reflets de la PHYSIQUE

www.refletsdelaphysique.fr

n° 73
juillet 2022

Revue de la Société Française de Physique

Dossier chiralité - 1re partie

Les aspects fondamentaux de la chiralité

Modéliser l'épidémie de Covid-19

Charles-Édouard Guillaume et la découverte de l'Invar®

Société Française de Physique

cnrs

n° 73 - juillet 2022

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr

En route pour 2023 !

Les perturbations engendrées par la pandémie de Covid-19 sur la vie de la Société Française de Physique sont en nette diminution, mais n'ont pas complètement disparu. Ainsi nous avons dû tenir en mars 2022 une assemblée générale sans la conférence scientifique que nous lui rattachons habituellement, entrainant bien évidemment une participation réduite. Nous n'avons pas pu non plus faire de la Nuit des Temps 2022 l'édition très festive dont nous rêvions pour conjurer l'édition 2021 réduite à sa portion congrue. Mais, dans l'ensemble, les activités de la SFP ont repris un cours plus normal. Citons les Journées de la Matière Condensée qui se tiendront à Lyon du 22 au 25 août, plusieurs journées de division déjà tenues ou programmées, des cérémonies de remises de prix.

C'est donc avec confiance que nous pouvons nous projeter sur la programmation des nombreuses manifestations prévues en 2023 pour fêter nos 150 ans. Madame la professeure Sylvie Retailleau, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, a bien voulu accepter notre invitation à présider notre cérémonie inaugurale, qui se tiendra le 16 janvier 2023 au grand amphithéâtre de la Sorbonne. Notons au passage qu'il est déjà bien rare d'avoir comme ministre un ou une physicienne, et encore plus exceptionnel, une participante aux Olympiades de Physique, où S. Retailleau avait fait un remarquable exposé d'électronique pour les lycéens participant à la finale nationale 2022 à l'Université de Paris-Saclay (voir p. 42). Réjouissons-nous de cette proximité, qui devrait être garante d'échanges de qualité.

Le Congrès général de la SFP se déroulera du 3 au 7 juillet 2023 au Centre des congrès de la Cité des sciences et de l'industrie, à La Villette ; son programme est quasiment bouclé. Un Festival de physique se tiendra les 1er et 2 juillet à proximité, aux Docks de Paris (à Aubervilliers), et la programmation de cet évènement grand public ambitieux va entrer en septembre dans une phase très active.

Un autre évènement majeur est la mise en place de l'Année de la Physique, de septembre 2023 à juillet 2024. Il s'agit d'une mobilisation exceptionnelle du monde scolaire, de l'école primaire aux classes préparatoires, autour de la physique, en partenariat avec le ministère de l'Éducation nationale, le CNRS, le CEA et les associations de professeurs UdPPC et UPS. Formation des professeurs aux dernières avancées dans nos domaines, visites de chercheurs et chercheuses dans les classes, visites de classes dans nos laboratoires, concours variés, expositions, bandes dessinées seront au programme, ainsi que plusieurs actions sous notre responsabilité directe : des Olympiades de Physique avec un lustre particulier, la diffusion à grande échelle de la plaquette sur les Métiers de la Physique, une Nuit de la Physique sur le thème « Physique et Sport » qui se déroulera au printemps 2024 en résonance avec les Jeux Olympiques en France.

D'autres évènements marqueront cette année 2023. En voici une liste non exhaustive. Le beau livre sur 150 ans d'histoire de la physique et de la SFP avec un regard prospectif, qui est en cours de rédaction au sein de toutes nos divisions ; une bande dessinée et une série d'affiches sur des lauréates et lauréats de prix ; une série de "*master class*" autour des publications scientifiques ; des jeux vidéo autour de la physique ; une conférence Physique et Mathématiques (la Société Mathématique de France fête ses 150 ans en 2022 !)... Nous marquerons également les anniversaires de personnalités aussi célèbres que Blaise Pascal, né le 19 juin 1623, et Louis de Broglie (un ancien président de la SFP, prix Nobel de physique 1929), dont les articles sur la nature ondulatoire de la matière parurent en 1923, sans oublier plus près de nous, André Lagarrigue(*) qui mit en évidence en 1973 les courants neutres, découverte cruciale pour la construction du Modèle Standard de la physique des particules.

Les forces vives de la SFP se mobilisent donc de façon exceptionnelle pour faire de notre année d'anniversaire un succès mémorable auprès de tous les publics visés, des écoliers aux politiques. Que toutes celles et tous ceux qui y participent en soient ici remerciés. Ce dynamisme magnifique démontre que nous savons rester jeunes, même à 150 ans !

Guy Wormser

Président de la Société Française de Physique

(*) La mort subite d'André Lagarrigue le 14 janvier 1975 l'a empêché à la fois de recevoir le prix Nobel qui lui « tendait les bras » et d'accomplir son mandat de président de la SFP qui devait démarrer en février 1975.

Sommaire

© Dirk van der Made (Wikimedia Commons)

En couverture :
Hélice gauche naturelle formée par une plante grimpante non identifiée, observée au Costa-Rica.

ÉDITORIAL

2 En route pour 2023 !
Guy Wormser

DOSSIER : LA CHIRALITÉ EN PHYSIQUE

4 Introduction

5 Petite histoire de la chiralité, de Pasteur à la physique d'aujourd'hui
Anne Zehnacker et Pascale Roubin

10 La chiralité en physique des particules
Asmaa Abada et Sébastien Descotes-Genon

16 Vers une mesure de la brisure de la parité dans les molécules
Benoît Darquié

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

22 Ce que la Covid-19 nous apprend sur la modélisation des épidémies
Jean-François Mathiot, Laurent Gerbaud et Vincent Breton

HISTOIRE DES SCIENCES

28 De la métrologie à la métallurgie de précision : Charles-Édouard Guillaume, prix Nobel de physique 1920
Philippe Lebrun et Hubert Schaff

32 Louis Pasteur dans l'œil du microscope
Clotilde Policar

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

36 HOBIT. Un concept innovant pour la transformation des pratiques pédagogiques en physique
Bruno Bousquet, Lionel Canioni, Jean-Paul Guillet, Erwan Normand, Stéphanie Fleck et Martin Hachet

AU SEIN ET AUTOUR DE LA SFP

40 Le Bureau national et le Conseil d'administration 2022 de la SFP

41 Actualités de la SFP

42 Olympiades de Physique France XXIX^{e} concours national

44 Prix scientifiques

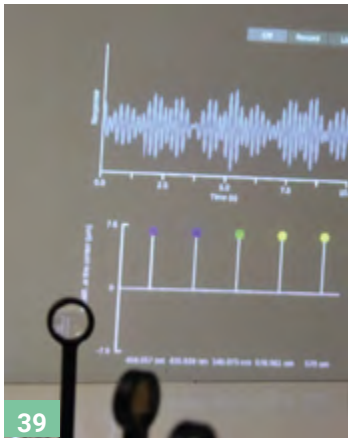
46 Disparitions

REFLETS DE LA PHYSIQUE ET SES LECTEURS

48 Index des articles publiés en 2021

50 Notes de lecture

29



39

Comité de rédaction
Président : Stefano PANEBIANCO
Membres : Michel BELAKHOVSKY - Nadia BOULOUFA - Françoise BOURÉE - Christian BRACCO - Alain BRAVO - Jean-Marie BROM - David CÉBRON - Françoise COMBES - Nicolas DELERUE - Titaina GIBERT - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN - François JULIEN - Michèle LEDUC - Arnaud LE PADELLEC - Gladys MASSIERA - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Patricia PINEAU - Virginie PONSINET - Sophie REMY - Pascale ROUBIN

Ce numéro a été préparé avec la participation de l'Institut de Physique du CNRS.

