demandé au CSI d'enquêter sur quatre questions concernant l'usage d'un certain nombre de IR* par les communautés française et internationale :

1- Quelle est l'utilisation par la communauté française des XFEL par rapport à la communauté internationale ?
2- Comment la communauté française, au regard de son investissement actuel à l'ESRF, est à même de profiter pleinement des potentialités offertes par l'upgrade ?
3- Quels sont les points forts attirant les chercheurs internationaux à SOLEIL ?
4- Quelle est la participation des chercheurs français sur les synchrotrons internationaux (hors ESRF), sur les sources de neutrons internationales (hors ILL), sur les XFEL internationaux (hors Eu-XFEL) ?

Pour mener cette enquête, le CS a constitué un groupe de travail (GT-IR*). Afin de fournir des éléments de réponse à ces questions, les membres du GT-IR* ont contacté des interlocuteurs institutionnels, tels que les directeurs ou directrices scientifiques des IR* mentionnées, ainsi que certains animateurs de comités de programme. Ces questions ont également été posées à de très grands utilisateurs mais aussi à des utilisateurs occasionnels. Les réponses récoltées sont résumées ci-après. Elles ne prétendent pas être exhaustives mais elles permettent toutefois de relever certains éléments de criticité.

1. Quelle est l'utilisation par la communauté française des XFEL par rapport à la communauté internationale ?

- Les principaux pays acteurs sont l'Allemagne, les États Unis suivis de la Suède. La France arrive seulement en 4ème position, au même niveau que la Russie, suivie par la Suisse, UK et l'Italie. Il est cependant difficile d'estimer « le poids » de la représentation internationale, notamment en raison de l'augmentation récente des utilisateurs des communautés Japonaise et Chinoise.
- **La participation française n'est pas négligeable mais reste encore en-dessous de ses possibilités.**
- L'utilisation des X-FELs est en pleine essor : les communautés se mettent petit à petit à la résolution temporelle, en particulier pour coupler compression dynamique avec diagnostic de diffraction ou XANES.

Des éléments de criticité :

- Les activités de recherche sur les X-FELs demandent souvent un très fort investissement financier et l'implication de grosses équipes.
- Les chercheurs-ses sont souvent globalement plutôt jeunes et sont formés à l'étranger.
- Il existe d'ailleurs une part importante de français.es en poste sur les installations XFEL qui n'arrivent pas ou ne souhaitent pas rentrer en France pour des raisons de financement de leur recherche.

Le CNRS a mis en place des programmes spécifiques de soutien qui sont indispensables à la communauté, entre autres, pour les missions et pour rendre visible les savoir-faire instrumentaux développés sur ces instruments, mais un budget pour financer directement les projets XFEL serait souhaitable.

Les collègues intéressés par les expériences proposées par les XFELS, mais qui n'ont pas encore franchi le pas, se plaignent également souvent d'un manque de ressources humaines : le financement des étudiants-es et postdocs pour lancer de nouvelles activités sur ce type de sujets dans les labos pourrait lever ce verrou.

2. Comment la communauté française, au regard de son investissement actuel à l'ESRF, est à même de profiter pleinement des potentialités offertes par l'upgrade ?

- L'utilisation de l'ESRF par les scientifiques français est très bien équilibrée : le pourcentage d'utilisation est très proche du pourcentage de contribution au budget.

- Les chiffres exacts sont déjà entre les mains du CNRS car ils sont fournis sur une base de trois ans (contact : Eric Humler- Chef Délégation Française)
- D'un point de vue socio-économique, la France a un très bon rendement : du point de vue de l'euro, le facteur de multiplication est de ~2,7 (pour un euro payé par la France au budget de fonctionnement de l'ESRF, 2,7 euros restent en France). Du point de vue du personnel, le facteur de multiplication est ~2,4 (environ 65% du personnel de l'ESRF est français).
- La communauté française a été impliquée dans la planification de la mise à niveau et est constamment tenue informée, des appels à projet novateurs ont été menés.

Concernant la spécificité de l'upgrade, les points positifs cités qui font l'unanimité sont :

- ID27 : la communauté française a été au premier plan pour pousser le projet de cette nouvelle ligne et en profite pleinement : 60% du temps de faisceau fourni est attribué à des projets portés par des équipes françaises venant du CNRS, du CEA ou de l'université. Cette ligne s'adresse de plus à une très large communauté avec des thématiques très variées allant de la biologie à la physique fondamentale, en passant par les géosciences et la chimie. ID27 est une ligne très demandée avec seulement 1 projet sur 3 acceptés. Cette ligne offre la possibilité de faire de l'imagerie X haute résolution. Elle donne aussi accès à un faisceau « *pink beam* » plus brillant et bien adapté aux études sur les liquides et un faisceau sub-µm pour les expériences à haute pression et sur monocristal.

- l'installation d'un laser ns 100 J qui sera couplé dans un premier temps avec la ligne d'absorption X **ID24** pour des expériences sous chocs laser. La communauté française est bien représentée et motrice.

- un projet long-terme qui vient d'être accepté, piloté par le CEA sur la ligne **ID09** pour coupler XRD avec un laser 5J ns, pour des expériences de compression dynamique, et un projet pour coupler *in fine* le laser 100 J avec la XRD, possiblement sur ID09.

- un nouveau **GDR** qui se monte, le GDR CohereX, piloté par Thomas Cornelius, qui a pour but de fédérer la communauté française autour des techniques de rayons X utilisant la cohérence du faisceau.

Quelques éléments à surveiller :

- La cohérence est encore vue comme peu exploitée. L'augmentation du flux cohérent apporte toutefois un gain certain pour certaines techniques (voir chapitre IX. Infrastructures de recherche).

L'augmentation de la luminosité est également largement utilisée pour les mesures haute pression, voire très haute pression (> 2 Mbar). Cependant, il s'agit plus d'une extension dans la gamme pression-température que des mesures conceptuellement nouvelles.

- A l'ESRF, la mise à niveau a été plus guidée par la technologie que par la science : la machine pouvait être améliorée et ceci a été fait avec succès, mais il y a de la marge pour de nouveaux projets phare mettant en avant des cas scientifiques ciblés.

- Enfin, pour complètement exploiter les avancées obtenues en termes de données collectables (forte augmentation de la masse de données résultant de l'accélération des collectes), il reste encore beaucoup à faire pour arriver à étendre à l'ensemble des lignes les analyses de données en direct durant les expériences, et ce à la fois par l'amélioration des algorithmes, leur intégration et les moyens de calculs associés.

3. Quels sont les points forts attirant les chercheurs internationaux à SOLEIL ?

- Les points forts de SOLEIL sont la présence de lignes de lumière complémentaires et aux caractéristiques différentes de celles de l'ESRF (et de PETRA III pour rester en Europe) : on peut par exemple mentionner la ligne PSICHE (ligne de lumière de haute énergie, en particulier pour l'activité HP dans des presses à grand volume) et les lignes infrarouges (AILES et SMIS) qui donnent accès à l'IR lointain, ainsi que MARS, une des rares lignes permettant l'étude des matériaux radioactifs.