Directeur de la publication : Jean-Paul DURAUD
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Réalisation graphique : Lætitia MORIN - laetitiamorin@free.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Communication : Mayline VERGUIN - Clémence HIVERT
Service publicité : Bernadette DUFOUR - bernadette.dufour@edpsciences.org
Dépôt légal : 3^{e} trimestre 2022 - ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777

© SFP - Édité à 3100 exemplaires

Imprimé par DUPLIPRINT 733, rue Saint-Léonard – 53100 Mayenne

Société Française de Physique 33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19
e-mail : contact@sfpnet.fr - Serveur : www.sfpnet.fr

Reflets de la physique
Contact : reflets@sfpnet.fr - Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

La chiralité, une propriété incontournable

Quelques exemples venus de la physique

Dossier coordonné par Anne Zehnacker (ISMO, Orsay) **et Pascale Roubin** (PIIM, Marseille)

La chiralité est une propriété géométrique universelle, que l'on rencontre dans toutes les sciences de la nature comme la physique, la chimie ou la biologie, et nombreux sont les domaines où elle joue un rôle prépondérant.

Le mot chiralité dérive du grec χειρ, qui signifie « main », et la façon la plus simple d'appréhender cette propriété est en effet de se référer aux mains, droite et gauche, qui sont des objets chiraux, images l'un de l'autre dans un miroir, mais non-superposables (fig. 1).

Après une introduction au concept de chiralité et à son histoire, ce dossier aborde six exemples de physique où cette propriété joue un rôle majeur : en physique des particules, en physique moléculaire, en spectroscopie, en optique, en plasmonique et en magnétisme.
Les six articles seront publiés dans trois numéros successifs de *Reflets de la physique*.

© Yair Haklai (Wikimédia Commons).

1. *La Cathédrale*, sculpture en pierre d'Auguste Rodin (1908). Musée Rodin, Paris.

LISTE DES ARTICLES DU DOSSIER

Introduction

Petite histoire de la chiralité, de Pasteur à la physique d'aujourd'hui
Anne Zehnacker (ISMO, Orsay) et Pascale Roubin (PIIM, Marseille)

I. Aspects fondamentaux de la chiralité

1. La chiralité en physique des particules
Asmaa Abada et Sébastien Descotes-Genon (IJCLab, Orsay)
2. Vers une mesure de la brisure de parité dans les molécules
Benoît Darquié (LPL, Villetaneuse)

II. Chiralité et lumière

1. Spectroscopies chiroptiques :
quand la lumière explore l'asymétrie de la matière
Laurent Nahon (SOLEIL, Gif-sur-Yvette) et Bernard Pons (CELIA, Talence)
2. Vortex optiques en interaction avec des atomes
Laurence Pruvost (LAC, Orsay) et Thierry Ruchon (LIDyL, Gif-sur-Yvette)

III. Chiralité et nanophysique

1. Chiralité et optique plasmonique
Cyriaque Genet (ISIS, Strasbourg)
2. La chiralité en nanomagnétisme et en électronique de *spin*
André Thiaville (LPS, Orsay)

Petite histoire de la chiralité,

de Pasteur à la physique d'aujourd'hui

Anne Zehnacker[1] (anne.zehnacker-rentien@universite-paris-saclay.fr) et **Pascale Roubin**[2]* (pascale.roubin@univ-amu.fr)

(1) Institut des sciences moléculaires d'Orsay (CNRS et Université Paris-Saclay), Université Paris-Saclay, Bâtiment 520, 91405 Orsay Cedex

(2) Physique des interactions ioniques et moléculaires (CNRS et Aix-Marseille Université), Campus Saint-Jérôme, Case 322, 13397 Marseille Cedex 20

*Également chargée de mission à l'Institut de Physique du CNRS jusqu'au 30 juin 2022

La symétrie est souvent associée à l'harmonie, par exemple des réalisations architecturales ou artistiques. L'antiquité a trouvé en elle un ordre de la nature et, pour l'école pythagoricienne, la nature divine des corps célestes se reflète dans leur symétrie parfaite, c'est-à-dire sphérique. Plus tard, cette idée ne sera pas étrangère aux réflexions de Nicolas Copernic sur la révolution des astres. À leur tour, les naturalistes du 19e siècle considèrent que « la symétrie est en définitive la règle, l'asymétrie l'exception » [1]. L'histoire des sciences est ainsi profondément liée à la notion de symétrie[(a)] [2], et nombreux sont les domaines, depuis la physique des particules à la physique du solide ou à la chimie quantique, où elle joue un rôle prépondérant, que ce soit lorsque la symétrie d'un système est conservée, ou lorsqu'elle est brisée [3]. En effet, dans la nature tout n'est pas symétrique, à commencer par la dissymétrie fondamentale de notre Univers entre matière et antimatière.

Nous nous intéressons ici à la chiralité, définie initialement comme la propriété d'un objet de ne pas être superposable à son image dans un miroir, et nous présentons la naissance et l'évolution de ce concept. Nous introduisons ensuite les six facettes du dossier qui concernent la physique des particules et la physique moléculaire, l'optique et les spectroscopies chiroptiques, la plasmonique et le nanomagnétisme (voir la liste des articles, p. 4).

Quelques éléments d'histoire

L'étude de la chiralité débute en 1811 avec les expériences de François Arago, qui observe qu'un cristal de quartz taillé de façon adéquate fait tourner le plan de polarisation de la lumière. Jean-Baptiste Biot montre en 1812 l'existence de deux types de quartz faisant tourner le plan de polarisation de la lumière dans des directions opposées (dites lévogyre et dextrogyre). Puis William Herschel (1820) relie le

>>>

© Kebes (Wikimédia Commons)

1. Structure en hélice d'un cristal liquide cholestérique, composé de molécules allongées, auxquelles est imprimée une torsion selon une direction perpendiculaire à leur grand axe. La rotation entre les plans successifs donne lieu à une phase chirale.

© Institut Pasteur / Musée Pasteur, Paris

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) observant au microscope les études de Louis Pasteur sur la cristallographie dans son laboratoire du Collège de France en 1848.
Dessin de Hermann Vogel.