- Certaines mesures ne peuvent se faire qu'à SOLEIL, ou mieux à SOLEIL qu'ailleurs.

- Dans le domaine des hautes pressions, SOLEIL a développé toute une série d'expériences qui ne sont possibles quasi nulle part ailleurs (tomographie HP, mesure de densité, structure des liquides avec le système CAESAR) du fait de son unicité en Europe en tant que ligne HP offrant un faisceau blanc.

SOLEIL ne cherche pas à concurrencer l'ESRF, PETRA ou Diamond, mais à développer des niches, de nouvelles expériences, etc… (et ce avec succès).

4. Quelle est la présence des chercheurs français sur les synchrotrons internationaux (hors ESRF), sur les sources de neutrons internationales (hors ILL), sur les XFEL internationaux (hors Eu-XFEL) ?

Sources de neutrons internationales :

- ISIS : ces dernières années, la moyenne d'utilisation par des chercheurs français est d'environ 2-3% (en qualité de PI).
- LNS à PSI : la moyenne sur les 9 dernières années est au maximum de 5%, dont la moitié venant de 2 groupes. Ceci devrait augmenter nettement avec la mise en route de la machine de diffusion aux petits angles qui a été transférée du LLB.
- Pour Munich le pourcentage est similaire à ISIS et à PSI. Quant à la participation de la communauté française à JPARC et SNS, elle reste encore mineure.

Les français préfèrent nettement l'ILL, pour des raisons de proximité, de performance, et aussi pour des raisons de coûts.

Synchrotrons internationaux :

- On retrouve un certain nombre d'utilisateurs français réguliers à PETRA III et APS, moins à SPring-8.
- PETRA III et APS sont utilisés comme alternatives à l'ESRF pour augmenter les possibilités de temps de faisceaux, alors que SPring-8 est plutôt utilisé pour accéder à des lignes complémentaires ou exploiter des collaborations et financements franco-japonais. C'est le cas aussi pour l'accès à des lignes de magnétisme à Diamond par exemple, ou à la tomographie basse énergie proposée par Alba.

Exemple dans le domaine des hautes pressions (HP) : beaucoup de chercheurs déposent des demandes de temps de faisceau à APS, à Hambourg ou à SPring-8 pour compenser le faible taux d'acceptation résultant de la forte pression sur les lignes HP : à l'ESRF, par exemple sur ID27, seulement 1 proposition française sur 7 est acceptée, à SOLEIL sur PSICHE, 1 sur 4 comparée à un taux de 1 sur 2 à APS.

L'ensemble de ces informations a été présenté à la nouvelle direction de l'INP et discuté avec Sylvain Ravy, actuel DAS en charge des IR*. Ce dernier a soulevé un ensemble de nouvelles questions qui se posent concernant l'upgrade de SOLEIL, le paysage futur en termes de sources pour la communauté neutronique française, le contour de METSA, ou encore concernant l'opportunité d'une source X-FEL française. Afin d'avoir une vision plus éclairée sur ces sujets, le CSI a organisé une session de présentations sur les Grandes Infrastructures de Recherche pour la réunion du CSI du 27 Septembre 2022. Sont intervenus sur ces thèmes :

- Jean Susini, directeur scientifique pour les sciences de la vie, SOLEIL : *SOLEIL II : la jouvence (upgrade) du synchrotron SOLEIL*
- Williams Lefebvre, directeur de la fédération de recherche METSA : *Présentation de la FR CNRS 3507 METSA*
- Marie Plazanet, directrice de la 2FDN : *Paysage de la diffusion neutronique en France et ailleurs*
- Marc Simon, directeur du GDR XFEL : *Opportunité de la construction d'un X-FEL français*

Nous avons intégré les informations qui nous paressaient pertinentes dans le chapitre IX. Infrastructures de recherche.

ANNEXE 3 – Intelligence artificielle

Journée dédiée à l'Intelligence Artificielle – Réunion plénière du CSI-INP, 10 mai 2021

Intervenants : Jean-Claude CRIVELLO, Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est ; Cédric RAY, Institut Lumière Matière ; Lionel HERVÉ, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA

Jean-Claude CRIVELLO a parlé de l'application de l'IA au domaine des matériaux et de la chimie. En évoquant l'évolution de l'IA des années 1950 à aujourd'hui, il a posé la question de savoir si la chimie est entrée dans un nouveau paradigme succédant aux paradigmes de : science empirique, science théorique basée sur des modèles et science numérique. La chimie d'aujourd'hui est-elle une science axée sur les données ? Il a abordé cette question en regardant d'abord le contexte international, en donnant ensuite des exemples d'applications et en terminant par le contexte français.

Pour ce qui est du nombre de publications en IA évaluées par les pairs et publiées dans le monde entre 2015 et 2019, J-C. Crivello a fait le constat que la France se trouve à la sixième place après les États-Unis, la Chine, le Royaume-Uni, l'Allemagne et le Japon. Sur le plan économique, le domaine dans lequel l'IA joue le rôle le plus important est la découverte de nouvelles molécules et de nouveaux médicaments avec des investissements privés dans l'IA d'environ 14 milliards de dollars par an.

Pour ce qui concerne la découverte de nouvelles molécules, on utilise des modèles génératifs couplés à la théorie des graphes comme pour le traitement du langage naturel. Ainsi, les propriétés des matériaux enregistrées dans des bases de données peuvent être traitées par l'apprentissage profond pour extraire finalement un modèle prédictif.

Au sujet des applications de l'IA en chimie, J-C. Crivello a souligné la pertinence des méthodes suivantes : algorithmes d'exploration de données comme le criblage à haut débit et l'analyse combinatoire ; algorithmes d'optimisation comme les algorithmes génétiques ou les méthodes évolutionnaires ainsi que les algorithmes d'apprentissage automatique. En particulier, on peut traiter soit des variables quantitatives par des algorithmes de régression, soit des variables qualitatives avec les méthodes des arbres de décision ou des forêts aléatoires. De plus, il a souligné la possibilité d'extraire des informations de la littérature scientifique par l'apprentissage automatique.

Dans le contexte français, J-C. Crivello a énuméré six axes de stratégie : la création en 2019 d'un réseau des instituts interdisciplinaires pour l'intelligence artificielle (3IA) ; un programme d'attractivité et de soutien aux talents ; dynamiser la recherche de l'IA à l'ANR ; renforcer les moyens de calcul ; renforcer la recherche partenariale ; renforcer les coopérations bilatérales européennes et internationales. En chimie, on peut constater une série de rencontres avec soutien de l'INC ou des initiatives locales. De plus, la présence de l'INC dans le domaine d'IA devient visible par exemple dans la participation de l'INC à la création de la CID55 « Science des données » et au groupe de travail IA du COP du CNRS. En revanche, on peut déplorer que même si des appels à projets ciblés existent, ils sont dominés par les mathématiques, l'informatique ou les thématiques sociétales.

J-C. Crivello a conclu en soulignant le caractère interdisciplinaire de l'IA entre informatique, mathématiques et expertises de domaines comme la chimie. Cette interdisciplinarité a été rendue visible grâce à la création du GDR « Intelligence artificielle en Sciences des Matériaux » (IAMAT) porté par l'INC et l'INP.

Le point de vue de la physique à l'INP était abordé par **Cédric RAY** qui a commencé par définir le vocabulaire de l'IA et évoquer les différentes variantes de l'apprentissage automatique (non supervisé, supervisé et par renforcement) et de l'apprentissage profond. Les applications de l'IA dans la vie réelle comme le traitement d'images (reconnaissance faciale, débruitage des photos), du signal (assistants vocaux) et des données (filtre mail, moteurs de recherche) ont souvent un équivalent en physique avec la reconnaissance et segmentation d'images ou l'analyse de spectre et de forme. De plus, la prédiction de comportement, la détection de corrélation et l'exploration de paramètres jouent un rôle dans la physique à l'INP. Des données expérimentales telles que des spectres, ou des données numériques telles que des résultats de simulations, peuvent servir comme données d'apprentissage ou comme données de test pour l'apprentissage automatique.

Ensuite C. Ray a discuté plusieurs applications exemplaires. En chimie théorique, l'apprentissage automatique surpasse les méthodes *ab initio* pour des systèmes contenant typiquement plus de 100 atomes. Pour traiter des systèmes quantiques à N corps comme un système de particules de spin 1/2 sur un réseau carré, un réseau de neurones convolutif peu profond est utilisé. L'apprentissage automatique a également servi à classifier des images, obtenues par microscopie à effet tunnel, de supraconducteurs à haute température critique. Une autre application concerne les structures possibles de glace qui sont particulièrement riches : des descripteurs obtenus par l'apprentissage automatique peuvent être utilisés pour grouper les différentes structures de glace. En géophysique, des tremblements de terre sont simulés et détectés par l'IA. Pour la méthode spectroscopique connue sous le nom de LIBS, l'IA permet d'identifier des

éléments, même dans des structures spectrales complexes, et de traiter des images en temps réel. En biologie, l'apprentissage profond permet d'analyser automatiquement la forme des cellules et de déterminer les contraintes mécaniques locales. Enfin, en cancérologie, les gliomes ont un caractère infiltrant, sans marges bien définies : l'IA couplée à la spectroscopie de fluorescence permet d'améliorer spectaculairement la prédiction des marges et donc l'efficacité de l'ablation chirurgicale de ces tumeurs.

Un exemple d'interaction entre la physique et l'apprentissage profond est la microscopie de fluorescence virtuelle où des données physiques servent à entraîner un réseau de neurones qui permet de construire un modèle d'illumination qu'on utilise ensuite pour optimiser les performances du microscope. Un autre aspect de la relation entre physique et IA concerne la réalisation pratique de réseaux de neurones. Des réseaux optiques tant classiques que quantiques ont été mentionnés et la possibilité de transformer un réseau de neurones en ordinateur quantique universel a été évoquée. Évidemment, les applications de l'IA à la physique concernent également l'IN2P3 où la sélection d'événements en physique des hautes énergies ou la discrimination entre neutrons et rayons gamma dans des détecteurs neutroniques peuvent être cités comme exemples.

En conclusion, C. Ray a souligné que l'IA constitue un nouvel outil pour le physicien, extrêmement performant mais avec de fortes spécificités qui doivent être maîtrisées. Malgré l'excellence de l'IA pour ce qui concerne les tâches de classification et la prédiction de valeurs, il faut être conscient des limites de cette approche. De plus, se pose presque toujours la question de l'interprétabilité des résultats. Pour assurer la qualité des résultats scientifiques il est important d'avoir des techniques de validation à disposition. Enfin, C. Ray a signalé l'importance d'un développement informatique rigoureux qui demande des équipes mixtes et le développement d'une culture du partage de codes et de données. Cet effort mérite d'être réalisé car l'IA présente un fort potentiel en physique.

Dans son exposé, **Lionel HERVE** a discuté l'application de l'IA pour la reconstruction des objets en microscopie de diffraction. Cette méthode peut constituer une façon disruptive de penser la microscopie. L'objectif de la reconstruction est d'établir une relation entre les données mesurées et l'objet observé. On essaie de trouver un modèle acceptable pour reconstruire l'objet, ce qui met en œuvre un processus d'optimisation dans lequel l'IA peut s'avérer très utile car il s'agit d'un type de problème inverse impliquant un grand nombre de difficultés telles que : la haute dimension de l'espace de paramètres ; la présence de bruit ; la relation non-linéaire entre mesures et modèle ; et la perte des hautes fréquences par convolution. La stratégie pour résoudre ce type de problème inverse est basée sur une fonction de coût globale construite sur les données de mesure et les propriétés physiques de l'objet.

Ensuite, L. Hervé a abordé plus spécifiquement la microscopie de diffraction en discutant quelques avantages et inconvénients. L'absence d'une optique de focalisation permet de construire des microscopes simples et robustes à faible coût. Grâce à leur petite taille et parce qu'ils ne nécessitent pas de focalisation, ce type de microscopes est idéal pour leur utilisation dans des incubateurs de cellules. Les microscopes de diffraction possèdent un champ de vision large, mais sans élargissement possible, et leur résolution spatiale est limitée. De plus, on a besoin de fonctions *a priori* pour la reconstruction numérique des objets.

Selon L. Hervé, on peut parler d'une microscopie par calcul où l'objectif est remplacé par un algorithme numérique. Le réseau de neurones est entraîné avec des données de simulation pour obtenir un réseau de neurones convolutif profond et robuste pour permettre d'imager des objets complexes en trois dimensions. Comme application on peut envisager l'identification des événements rares ou la prédiction du destin d'une cellule donnée, ce qui constituerait une avancée significative vers une médecine personnalisée.

En conclusion, la stratégie consiste à inclure une étape de calcul à travers un réseau de neurones au milieu du flux d'analyse. Cette étape peut également être utilisée dans l'analyse des résultats finaux. Il reste quand même quelques inconvénients, surtout l'aspect boîte noire du réseau de neurones et le fait que beaucoup de paramètres ne sont pas interprétables. Dans la microscopie de diffraction, l'IA est bien adaptée à un problème précis dont la généralisation n'est pas garantie.

ANNEXE 4 – Climat

Journée dédiée au climat – Réunion plénière du CSI-INP, 11 avril 2022

Intervenants : Bérengère DUBRULLE, Service de Physique de l'Etat Condensé - SPEC, CEA Saclay ; Freddy BOUCHET, Laboratoire de Physique, ENS Lyon ; Pascal YIOU, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement - LSCE, Gif-sur-Yvette, et Claudia DI BIAGIO, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques - LISA, Créteil.