>>>

sens du pouvoir rotatoire à l'orientation des facettes du cristal de quartz : des pouvoirs rotatoires de même valeur absolue mais de signe opposé correspondent à des cristaux images l'un de l'autre dans un miroir et non-superposables. La chiralité est donc d'abord une notion introduite en cristallographie, qui concerne une symétrie dans l'espace, et qui est visible macroscopiquement. J.-B. Biot montre cependant que des solutions organiques ou des vapeurs possèdent également un pouvoir rotatoire, sans pour autant l'expliquer. Il observe aussi que l'acide tartrique naturel, résultant de la fermentation du raisin et responsable d'un dépôt cristallin au fond des tonneaux, n'existe que sous forme dextrogyre.

Mais c'est Louis Pasteur qui établit en 1848 le lien entre pouvoir rotatoire et chiralité moléculaire quand il étudie l'acide paratartrique, qui est de même composition chimique que l'acide tartrique naturel mais dépourvu de pouvoir rotatoire [4]. Pasteur fait cristalliser un de ses sels et voit qu'il est composé de cristaux images l'un de l'autre dans un miroir. Il les trie manuellement et les dissout séparément. Les solutions ainsi obtenues possèdent des pouvoirs rotatoires de signe opposé. L'acide paratartrique est donc au niveau moléculaire un mélange d'acide tartrique naturel, dextrogyre, et de son jumeau image dans un miroir, l'acide tartrique lévogyre. Il existe ainsi deux formes distinctes d'acide tartrique, de la même façon qu'il existe deux formes de cristaux de quartz qui sont images miroir l'une de l'autre. Ces deux molécules images sont appelées « énantiomères ».

L'expérience de Pasteur a deux conséquences majeures : la première est la découverte d'une origine moléculaire de la chiralité, qui dépasse ainsi le monde de la cristallographie. La seconde est le lien intime que Pasteur établit entre vivant et chiralité. De même qu'à l'état naturel, seule la forme dextrogyre de l'acide tartrique existe, seul un des énantiomères existe pour les acides aminés, les sucres, et de nombreuses molécules du vivant. Cet énantiomère est toujours le même, c'est celui qui est appelé L pour les acides aminés ou D pour les sucres[(b)]. C'est ce qu'on appelle l'homochiralité de la vie, dont l'origine reste encore actuellement une énigme, et qui est probablement liée à l'origine de la vie elle-même.

C'est seulement en 1894 que le terme « chiralité », que Pasteur appelait dissymétrie moléculaire, a été introduit par Lord Kelvin. Il le définit ainsi : "*I call any geometrical figure, or group of points, 'chiral', and say that it has chirality if its image in a plane mirror, ideally realized, cannot be brought to coincide with itself*." [5] Cette définition renvoie à des règles de symétrie dans l'espace, basées sur l'absence de plan de symétrie ou de centre d'inversion, qui conditionnent la chiralité (voir l'encadré p. 8). C'est cette définition qui est utilisée en chimie, domaine où la chiralité est omniprésente. Les méthodes de séparation d'énantiomères ou celles de synthèse asymétrique, visant à produire préférentiellement un des énantiomères, sont toujours des domaines de recherche extrêmement actifs[(c)]. L'élaboration de matériaux chiraux ou d'édifices supramoléculaires chiraux, polymères ou cristaux liquides, est un domaine en plein essor, la chiralité leur conférant des propriétés optiques ou électroniques particulières[(d)]. La chiralité d'un édifice supramoléculaire peut être une combinaison de la chiralité des molécules constitutives (monomères) et de celle de l'arrangement supramoléculaire. Par exemple, des acides aminés naturels ou des fragments synthétiques bio-inspirés s'enroulent en une hélice dont le sens est dicté par la chiralité des monomères. Certains cristaux liquides tels que les phases cholestériques s'organisent également en hélice (voir fig.1, p. 5). Toutefois, les monomères ne sont pas forcément chiraux et c'est alors uniquement l'arrangement supramoléculaire qui est responsable de la chiralité.

Jusqu'ici, nous avons considéré que deux énantiomères ne se distinguent que par leur symétrie et implicitement qu'ils sont équivalents quand celle-ci ne joue aucun rôle, par exemple quand ils sont dans un environnement non-chiral. En revanche, dans un environnement lui-même chiral, ils ont des comportements distincts. C'est le cas de médicaments chiraux dont les deux énantiomères agissent différemment avec les récepteurs du corps humain, eux-mêmes chiraux. Ce phénomène est illustré par la thalidomide, utilisée pour soigner les nausées matinales des femmes enceintes, mais dont la toxicité d'un des énantiomères est responsable de malformations fœtales observées dans les années 1960. La différence d'interaction entre les deux énantiomères et leur environnement, appelée reconnaissance chirale, est à la base des méthodes de chimie analytique pour la séparation des énantiomères. Elle joue un rôle dans les processus biochimiques comme par exemple la catalyse enzymatique, les mécanismes liés à l'olfaction ou l'activité des neurotransmetteurs.

Mais la chiralité n'est pas seulement une propriété géométrique de la matière, et cette notion s'applique par exemple à une onde plane polarisée circulairement droite ou gauche (encadré p. 8, fig. E2). Les deux ondes sont énantiomorphes. Comparées à des objets statiques, elles sont définies par l'évolution temporelle de certaines

> « Je qualifie de « chirale » toute figure géométrique dont l'image parfaite dans un miroir plan ne peut pas être amenée à coïncider avec elle. »
>
> Lord Kelvin

de leurs propriétés, la rotation de la polarisation et la propagation. À la symétrie d'inversion d'espace (appelée aussi parité) s'ajoute la symétrie d'inversion du temps. La considération de ces deux types de symétrie pour l'onde polarisée circulairement permet de comprendre une définition plus générale de la chiralité, donnée par Laurence Barron en 1986 [6] : "*True chirality is exhibited by systems that exist in two distinct enantiomeric states that are interconverted by space inversion, but not by time reversal combined with any proper spatial rotation*[e]." L'onde plane polarisée circulairement est « vraiment » chirale, car renverser le temps et appliquer une rotation ne modifie pas les propriétés de l'onde et ne suffit pas pour interconvertir les deux formes de polarisation circulaire. Tout comme ils interagissent différemment avec un environnement chiral, deux objets énantiomères interagissent différemment avec une onde plane polarisée circulairement droite ou avec une onde plane polarisée circulairement gauche. Néanmoins, l'interaction électromagnétique conserve les propriétés de symétrie liées à la chiralité que sont la symétrie d'inversion ou la symétrie miroir. Les grandeurs mesurées résultant des interactions entre les deux énantiomères et les deux polarisations sont symétriques : elles changent de signe quand on change l'énantiomère ou le sens de la polarisation circulaire. C'est le cas pour le dichroïsme circulaire d'absorption, qui désigne la différence d'absorption lumineuse par une molécule chirale entre une onde polarisée circulairement gauche et une onde polarisée circulairement droite, et qui est de signe opposé pour les deux énantiomères.

La chiralité dans différents domaines de la physique

Contrairement à l'interaction électromagnétique, l'interaction faible ne conserve pas la symétrie de parité (P) : on dit qu'elle viole la parité et, en ce sens, elle est qualifiée de chirale. En 1956, l'expérience de Madame Chien-Shiung Wu démontre cette violation lors de la désintégration de noyaux de cobalt 60 par émission d'électrons (désintégration β^-). Par la suite, s'est ajoutée à la notion de parité celle de conjugaison de charge (C) transformant une particule en son antiparticule. La violation de la symétrie CP par l'interaction faible est liée à l'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers et a fait l'objet de travaux récompensés par le prix Nobel de physique 2008. Ces aspects très fondamentaux de physique des particules ont des répercussions en cosmologie et sont abordés dans l'article d'Asmaa Abada et Sébastien Descotes-Genon.

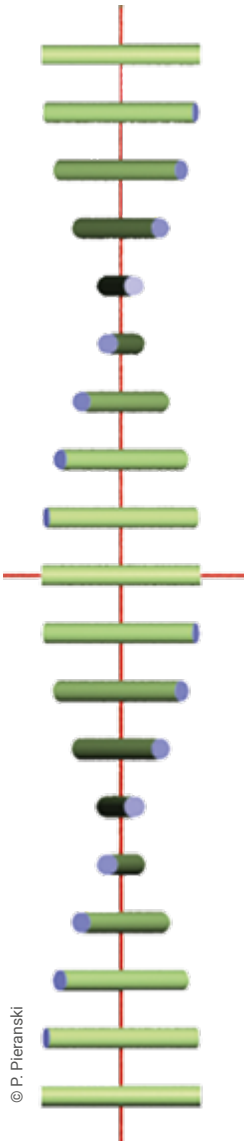
En raison du recouvrement non nul du nuage électronique avec le noyau, la violation de parité par l'interaction faible s'exprime aussi en physique atomique et moléculaire, mettant en œuvre d'autres processus d'interaction que pour la désintégration β^-, sans échange de charge entre particules et avec des effets beaucoup plus faibles. Des anomalies dues à la présence d'une interaction entre les électrons et les protons ou neutrons du noyau qui viole la parité ont ainsi été observées dans des transitions électroniques très peu intenses du césium, puis pour des atomes plus lourds où elle se manifeste plus fortement [7]. En revanche, la violation de la parité n'a encore jamais été observée pour des molécules. Il s'agit cette fois de mesurer une différence d'énergie entre deux énantiomères, différence extrêmement ténue mais qui pointe directement sur le lien possible entre l'interaction faible et la chiralité moléculaire, et donc aussi sur l'origine possible de l'homochiralité du vivant. Cette mesure représente un défi expérimental important, dont les différents enjeux sont présentés dans l'article de Benoît Darquié.

Toujours dans le cadre de la physique moléculaire, mais en revenant aux interactions électromagnétiques, l'action discriminante de la lumière polarisée circulairement droite ou gauche sur deux énantiomères est à la base des spectroscopies dites chiroptiques. Un exemple est le dichroïsme circulaire d'absorption mentionné plus haut. Ces effets sont en général très faibles, contrairement au cas du dichroïsme circulaire de photoélectrons qui se révèle dans l'analyse des électrons émis par la molécule chirale suite à l'ionisation par une onde lumineuse polarisée circulairement, et dont l'asymétrie droite-gauche se traduit par une asymétrie avant-arrière de l'éjection des électrons. Cette spectroscopie chiroptique a été développée récemment et ses potentialités sont décrites dans l'article de Laurent Nahon et Bernard Pons.

Le correspondant quantique de la polarisation circulaire de la lumière est le moment cinétique de *spin* du photon qui, projeté sur la direction de propagation de l'onde, peut prendre deux valeurs de quantification (± 1). Le photon a aussi un moment orbital angulaire qui correspond à une inclinaison du vecteur de Poynting par rapport à l'axe de propagation, et dont les valeurs de quantification sont les entiers relatifs. Avec le contrôle optique de ce moment orbital angulaire, on arrive à produire des faisceaux laser à front d'onde hélicoïdal, appelés « vortex optiques », qui sont droits ou gauches selon le sens de l'hélice par rapport à la direction de propagation de l'onde. Ces vortex de lumière, ainsi que leur interaction avec des atomes, sont introduits dans l'article de Laurence Pruvost et Thierry Ruchon.

En physique du solide, la présence d'une surface crée une discontinuité qui brise la symétrie existant dans le volume et qui contribue à l'existence

>>>



© P. Pieranski

Hélice cholestérique

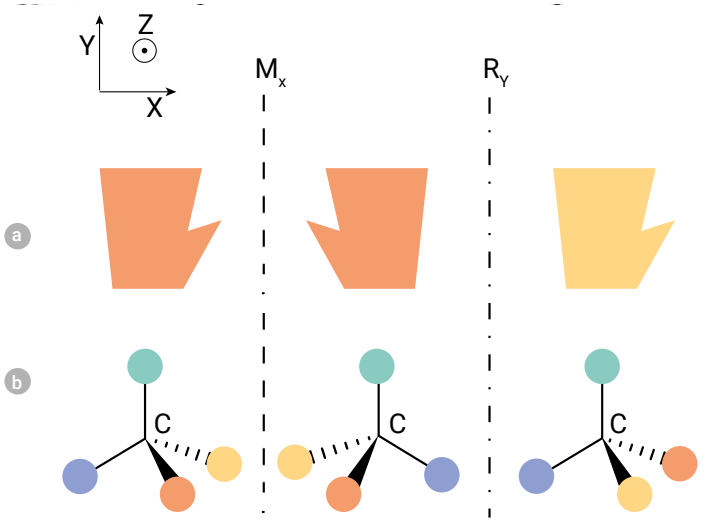
➲ CHIRALITÉ ET OPÉRATIONS DE SYMÉTRIE

Cet encadré introduit quelques notions de base de la chiralité dans l'espace à trois dimensions (x, y, z) à partir des opérations de symétrie suivantes :

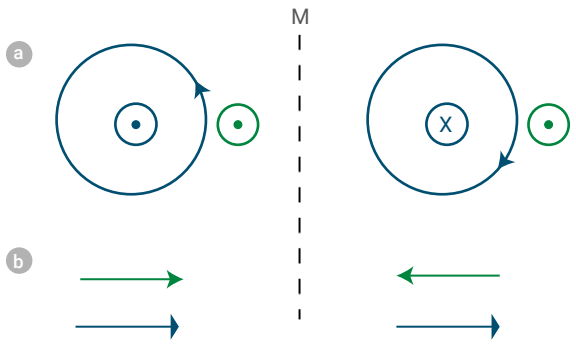
- la symétrie miroir M, c'est-à-dire la symétrie par rapport à un plan, par exemple M_x par rapport au plan (y, z), transforme les coordonnées (x, y, z) d'un point en (-x, y, z) ;
- la symétrie de rotation de 180° par rapport à un axe, R, par exemple R_z autour de l'axe (z), transforme les coordonnées (x, y, z) d'un point en (-x, -y, z) ;
- la symétrie d'inversion, aussi appelée parité P, transforme les coordonnées (x, y, z) en (-x, -y, -z).