L'exposé de **Bérengère DUBRULLE** portait sur « *Physique (statistique) et climat* » avec une question de fond : peut-on prédire la météo/le climat ? Une première constatation : « Sur les trente dernières années, la qualité des prévisions effectuées avec le modèle ARPEGE de Météo-France a ainsi gagné un jour tous les dix ans : aujourd'hui, les prévisions à quatre jours sont aussi fiables que les prévisions à trois jours au début des années 2000. ». A partir du modèle de Lorenz, on pourrait tirer la conclusion que « Si pas de prédictibilité avec 3 degrés de liberté, c'est encore pire avec N>3 degrés de libertés. Et *a fortiori* pour la météo ou le climat ! ». Impossible de prédire la météo ou le climat sur des échelles de temps plus longues que 2 semaines. Pourtant le dogme que les prévisions météorologiques seraient impossibles au-delà de deux semaines, est démenti par la mécanique statistique. En effet le chaos produit du mélange dans l'espace des phases (« ergodicité » et « mixing ») ; on a donc l'impossibilité de prédire microscopiquement (trajectoires individuelles), mais on garde la possibilité de prédire macroscopiquement (moyenne statistique).

Un autre volet de l'exposé de B. Dubrulle se résumait en « Peut-on prédire les bifurcations climatiques ? ». Pour cela elle s'est appuyée sur une expérience de laboratoire qui permet de comparer la circulation dans l'atmosphère avec le flot de Von Karman. Les conclusions pour le climat sont résumées en disant : « Si une bifurcation est présente dans notre climat, elle peut ne pas être observable avec des modèles à peu de degrés de liberté parce qu'ils ne contiennent pas les fluctuations → il faut les réintégrer ! »

L'exposé de **Freddy BOUCHET** portait sur les approches théoriques et mathématiques nouvelles pour étudier des phénomènes climatiques qui échappent aux outils existants. On retiendra ici surtout la prédiction des vagues de chaleur extrême à l'aide de simulations algorithmiques d'événements rares couplées avec les réseaux de neurones profonds, l'apprentissage automatique pour les applications climatiques et la théorie des grandes déviations appliquée à l'équation de Boltzmann et à l'équation de Vlasov.

Freddy Bouchet a également présenté le document **Recensement des forces et des structures dans les domaines de la physique et de la dynamique du climat, au sein de l'Institut de Physique du CNRS. Prospective et propositions pour l'INP**. On lit dans ce long rapport que la physique statistique et les mathématiques jouent un rôle essentiel pour la compréhension du système climatique et que cela restera le cas dans les décennies à venir. Des études fondamentales, telles que celles menées par les physiciens de la turbulence, seront cruciales pour une meilleure compréhension future du système climatique. Par ailleurs, la mécanique statistique participe au développement de nouveaux outils, par exemple des algorithmes d'événements rares, le machine learning, qui permettent d'étudier des phénomènes qui ne pouvaient pas l'être auparavant. L'exposé de F. Bouchet terminait avec quatre propositions adressées au CNRS et à l'INP en particulier :

- Le soutien d'un GDR mécanique statistique, processus stochastiques, machine learning et application au climat et à l'environnement.
- Une participation active de l'INP au projet d'Institut Mathématique de la planète Terre. Le projet d'Arnaud Guillin et de Didier Bresch d'un Institut des Mathématiques de la Planète Terre a pour but de soutenir des recherches collaboratives et multidisciplinaires dans le domaine des approches mathématiques ou théoriques pour tous les problèmes en lien avec l'environnement.
- Trouver une solution pérenne aux problèmes de recrutement.
- La création d'un institut multidisciplinaire autour des sciences de l'environnement.

Il est important de rappeler la création du GDR Défis théoriques pour les sciences du climat ; il s'agit d'une initiative de l'INP soutenue par l'INSU et l'INSMI. Au niveau de la prospective, le but de ce GDR est sans doute important et essentiel, dans la mesure où les progrès envisagés « permettront de réduire les incertitudes sur les impacts du changement climatique ». Voici résumés les objectifs de ce GDR :

- Structuration d'une communauté extrêmement multidisciplinaire et dispersée dans de nombreux instituts autour d'objectifs scientifiques communs.
- Déterminer les questions scientifiques qui nécessitent des avancées théoriques fondamentales et faire un travail exploratoire commun d'une démarche scientifique commune pour les résoudre.

- Communication et accroissement de la visibilité de cette communauté auprès des tutelles, des institutions, et du grand public.

- Animation au-delà de la communauté : intégration de nouveaux membres à cette communauté, recensement des initiatives nationales et internationales.

- Développement des relations avec les entreprises qui ont des activités de recherche dans ce domaine scientifique.

Pour terminer, F. Bouchet a aussi présenté l'Institut des Mathématiques pour la planète Terre, piloté par l'INSMI et dont le réchauffement climatique est un des axes prioritaires.

Dans son exposé au CSI-INP, **Pascal YIOU** a indiqué les axes stratégiques de son laboratoire LSCE pour la connaissance du climat et des impacts environnementaux de l'activité humaine : (i) comprendre et analyser la variabilité du climat passé et sa dynamique ; (ii) observer l'environnement actuel (augmentation des gaz à effet de serre, pollution atmosphérique, impacts environnementaux) ; (iii) simuler le changement climatique du passé vers le futur.

Ces trois items engageront les physiciens du climat dans plusieurs directions :

- Etablir une archive et une cartographie historiques du climat pour disposer de séries temporelles passées. Intégrer cela avec l'analyse des échantillons collectés sur le terrain. Etudier les effets des composantes atmosphériques (naturelles et anthropiques) pour évaluer état et évolution du climat.

- Développer des instruments novateurs pour mesurer les concentrations de gaz (à effet de serre, réactifs, aérosols) dans l'atmosphère et étudier les transferts dans l'environnement (aérosols- rayonnement-nuages). Développer des instruments de spectroscopie et de bilan radiatif.

- Modélisation sur toutes les échelles de temps, du passé au futur, et du global au local. Evénements climatiques extrêmes, en synergie avec les mathématiques et la physique statistique. Simulations numériques sur des ordinateurs de plus en plus puissants en lien avec le développement de nouvelles techniques de mesure et d'observation ou d'analyse statistiques.

La présentation de **Claudia DI BIAGIO**, préparée avec P. Formenti, portait sur les Défis expérimentaux, instrumentaux, et méthodologiques pour les sciences du climat, et en particulier sur l'exemple des interactions aérosols-rayonnement-nuages. Une attention particulière a été portée sur le « bilan radiatif » dans différents contextes : l'absorption du rayonnement atmosphérique dans plusieurs bandes spectrales, qui empêche une partie du rayonnement de s'échapper ; le rôle des gaz à effet de serre, avec un focus sur le rôle des aérosols qui modifient les propriétés, la distribution et le temps de vie des nuages.