Alors que les symétries de rotation appliquées à un objet le déplacent dans l'espace et donc ne modifient pas sa structure – l'objet est superposable à son image –, la symétrie miroir transforme un objet en un autre, qui, en fonction de sa propre symétrie, peut être le même objet ou un objet distinct. Dans ce dernier cas, l'objet (ainsi que son image, bien sûr) est chiral et les deux objets sont dit énantiomorphes (énantiomères pour des molécules). Dans le premier cas, l'objet est achiral. C'est le cas s'il comporte des éléments de symétrie comme des plans de symétrie ou un centre d'inversion. L'inversion P est équivalente à une symétrie miroir suivie d'une rotation, par exemple M_x suivie de R_x ; c'est pourquoi la chiralité se caractérise indifféremment par rapport à M ou à P, et de façon plus générale comme l'absence d'axes de symétrie impropre (rotation quelconque autour d'un axe, suivie d'une symétrie miroir dans un plan perpendiculaire à cet axe).

Les deux mains gauche et droite sont des images miroir l'une de l'autre (miroir M_x sur la figure E1). Si on applique la rotation de 180° R_y, la main, si elle est initialement une main droite, reste une main droite, mais on voit sa paume au lieu de son dos (jaune et orange respectivement sur la fig. E1a). Il en va de même pour des molécules chirales, par exemple celles qui possèdent un carbone asymétrique, c'est-à-dire un carbone lié à quatre atomes ou substituants distincts (fig. E1b).



E1. Symétrie par rapport au plan (y, z), suivie d'une rotation de 180° autour de l'axe (y), de différents objets chiraux.
(a) Schéma d'une main, emblématique de la chiralité.
(b) Schéma d'un objet chiral, par exemple une molécule avec un carbone asymétrique ; les traits pointillés et épais représentent respectivement des directions vers l'arrière et l'avant du plan de la figure.



E2. Représentation des images miroir d'un système composé d'une boucle orientée (en bleu) et d'un vecteur (en vert). Il est équivalent de représenter la boucle par le vecteur bleu placé en son centre et qui est orienté dans le sens direct.
(a) Le plan de la boucle est perpendiculaire au plan de symétrie miroir M. Alors que les deux vecteurs bleu et vert sont parallèles, le vecteur vert ne change pas d'orientation par la symétrie miroir. En revanche, l'orientation du vecteur bleu, reliée à celle de la boucle, est inversée. (b) Le plan de la boucle est parallèle au plan de symétrie miroir. La boucle n'est indiquée que par le vecteur bleu. Cette fois, c'est le sens d'orientation de la boucle qui ne change pas par la symétrie miroir, alors que le vecteur vert change de sens.

Un système constitué d'une boucle plane orientée et d'un vecteur perpendiculaire au plan de la boucle (indépendant de l'orientation de la boucle) est chiral (fig. E2). Ce système peut représenter un trièdre, une vis, une hélice, une onde plane polarisée circulairement, le *spin* d'un électron et sa quantité de mouvement, etc. Les énantiomorphes correspondants sont les trièdres direct et indirect, les vis au pas « normal » et au pas inversé, les hélices droite et gauche, les ondes planes polarisées circulairement droite et gauche, etc.

Brisure de symétrie

On parle de brisure de symétrie quand la symétrie d'un objet ou d'un système est abaissée : une molécule dans laquelle on change des substituants ou un cristal infini dont on considère la surface peuvent perdre leur symétrie d'inversion. Par ailleurs, on peut observer une dissymétrie dans un ensemble d'objets chiraux quand il y a un excédent « anormal » d'une des deux formes. C'est le cas pour les acides aminés ou les sucres, ou pour la matière par rapport à l'antimatière. L'origine de ce phénomène peut être essentielle, si une loi de la physique n'agissant pas de façon symétrique est à l'œuvre, ou accidentelle, si par exemple ce sont des conditions particulières qui ont sélectionné un seul énantiomère.

En physique des particules, on sait qu'il y a brisure de symétrie (violation de la parité) par l'interaction faible : dans le cas de la désintégration β^- du cobalt, on n'observe qu'une seule des deux combinaisons énantiomorphes *spin*-impulsion possibles pour l'électron (article de A. Abada et S. Descotes-Genon, pp. 10-15).

>>>

de nombreux effets chiraux. Dans le cas d'une surface métallique, cette discontinuité est aussi à l'origine des modes lumineux évanescents exaltés qui constituent les enjeux de la plasmonique. Les effets de chiralité dans l'interaction lumière-matière en plasmonique sont décrits dans l'article de Cyriaque Genet, avec notamment de récents développements sur des matériaux bidimensionnels ou des nanostructures et leurs implications dans les domaines de la nanophysique ou de l'électronique quantique.

La chiralité associée aux matériaux bidimensionnels est également une composante essentielle dans le domaine du magnétisme. Dans les matériaux magnétiques, la combinaison entre l'interaction d'échange, qui favorise l'orientation parallèle de deux *spins*, et l'interaction de Dzyaloshinskii-Moriya, qui favorise leur orientation perpendiculaire, explique l'existence de structures magnétiques ordonnées complexes et conduit à des organisations chirales des *spins*, en hélice ou en cycloïde, dues soit à la disposition chirale des atomes constituant l'édifice, soit à la brisure de symétrie induite par une interface. Des exemples de systèmes chiraux tels que les parois entre domaines magnétiques dites de Néel ou les « vortex magnétiques », appelés aussi skyrmions, sont détaillés dans l'article d'André Thiaville, avec la mention de leurs implications en nanomagnétisme et en électronique de *spin*.

Comme nous avons essayé de le montrer dans cette introduction, la chiralité est une notion très largement transdisciplinaire et qui comporte de multiples facettes, tant sur les aspects fondamentaux que sur les applications. Elle intervient dans de nombreux domaines, de la physique théorique à l'optique, de la science des matériaux à la chimie organique et à la biologie. Chacun de ces domaines construit sa propre image de la chiralité et ce dossier n'aborde que quelques aspects de physique contemporaine. La chiralité repose sur la notion de brisure de symétrie qui est au cœur de deux questions aussi fondamentales que l'origine du vivant et la composition de l'Univers. Cela nous renvoie à ce que Pasteur disait de façon visionnaire : « *Si les principes immédiats de la vie sont dissymétriques, c'est que, à leur élaboration, président des forces cosmiques dissymétriques.* » [8]

Exemple d'enroulements chiraux dans les coquilles de deux différentes espèces fossiles d'escargot de mer. À gauche, coquille de *Neptunea angulata* ; à droite, coquille de *Neptunea despecta*.
Source : P.H. Nyst, *Ann. Mus. r. Hist. Nat. Belg.*, **3**: 1-162 (1878), 28 pls. (1881). Scanné par Tom Meijer.

(a) Pierre Curie a donné une vision globale de la question de la symétrie dans les phénomènes physiques, notamment avec son principe de symétrie : « lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits ».

(b) Notons qu'il n'y a pas de lien direct systématique entre cette caractéristique géométrique L ou D de l'énantiomère et son pouvoir rotatoire, qui peut être lévogyre ou dextrogyre.

(c) Notamment, la catalyse asymétrique a été récompensée par deux prix Nobel en 2001 et 2021. La France a eu un rôle pionnier dans ce domaine avec les travaux de Henri Kagan.

(d) Nous n'aborderons pas dans ce dossier ces différents aspects. Les aspects fonctionnels de la chiralité sont étudiés par les équipes participant au GDR CNRS Chirafun. (https://chirafun.sciencesconf.org/)

(e) Une rotation propre est une simple rotation dans l'espace, alors qu'une rotation impropre est une rotation suivie d'une symétrie d'inversion. Seule la première ne change pas l'orientation, directe ou indirecte, d'un trièdre.

1• M. Saint Ange, *Dictionnaire universel d'histoire naturelle*, édité par Charles Henry d'Orbigny (1849).

2• P. Curie, « Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique », *J. Phys. Théor. Appl.* **3** (1894) 393-415.

3• K. Brading, E. Castellani, N. Teh, "Symmetry and Symmetry Breaking", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2021 Edition), Edward N. Zalta (ed.).

4• C. Policar, « Louis Pasteur dans l'œil du microscope », ce numéro, pp. 32-34.

5• *The Molecular Tactics of a Crystal* , § 22, footnote p. 27, Clarendon Press, Oxford, UK (1894).

6• L. D. Barron, "True and false chirality and absolute asymmetric synthesis", *J. Am. Chem. Soc.* **108** (1986) 5539.

7• J. Guéna, M. Lintz, M.-A. Bouchiat, "Atomic parity violation: Principles, recent results, present motivations", *Modern Physics Letters* **A20** (2005) 375-389.

8• L. Pasteur, *Écrits scientifiques et médicaux,* édité par André Pichot, Flammarion (2012).

La chiralité en physique des particules

Asmaa Abada (asmaa.abada@ijclab.in2p3.fr) et **Sébastien Descotes-Genon** (sebastien.descotes-genon@ijclab.in2p3.fr)
Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie (UMR 9012, CNRS, Université de Paris-Saclay, Université de Paris), Bâtiment 100, 15 rue Georges Clémenceau, 91405 Orsay Cedex

En physique des particules, la chiralité permet de caractériser les particules fondamentales de *spin* 1/2 qui constituent la matière : d'une part les quarks, d'autre part les leptons. Dans le cadre du Modèle Standard, une seule interaction fondamentale, l'interaction faible, distingue les chiralités gauche et droite. Cela a des conséquences expérimentales profondes et très différentes pour les quarks et les leptons, concernant d'une part, l'asymétrie entre matière et antimatière et d'autre part, la nature et la masse des neutrinos.

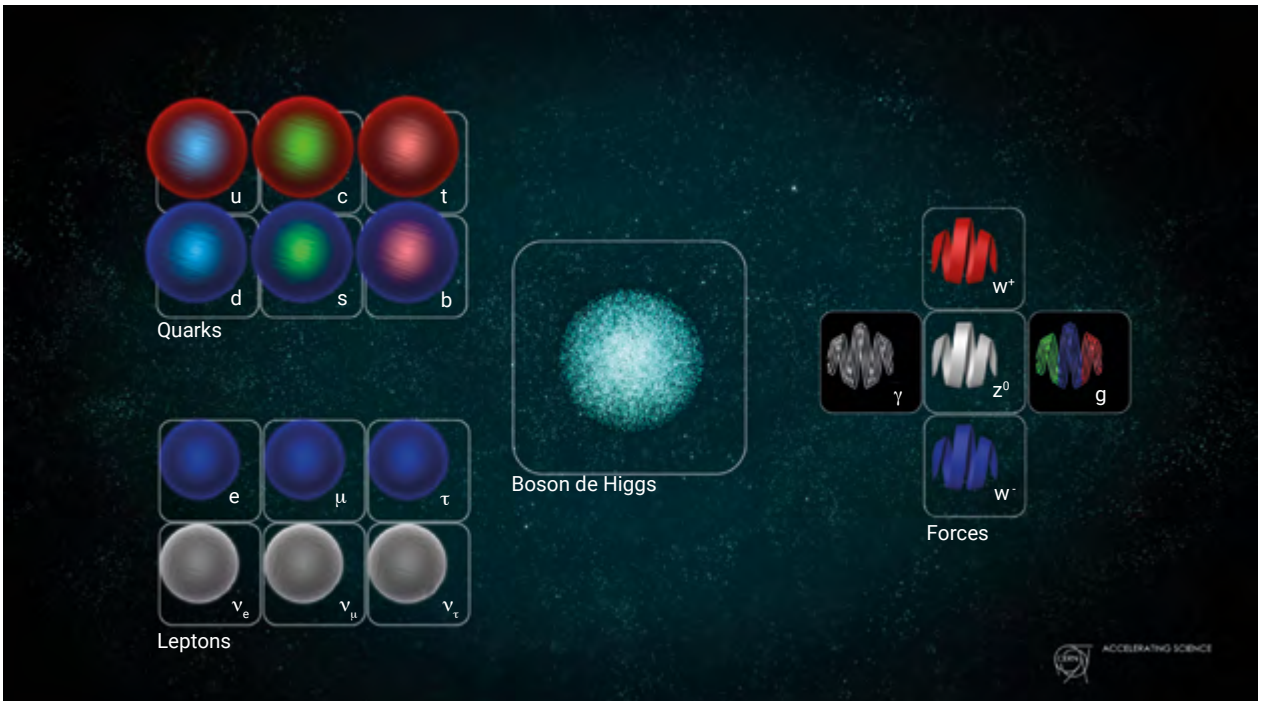
Quels sont les constituants fondamentaux de l'Univers ? Comment s'agencent-ils pour former la matière qui nous environne et qui nous constitue ? Et peut-on expliquer leurs propriétés et leurs interactions avec des lois simples et universelles ? Ces questions ont guidé la physique des hautes énergies tout au long du vingtième siècle, d'abord en physique nucléaire, puis en physique des particules, et elles continuent à orienter les recherches à l'heure actuelle. Au fil des découvertes, il est apparu que le concept de chiralité joue un rôle très important pour décrire certaines propriétés des constituants élémentaires de la matière et pour expliquer l'évolution de l'Univers depuis ses premiers instants jusqu'à nos jours.