Connaître mieux les effets des aérosols fait face à plusieurs défis instrumentaux comme la mesure de leur distribution spatiale et temporelle autour du globe, de leur distribution en taille, de leurs propriétés physico-chimiques, et expérimentaux pour relier propriétés microscopiques et effets macroscopiques. Une approche multi instrumentale (multi plateforme et multi échelles) est nécessaire, ainsi que le recours à des techniques d'analyses avancées : IA, machine learning, etc.

ANNEXE 5 – Sciences Ouvertes

Un groupe de travail sur la Science Ouverte (GT-SO) a été installé au CSI dès la fin de la première année de mandature. **Martina KNOOP** a donné une présentation au CSI sur la Science Ouverte au CNRS en décembre 2019, en tant que chargée de mission à l'INP pour l'information scientifique et technique. Le CSI-INP a ensuite consacré une partie de sa réunion du 2 décembre 2020 aux Sciences Ouvertes :

- **Laurent LELLOUCH**, alors chargé de mission « calcul, données et science ouverte », y a décrit le positionnement et les actions de l'INP pour la Science Ouverte (SO). Il a présenté 2 documents stratégiques définissant les objectifs de science ouverte au CNRS : (i) la feuille de route pour la Science Ouverte : atteindre 100% de publications en accès ouvert, développer une gestion/partage des données sur les principes FAIR (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables), développer et promouvoir les infrastructures et outils d'analyse des données, transformer l'évaluation des chercheur.e.s en la rendant compatible avec la SO, (ii) le plan de Données de la recherche : diffuser la culture de données FAIR, accompagner la création de nouvelles pratiques, permettre des périodes d'embargo raisonnables sur les

données…La SO concerne tous les acteurs de la recherche à l'INP : chercheur.e.s, IT, doctorant.e.s, postdoctorant.e.s. L'ouverture de la science a aussi de nombreux objectifs, par exemple :

- Rendre le processus scientifique plus efficace en facilitant la réutilisation de résultats et d'outils
- Permettre l'émergence de nouvelles formes de « méta-sciences », interdisciplinaires ou non
- Assurer la fiabilité des résultats publiés en rendant accessible toutes les étapes du processus
- Rendre différents résultats intermédiaires ou outils directement utilisables et citables, notamment pour une évaluation plus complète des chercheur.e.s
- Réduire les coûts de publication et de lecture d'articles
- Ouvrir la science aux citoyens et la rendre plus accessible aux étudiant.e.s
- Mieux valoriser la diversité des produits de la recherche

La SO requiert une très grande diversité de compétences allant de l'expertise du domaine scientifique en question à une connaissance pointue du monde de l'édition ou à l'utilisation de l'IA pour la fouille de données. Dans ce contexte, la création de la DDOR a pour objectif de donner une cohérence depuis la création de données scientifiques jusqu'à la publication et le stockage des données. La préservation et le partage des données passe par la mise en place de plans de gestion des données spécifiques (cf. outil OPIDoR du CNRS). Une des actions menées par l'INP est de disséminer les bonnes pratiques dans différents domaines de la physique en se basant sur l'expertise et outils développés par les TGIR qui ont l'habitude de gérer des données de communautés différentes. Des actions sont envisagées en lien avec le CSI. Il apparait important de présenter la Science Ouverte et ses enjeux aux nouveaux entrants et d'encourager les communautés à s'engager.

- Des exemples de gestion des données pratiqués dans les IR* ont été présentés par **Jean-François PERRIN** (ESRF) et **Philippe LE BROUSTER** (ILL). La gestion des données commence dès la soumission du projet par les utilisateurs jusqu'à leur analyse et leur publication. Le volume de données est de 20 PB par an couvrant une communauté d'utilisateurs (et donc des pratiques) largement hétérogène. Les motivations sont de faciliter l'accès aux données pour les utilisateurs, d'avoir confiance dans les données, de permettre l'accès lors de l'étape de relecture de publications par les pairs, de former de nouveaux scientifiques en utilisant des données libre d'accès et publiées… Ces infrastructures proposent un stockage central et des outils pour que les utilisateurs puissent accéder à distance aux données, faire du traitement et de l'analyse, ou utiliser des clusters de calculs. L'interopérabilité est assurée en standardisant les méta-données (NeXus & HDF5). Une politique des données commune entre différents TGIR a été mise en place pour à la fois protéger les utilisateurs pendant une période d'embargo de 3 ans et référencer les données dans les publications via un identifiant DOI sous licence CC-BY. Par exemple, pour l'Institut Laue Langevin, 1325 jeux de données sont accessibles, 70 autorisations d'accès supplémentaire pendant l'embargo ont été effectuées (nouvelles collaborations, relecture de manuscrit) et le taux de citation des DOI liées aux expériences est en nette progression (~25% en 2019).

Le GT-SO s'est attaché à mener une action sur 2 plans : a) les pratiques de publication b) les pratiques concernant les données ouvertes.

1. Pratiques de publication en Science Ouverte à l'INP

En 2019-2020, le GT-SO a tenté d'obtenir une photographie des pratiques de publication dans la communauté INP. Pour ce faire, un sondage et des interviews ont été réalisés par les membres du GT-SO, constituant une enquête auprès de la communauté. Fort conscient de la difficulté méthodologique associée à une telle approche, le GT-SO a opté pour une enquête rapide (et donc une photographie un peu floue), afin de pouvoir livrer une analyse en moins d'un an (d'autant que les pratiques en Science Ouverte sont rapidement évolutives). Il est apparu qu'un défaut d'information (légale, économique, médiatique) ralentissait grandement l'adoption des bonnes pratiques de publication. Des discussions régulières avec la DDOR ont également permis de positionner l'analyse dans le cadre plus large de celui des publications CNRS. Cette analyse du GT-SO a été présentée à l'INP, et notamment au chargé de mission SO de l'INP (Laurent Lellouch), qui en a partagé les conclusions. Le GT-SO et le chargé de mission se sont en conséquence mobilisés pour co-réaliser un livret concis sur les pratiques à mieux inciter, bénéficiant pour ce faire des

moyens graphiques et éditoriaux de l'INP. Cette fiche pratique intitulée « *Publier en physique dans un monde de science ouverte* » a été diffusée largement aux unités en 2022, et est disponible sur le site de l'INP.