Au fur et à mesure, il a été possible de sonder la matière à des distances de plus en plus petites, en procédant à des collisions entre particules effectuées à des énergies de plus en plus élevées, que ce soit *via* des rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère terrestre ou dans des collisionneurs de particules. Si, initialement, il s'agissait simplement de casser la matière connue en sous-constituants de plus en plus petits, ces collisions ont fini par entrer dans un régime à la fois quantique et relativiste qui a permis de créer des particules nouvelles, absentes de la matière ordinaire, et pourtant indispensables pour donner une vision cohérente de la physique des particules, le Modèle Standard. Cette description s'effectue dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui s'appuie sur la combinaison de deux avancées majeures de la physique contemporaine : la relativité et la mécanique quantique. Elle s'appuie aussi de façon essentielle sur la notion de symétrie pour décrire les propriétés des particules et leurs interactions.

Le Modèle Standard de la physique des particules

Dans le Modèle Standard, la matière ordinaire est décrite à l'aide de seulement quatre types de particules élémentaires, des fermions[(a)] de *spin* 1/2 (fig. 1) qui sont les quarks et les leptons. Ils sont agencés en doublets avec deux types de quarks et deux types de leptons. Il existe trois familles de quarks et de leptons. La première famille est constituée du doublet de quarks appelés *u* (*up*) et *d* (*down*) et du doublet de leptons que sont l'électron et le neutrino qui lui est associé, noté ν_e. Les quarks *u* et *d* constituent les protons (deux *u* et un *d*) et les neutrons (un *u* et deux *d*) au cœur des noyaux atomiques, entourés d'un cortège électronique pour former des atomes. Le neutrino électronique intervient pour décrire la radioactivité de certains noyaux comme le carbone 14, $^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + e^- + \bar{\nu}_e$: le quark *d* présent dans un des neutrons du noyau de carbone peut changer de nature et se désintégrer en un quark *u*, tout en émettant un électron et un (anti)neutrino électronique.

Mais les collisions de haute énergie ont mis en évidence une structure plus complexe de la matière. Tout d'abord, il est apparu qu'à chaque particule du Modèle Standard est associée une antiparticule, qui possède la même masse mais des nombres quantiques (comme la charge électrique) opposés. Lors de collisions énergétiques, il est possible de convertir une partie de



© Daniel Dominguez/CERN

1. Une description synthétique des particules présentes dans le Modèle Standard. À gauche, sur les trois colonnes, se trouvent les trois familles de fermions élémentaires, avec sur chaque colonne des doublets de quarks et de leptons. À droite, se trouvent les bosons médiateurs de trois interactions fondamentales : le photon γ pour l'interaction électromagnétique, les bosons $W^{\pm}$ et Z^0 pour l'interaction faible et les gluons *g* pour l'interaction forte. Au milieu se trouve le boson *H* ou boson de Higgs, lié au mécanisme responsable de la masse des particules. La sensibilité des fermions aux trois interactions fondamentales est indiquée par des couleurs communes.

l'énergie de la collision en des paires particule-antiparticule.

Si on a d'abord pu découvrir des antiparticules associées à la matière ordinaire, comme l'antiélectron (ou positron), les expériences à des énergies croissantes ont mis en évidence d'autres constituants élémentaires, absents de la matière ordinaire. Ces autres constituants s'organisent en deux familles, similaires en tout point à la première famille de la matière ordinaire, hormis du point de vue de leur masse plus élevée. Ils se désintègrent très rapidement (en moins de quelques nanosecondes) en des particules plus légères, aboutissant finalement aux constituants de la première famille. Ainsi, un quark *t* (équivalent du quark *u* pour la troisième famille) se désintégrera en 10^{-25} seconde, par exemple en un quark *b* (équivalent du quark *d* pour la troisième famille), un (anti) électron et un neutrino électronique. Ce quark *b* est lui-même instable et se désintégrera très rapidement en un quark plus léger, et ainsi de suite.

Les désintégrations de ces particules des deuxième et troisième familles rendent difficile leur observation et leur étude. Ces désintégrations sont causées par l'une des quatre interactions fondamentales, l'interaction faible. Les trois autres interactions concernées sont l'interaction forte (qui agit sur les quarks, mais pas sur les leptons, et explique la cohésion des nucléons et des noyaux atomiques), l'interaction électromagnétique et l'interaction gravitationnelle (négligeable au niveau subatomique). Le Modèle Standard, qui est quantique et relativiste, ne concerne que trois de ces interactions (forte, faible, électromagnétique), tandis que la gravitation est décrite dans le cadre de la relativité générale (relativiste mais non quantique). Les trois interactions en question sont décrites par l'échange de particules médiatrices, des bosons de *spin* 1 : photon γ pour l'interaction électromagnétique, bosons $W^{\pm}$ et Z^0 pour l'interaction faible, gluons *g* pour l'interaction forte.

Le Modèle Standard comporte un dernier élément, le boson *H* (ou boson de Higgs), lié au mécanisme responsable de la masse des particules dans cette théorie.

Hélicité, chiralité et symétries discrètes

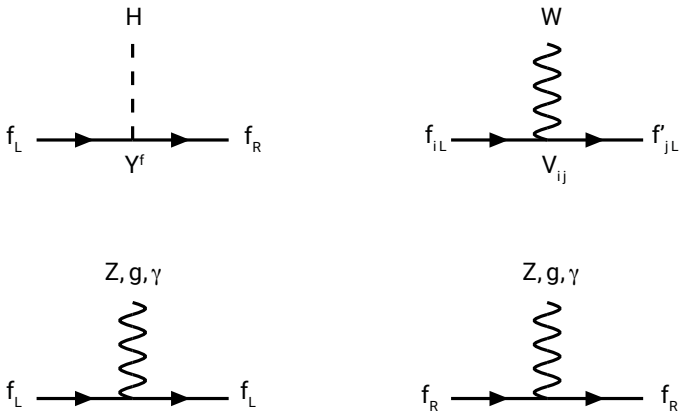
Les quarks et les leptons sont des fermions de *spin* 1/2. Cela permet de définir la notion d'**hélicité** pour ces particules, en regardant la projection du *spin* sur l'impulsion de la particule (tous deux pouvant être représentés par des vecteurs) : ils sont alignés (resp. anti-alignés) pour une particule d'hélicité droite (resp. gauche) (fig. 2). Cette notion d'hélicité, basée sur l'impulsion de la particule, dépend du référentiel choisi. Or, la physique des particules, combinant relativité restreinte et mécanique quantique, vise à analyser les propriétés des constituants élémentaires de la matière en s'appuyant sur des notions indépendantes du référentiel choisi. Il s'avère donc utile (mais plus compliqué mathématiquement) de définir une notion reliée, la **chiralité**, qui ne dépend pas du référentiel choisi et qui coïncide avec la notion d'hélicité pour des particules de masse (mc^2) négligeable par rapport à leur impulsion (pc) (c étant la vitesse de la lumière).