2. Pratiques des données ouvertes de la recherche à l'INP

Le sujet des données ouvertes de la recherche est devenu central dans les politiques de Science Ouverte enclenchées au niveau européen, au niveau français, et au niveau du CNRS. Le GT-SO s'est informé des très nombreuses initiatives en cours sur le sujet. A cet effet, des membres du GT-SO ont notamment assisté à toutes les journées annuelles sur la Science Ouverte du CNRS, où le sujet a gagné en importance au fil des années. Plusieurs discussions avec la direction de la nouvelle DDOR et avec le chargé de mission SO de l'INP ont également pu être menées. Si des pratiques de données ouvertes sont déjà bien installées dans plusieurs communautés de la physique, notamment celles structurées autour de larges consortiums (hautes énergies, astrophysique, grands instruments), elles restent encore à construire et à faire adopter dans les laboratoires INP structurés sur de petites équipes (majorité des laboratoires). La DDOR coordonne une action avec certaines communautés pilotes de l'INP (par exemple la microscopie électronique) pour tester un ensemble de pratiques. Quelques conclusions sont apparues au GT-SO à ce stade : 1) les pratiques à construire dépendent fortement des communautés, 2) il faut identifier pour chaque communauté une structure idoine pour porter un centre de référence thématique pour les données, 3) un(e) physicien(ne) ne fera quelque chose de ses données que si cela a un sens (meilleure diffusion des travaux, utilité scientifique en propre …), 4) il faudra un support au niveau de chaque laboratoire (*data steward* en lien avec les centres de référence) pour la collection des données de longue traîne dans les laboratoires structurés en petites équipes : les physiciens et physiciennes seuls ne pourront le faire sans le concours de spécialistes et de nouveaux métiers.

ANNEXE 6 – Collectif Labos 1point5

Présentation du collectif Labos 1point5 - Réunion plénière du CSI-INP, 14 décembre 2021

Intervenantes : Tamara BEN ARI, cofondatrice du collectif Labos 1point5 et directrice du GDR Labos 1point5 ; Audrey SABBAGH, co-pilote de l'équipe "Expérimentation Labos 1point5" ; Odile BLANCHARD, co-pilote de l'équipe "Empreinte Carbone" de Labos 1point5

Labos 1point5 est un collectif de membres du monde académique, de toutes disciplines et sur tout le territoire, partageant un objectif commun : mieux comprendre et réduire l'impact des activités de recherche scientifique sur l'environnement, en particulier sur le climat. Le CSI de l'INP a sollicité leur intervention pour un état des lieux de la question environnementale dans la recherche française. Le CNRS s'est en effet engagé en 2022 sur une trajectoire ambitieuse de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre qui impactera inévitablement, dans les années à venir, la conduite de la recherche au sein de ses laboratoires. **L'INP étant l'un des principaux contributeurs aux émissions du CNRS (du fait de la présence, notamment, de grandes infrastructures de recherche), la question de la transition environnementale dans les laboratoires de physique se pose de façon particulièrement aigüe, et transversale vis-à-vis de l'ensemble des thèmes évoqués dans ce rapport de prospective.** Les exposés résumés ci-après fournissent des pistes pour mieux appréhender les enjeux de cette transition écologique, quantifier l'impact actuel des laboratoires, et évoquer des stratégies de réduction des émissions.

Tamara BEN ARI a tout d'abord évoqué le contexte entourant l'émergence de cette question dans la recherche scientifique, venue de préoccupations sociétales qui se sont initialement concrétisées sous forme d'actions et de prises de position individuelles, se structurant progressivement en réseaux puis en initiatives locales avant de gagner l'échelle nationale et les institutions (mouvement « bottom-up »). Ces initiatives ont fait prendre conscience de la nécessité de mesurer l'empreinte carbone de la recherche, conduisant à l'émergence d'un nouveau champ scientifique avec une littérature spécifique en rapide augmentation. Cette quantification, à l'échelle locale (laboratoire, université) ou de projet (publication, colloque…) est essentielle à l'identification des leviers d'action permettant de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) des

activités de recherche, et a motivé la création du collectif Labos 1point5. T. Ben Ari a souligné **la diversité des activités et des émissions selon les thématiques et les laboratoires, le bilan GES à l'échelle locale permettant de proposer des solutions efficaces conçues et délibérées localement dans les laboratoires, à rebours d'une solution uniforme de type « top-down »**.

Elle a ensuite présenté l'organisation du collectif, qui s'est structuré en 2021 avec une partie sous forme d'association, proposant une réflexion de fond à la communauté et jouant un rôle de prospective, et une seconde partie structurée sous forme de groupement de recherche (GDR) centré sur la mise en pratique des actions de transition dans les laboratoires et comportant deux grands axes : « analyse » (bilan GES) et « transition » (mise en place d'actions, accompagnement des laboratoires pilotes). L'exposé a ensuite présenté les résultats d'une enquête menée par le collectif dans les laboratoires de recherche sur la prise de conscience du dérèglement climatique et la nécessité de modifier nos pratiques de recherche pour tenir compte de la crise climatique actuelle : **elle pointe une remarquable adhésion à ce principe, en contradiction avec le faible changement de pratiques** notamment en termes de déplacements en avion. Elle montre que cette résistance au changement découle en partie de préjugés (nécessité de voyager loin/beaucoup pour valoriser sa recherche) qui peuvent être déconstruits par des études spécifiques (faible impact des trajets en avion sur le h-factor des articles publiés).

L'une des grandes réalisations actuelles du collectif, outre son activité de communication et d'enquêtes, est l'outil « GES 1point5 » proposant une méthodologie unifiée permettant aux laboratoires de quantifier de façon standardisée leur empreinte carbone afin d'une part de sensibiliser et d'impliquer le personnel de recherche, d'autre part de piloter les actions à mettre en œuvre. Cet aspect a été largement développé par **Odile BLANCHARD**, qui a présenté l'outil et son périmètre (bâtiments, déplacements professionnels et domicile-travail, matériel informatique, achats, et grandes infrastructures de recherche). A la date de cette présentation 440 bilans GES (BGES) complets avaient été réalisés, et des échanges avec d'autres pays (Allemagne, Grande Bretagne, Suisse) avaient été initiés pour transférer la méthodologie développée. Une première analyse des BGES déjà réalisés pour l'année 2019 est ensuite présentée : les laboratoires de l'INP sont faiblement présents, mais l'ensemble des disciplines scientifiques sont représentées. Ces bilans montrent que si les missions ne sont pas le seul poste d'émission GES, elles représentent environ 4 tonnes-équivalent-CO_2 (t CO2e) par chercheur.e, soit deux fois l'objectif annuel d'émission par personne dans les scénarios de transition bas carbone du GIEC. **Ceci souligne la nécessité impérieuse de limiter à court terme les déplacements en avion dans la recherche scientifique pour atteindre un objectif d'émissions soutenables**. La grande perspective de ce travail concerne la prise en compte des achats, difficile à mettre en œuvre et à normaliser sur l'ensemble des champs de recherche. Dans l'intervalle, un bilan global réalisé à l'échelle du CNRS a estimé que la part d'émissions GES liées aux achats était de 73% : dans ce contexte, l'une des pistes évoquées par Labos 1point5 pour la réduction de ces émissions est **la réorientation massive des financements de recherche de l'équipement/fonctionnement vers les dépenses de personnel**, en parallèle de la prolongation de la durée de vie des équipements (informatique ou autres).

Enfin, **Audrey SABBAGH** a présenté l'axe « expérimentation » du GDR, qui s'intéresse à l'exploration de la diversité des approches possibles pour la réduction des émissions GES en fonction de la situation des laboratoires. **Cette approche, permettant de garder une liberté dans les choix effectués, est une opportunité de repenser pratiques et sens des activités de recherche.** Elle constitue un projet de recherche interdisciplinaire comportant un volet accompagnement (faciliter les débats et les modalités de prise de décision à l'échelle d'un laboratoire, explorer différentes modalités de réduction) et un volet recherche visant à documenter l'ensemble du processus et à évaluer les réductions d'émissions.

Le premier volet s'appuie sur la production d'un « kit 1point5 » regroupant, de la façon la plus large possible, différents outils pour stimuler les réductions d'émissions GES, destiné à être enrichi par les expériences des 20 laboratoires pilotes. Le deuxième volet inclut d'une part une formation aux outils de l'intelligence collective, permettant d'atteindre collectivement une décision partagée par un processus d'exploration/débat, et d'autre part une plateforme collaborative permettant d'échanger sur les bonnes pratiques, et d'organiser des rendez-vous mensuels virtuels pour mettre en réseau une communauté de « laboratoires en transition ». Enfin, A. Sabbagh souligne que les indicateurs suivis pour la mise en œuvre des réductions d'émission se doivent d'accompagner d'autres indices évaluant la qualité de la recherche et la qualité de vie au travail comme des facteurs essentiels d'une transition réussie.

En résumé, ces interventions ont permis de faire un état des lieux de la transition écologique dans les laboratoires de recherche : prise de conscience des personnels et actions « bottom-up », émissions actuelles, niveau d'implication des laboratoires, outils existant pour quantifier les émissions et amorcer une trajectoire de réduction. A partir de ces constats, les points suivants émergent comme essentiels pour envisager l'avenir à court et moyen terme de la recherche à l'INP :

- Une forte majorité des personnels des laboratoires juge essentielle l'adaptation des pratiques de la recherche à la crise climatique actuelle, et estime que la recherche doit « montrer l'exemple » en allant au-delà du rythme de réductions demandées globalement.
- L'analyse des BGES montre que cette « transition bas carbone » dans laquelle s'est depuis engagée la direction du CNRS ne pourra se faire, à l'INP, sans repenser et adapter en profondeur nos pratiques de recherche.
- Globalement, l'INP et ses membres ne pourront faire l'économie d'une réflexion (globale comme individuelle) sur le sens de leurs recherches et son analyse coût/bénéfice sociétal : doit-on, et comment, justifier une recherche fortement émettrice de GES ? Y a-t-il des difficultés, et si oui comment concilier recherche de haut niveau et transition écologique ? Si ceci pose des interrogations sur la façon d'aborder certaines thématiques de recherche très gourmandes en énergie, cette transition ouvre aussi de nouveaux champs de recherche interdisciplinaire par exemple centrés sur l'évaluation des pratiques de recherche, en lien avec les préoccupations sociétales.
- Cette réflexion pourra amener certains personnels à choisir de réorienter leurs activités, choix qui devra être accompagné de façon adéquate en repensant l'attribution de moyens et les évaluations des personnels et des projets.
- *A contrario*, la recherche à l'INP a un rôle à jouer dans la compréhension du dérèglement climatique, l'adaptation et les solutions partielles à ce phénomène et une réflexion doit être engagée sur la priorité à donner aux thématiques de recherche concernées par rapport à d'autres thématiques.
- Enfin, dans un contexte de perte d'attractivité de la physique auprès des étudiant.e.s, cette transition « bas carbone » de l'INP peut être vue comme une chance à saisir similaire à celle de la « chimie verte » qui a redynamisé la recherche en chimie.

ANNEXE 7 – Place des femmes en physique

Le comité parité-égalité du CNRS avait été présenté au CSI-INP en début de mandat par **Martina KNOOP** qui en était co-présidente. Un groupe de travail s'est constitué au CSI sur la place des femmes en physique au mois de mars 2021. Dans un premier temps, le GT a travaillé à faire un état des lieux de la place des femmes dans la recherche en physique en France. Un travail de recensement des données sur les sites officiels et d'entretiens auprès de personnes impliquées dans des associations ou des sociétés savantes a été effectué. Depuis plusieurs années, il existe une réelle prise de conscience du désavantage féminin dans les laboratoires, du rôle des biais de genre sur l'évaluation des carrières des femmes, et des possibles situations de harcèlement au travail. Malgré tout, il semble que les actions menées jusqu'à présent pour pallier ces difficultés sont insuffisamment efficaces.

Le CSI-INP a invité le 16 février 2022 quatre personnes impliquées sur ce sujet à venir faire une présentation en réunion plénière :

- **Nadine HALBERSTADT** (ancienne présidente de Femmes et Sciences) a d'abord introduit le sujet en s'appuyant sur des statistiques récentes du MESRI et du bilan de la section 04 depuis presque 20 ans. Une des constatations est que les comités ayant des préjugés implicites promeuvent moins de femmes lorsqu'ils ne croient pas à l'existence d'un biais de genre lors de leur évaluation. La perception des sciences par les jeunes filles semble également biaisée en amont des études supérieures. Plusieurs propositions sont développées pour augmenter le vivier de femmes souhaitant accéder à des études scientifiques et à la recherche (interventions en milieu scolaire, mentorat, formation du personnel aux stéréotypes de genre…).

- **Dominique CHANDESRIS** a ensuite présenté la commission Femmes et Physique de la Société Française de Physique (SFP) dont elle a été présidente jusqu'en 2021. La sous-représentation des femmes en physique est toujours d'actualité. La commission contribue à l'engagement de la SFP dans son ensemble pour promouvoir les femmes en physique en identifiant les obstacles rencontrés dans la communauté et en proposant des moyens pour les éliminer ainsi qu'en définissant des priorités d'action. Certaines des actions décidées par la commission ont été ensuite détaillées (charte parité, proportion de femmes lauréates des prix SFP, actions de communication pour sensibiliser la communauté sur la parité en science).

- **François OZANAM**, ancien président de la section 14, a continué la discussion en présentant le rapport parité et évaluation non-discriminatoire au CNRS réalisé par le comité parité de la section[33]. La stratégie est d'améliorer la qualité de l'évaluation des chercheurs et chercheuses en réduisant les biais, en particulier ceux de genre, avec un focus sur les critères d'évaluation des tâches de direction. Il s'agit par exemple d'évaluer finement la qualité dans l'exercice des responsabilités (manière dont elles sont exercées, volume et niveau de complexité) et l'impact des réalisations, de prendre en compte les éléments de contexte et de former les membres des instances d'évaluation. Au niveau de la Physique, la proportion de femmes dans les différents corps et grades s'améliore mais nécessite toujours une sensibilisation en amont pour améliorer l'attractivité.

- Cécile SYKES, chargée de mission à l'INP et co-responsable de la cellule parité et égalité de l'INP, a également fait une présentation sur la connaissance de nos biais de genre ainsi que de nos compétences, une piste pour avancer vers la parité et éviter les formulations éveillant les stéréotypes. L'indice d'avantage masculin montre que les femmes ont une évolution de carrière moins reconnue que celles des hommes. Les grandes lignes de l'Action Nationale de Formation « parcours de femmes physiciennes » ont également été résumées.

Dans la suite de ces interventions et des discussions suscitées, le groupe de travail a proposé des recommandations qui ont été adoptées le 12 juillet 2023.

[33] https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03311372/

ANNEXE 8 – Glossaire

ALD : Atomic Layer Deposition
ANR : Agence Nationale de la Recherche
APS : American Physical Society
ARN : Acides RiboNucléiques
ASDEX : Axially Symmetric Divertor Experiment
BGES : bilan GES
BSM : Beyond Standard Model
CCD : Charge Coupled Device
CDM : Cold Dark Matter
CED : cellule à enclumes de diamant
CERN : Organisation Européenne pour la recherche Nucléaire
CKM : matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa
CMB : Cosmic Microwave background
CMOS : Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CRG : Collaborative Research Group
COP : Contrat d'Objectifs et de Performance
CORDIS : Community Research and Development Information Service
CVD : Chemical Vapor Deposition
DAS : Directeur/directrice adjoint.e scientifique
DDOR : Direction des données ouvertes de la recherche
DI : Directeur/directrice d'Institut
DMFT : champ moyen dynamique
DMRG : Groupe de renormalisation des matrices de densité
DUNE : Deep Underground Neutrino Experiment
EELS : Spectroscopie de pertes d'énergie des électrons
EFT : Effective Field Theories
ELI : Extreme Light Infrastructures
EM : champ électromagnétique
ESS : Source à spallation européenne
ERC : European Research Council
ERCEA : ERC Executive Agency
ESRF : European Synchrotron Radiation Facility
Eu XFEL : European X-ray Free-Electron Laser
FAIR : Installation de recherche sur les antiprotons et les ions
FCI : fusion thermonucléaire par confinement inertiel
FCM : fusion par confinement magnétique
FLIM : Imagerie en temps de vie de fluorescence
FIMP : Feebly Interacting Massive Particle
FMRII : source expérimentale Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz
GBAR : Gravitationnel Behaviour of anti hydrogen at rest
GDS : Groupement de service
GENCI : Grand Instrument National de Calcul Intensif
GES : Gaz à effet de serre
GIE : Groupement d'intérêt économique
GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GUT : Grand Unification Theory
h-BN : nitrure de bore hexagonal
HEMT : transistors à électrons de haute mobilité
HP : hautes pressions
HZB : Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IA : Intelligence artificielle
ILL : Institut Laue Langevin
IR : infrarouge

IR* : (très grandes) infrastructures de recherche
ITER : réacteur thermonucléaire expérimental international
JWST : James Webb Space Telescope
LASUP : Plateforme pour l'utilisation des grands aimants supraconducteurs
LCLS : Linac Coherent Light Source
LFA : Local Focal Length Area
LHC : Large Hadron Collider
LIBS : Laser Induced Breakdown Spectroscopy
LIF : Laser Induced Fluorescence
LLB : Laboratoire Léon Brillouin
LLPS : séparation de phase liquide-liquide
LMJ : laser Mega-Joule
LNCMI : Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
LSST : Large Synoptic Survey Telescope
LULI 2000 : Laser de puissance du Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses
MALDI : Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionisation
MBE : épitaxie par jets moléculaires
MEB : Microscope Electronique à Balayage
MEMS : Microsystème électromécanique
MET : Microscope Electronique à Transmission
METSA : Microscopie Electronique en Transmission et Sonde Atomique
MESRI : Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation
MITI : Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires
MOCVD : MetalOrganic Chemical Vapor Deposition
MOF : metallic organic framework
MS : Modèle Standard
NICA : Installation de collisionneur d'ions basée sur le nucléotron
NIF : National Ignition Facility
centres NV : centre azote-lacune
PETAL : PETawatt Aquitaine Laser
PINN : Réseaux de neurones informés par la physique
PSI : Paul Scherrer Institut
PW : péta-watt
QCD : Quantum ChromoDynamics
QED : Quantum ElectroDynamics
QGP : Quark Gluon Plasma
REFIMEVE : REseau FIbré Métrologique à Vocation Européenne
RHIC : Relativistic Heavy Ion Collider
SACLA : SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAser
SFA : Short Focal length Area
SFP : Société Française de Physique
SFQED : Strong Field Quantum Electrodynamics
SPAD : Single-Photon Avalanche Diodes
SOLEIL : Source Optimisée de Lumière d'Energie Intermédiaire du LURE
SQUID : Superconducting quantum interference devices
STEM : Scanning Transmission Electron Microscopy
TAD : Topologically Associating Domains
T_c : température critique de supraconductivité
TCV : Tokamak à confinement variable
THz : térahertz
TLS : Two-Level Systems
TMDs : Transition metal dichalcogenide
UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
XUV : Extremen Ultra Violet
VUV : Vacuum Ultra Violet

WDM : matière dense et chaude (warm dense matter)
WEST : W Environment in Steady-state Tokamak
WIMPS : Weakly Interacting Massive Particle
XANES : X-ray absorption near edge structure
XFEL : Laser à électrons libres et rayons X
XRD : X-ray diffraction
YIG : grenat de fer et d'yttrium
ZRR : Zone à régime restrictif

ANNEXE 9 – Informations sur les figures

I. Interactions fondamentales : (au-dessus) traces de particules (LHC) ; (gauche) simulation de formation des structures avec la matière noire ; (droite) fusion de deux trous noirs.
II. Quantique : Microcircuit à atomes du gyromètre GyrAChip, élaboré dans l'objectif de créer un système de navigation inertielle sans GPS de quelques centimètres cubes.
III. Nouveaux matériaux : Modèle de feuillets d'oxyde de graphène dans l'eau
IV. Conditions extrêmes : Dispositif expérimental comprenant une bobine de champs magnétiques pulsés intenses (jusqu'à 40 T) installée dans la chambre expérimentale d'un laser intense (LULI) pour produire des plasmas fortement magnétisés
V. Optique : Expérience de spectroscopie à haute résolution de l'atome d'hydrogène
VI. Complexité : Vague de sédiments
VII. Physique et vivant : Tumoroïde de carcinome épidermoïde de la tête et du cou marqué en immunofluorescence
VIII. Intelligence artificielle, machine learning et données : Sous-régions fonctionnelles du lobe frontal du cerveau
IX. Infrastructures de recherche : Vue du synchrotron SOLEIL