>>>

>>>

On peut passer d'une chiralité à l'autre par une opération *P* dite de parité, qui consiste à inverser les trois directions spatiales : x → -x, y → -y, z → -z. *P* transforme l'hélicité gauche en hélicité droite, et *vice versa*. Ce constat s'applique également à la chiralité. Jusqu'aux années 1950, on pensait que toutes les interactions traitaient de façon identique les deux chiralités gauche et droite, à l'image de ce qui avait déjà été observé pour l'interaction électromagnétique, et donc qu'elles conservaient la parité. Mais en 1957, Chien-Shiung Wu étudie la désintégration du cobalt 60 dans un champ magnétique qui oriente son *spin* : elle constate que les électrons produits par désintégration bêta (causée par l'interaction faible) sont émis préférentiellement en direction opposée à celle du *spin* du cobalt, ce qui indique que l'interaction faible viole la symétrie *P*. Une telle symétrie est dite discrète[b] : elle peut être appliquée seulement un nombre entier de fois, alors que d'autres symétries sont associées à des transformations continues, comme les invariances par rotation ou par translation qui dépendent de paramètres pouvant varier de façon continue (angle de la rotation, pas de la translation).

On peut illustrer par des diagrammes comment les différentes interactions se comportent vis-à-vis de cette symétrie (fig. 3). Les interactions forte et électromagnétique (*via* des gluons ou des photons) agissent de façon identique sur les deux chiralités. En revanche, l'interaction faible affecte seulement les particules de chiralité gauche. Enfin, l'interaction avec le champ de Higgs (dont l'excitation constitue le boson *H* ou boson de Higgs) fait intervenir simultanément un fermion de chaque chiralité. Dans le cadre du Modèle Standard, les fermions acquièrent une masse lorsque le champ de Higgs prend une valeur moyenne non nulle dans le vide, de sorte que dans les équations de ce modèle, cette masse (dite de Dirac) fait communiquer les deux chiralités d'une même particule.



3. Diagrammes de Feynman illustrant la diffusion de fermions *f* de chiralité donnée (f_L/f_R pour gauche/droite) par les particules $W^{\pm}$, Z^0, *g* et γ, véhiculant les différentes interactions fondamentales, ainsi que par le boson de Higgs *H*. *W* et *Z* sont les bosons lourds pour l'interaction faible, *g* les gluons pour l'interaction forte, γ le photon pour l'interaction électromagnétique. Dans le cas du boson de Higgs, l'intensité de l'interaction est proportionnelle à un couplage de Yukawa Y^f. Dans le cas des bosons $W^{\pm}$, les fermions initial et final ont des charges électriques différentes et ne sont pas forcément de la même famille (indices *i*, *j* allant de 1 à 3), avec une intensité proportionnelle à une matrice de mélange V_{ij} (appelée Cabibbo-Kobayashi-Maskawa ou CKM dans le secteur des quarks, et Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata ou PMNS dans le secteur des leptons).

Par la suite, on s'est aperçu que l'interaction faible ne conservait pas non plus une deuxième symétrie discrète, à savoir la conjugaison de charge *C* qui transforme une particule en son antiparticule. En 1957, Landau envisagea que le fait que ces deux symétries discrètes soient violées pouvait être les deux faces d'une même pièce, et que la « bonne » symétrie du Modèle Standard entre particule et antiparticule pouvait être en fait *CP*, la combinaison de *C* et de *P*, qui serait alors obéie par l'interaction faible tout comme elle l'est par les interactions forte et électromagnétique.

Mais en 1964, l'étude des désintégrations de kaons (particules composites contenant un quark *s* (étrange)) par Christenson, Cronin et Fitch montre que l'interaction faible ne satisfait même pas la combinaison *CP*, qui transforme par exemple un électron gauche en un anti-électron droit (fig. 4), bien que cette violation soit beaucoup plus petite que celles observées pour *P* et *C* séparément. Dès lors, la question de la chiralité en physique des particules se trouve profondément liée à celle des mécanismes capables de différencier particules et antiparticules, et potentiellement d'expliquer la prédominance de la matière sur l'antimatière observée dans notre Univers actuel par un mécanisme de baryogenèse (création de baryons — états liés de trois quarks comme les nucléons — en plus grande quantité que d'antibaryons).

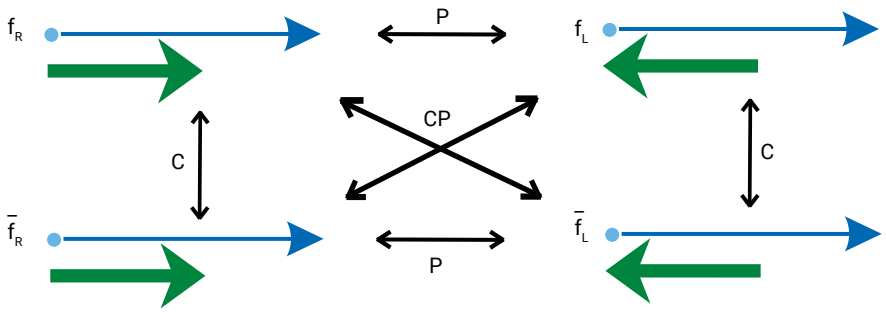
2. Définition des hélicités droite et gauche pour un fermion de *spin* 1/2, correspondant respectivement à des configurations alignées et anti-alignées pour le *spin* **S** et l'impulsion **p**. Cette définition dépend du référentiel choisi pour des particules massives, contrairement à la chiralité qui est indépendante du référentiel. Les deux notions coïncident pour des particules de masse nulle (ou négligeable devant les énergies de mouvement).

La chiralité pour les quarks

Dans le cadre du Modèle Standard, seule l'interaction faible viole la symétrie *CP* en traitant différemment les particules et antiparticules, et les particules de chiralités opposées. En revanche, si on suppose que le Modèle Standard n'est qu'une partie d'une théorie plus vaste et plus complète, valable à plus haute énergie (c'est-à-dire à des distances plus petites), d'autres sources de violation de *CP* pourraient intervenir du fait de processus ou d'interactions au-delà du Modèle Standard. Il est donc intéressant d'étudier en détail la violation de *CP*, d'une part pour déterminer les paramètres liés à cette violation de façon aussi précise que possible, d'autre part pour trouver d'autres sources de violation de *CP* au-delà du Modèle Standard.

Sous l'effet de l'interaction faible, la désintégration d'un quark lourd (de chiralité gauche) en un quark plus léger (toujours de chiralité gauche) est plus ou moins probable selon les familles des quarks initial et final : plus ces familles sont différentes, et moins la désintégration est probable. Cette variation est décrite par une matrice V_{ij} (où i, j correspondent aux trois familles de quarks), dite de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa ou CKM. Cette matrice peut être paramétrée par quatre quantités, appelées conventionnellement A, λ, $\bar{\rho}$, $\bar{\eta}$. Dans cette paramétrisation, la violation de *CP* correspond à une valeur du paramètre $\bar{\eta}$ différente de zéro, qu'il est donc important de déterminer expérimentalement, en comparant par exemple la désintégration d'un quark lourd b (beau) de chiralité gauche en un quark plus léger c (charme) de chiralité gauche, et la désintégration de l'antiquark lourd $\bar{b}$ de chiralité droite en l'antiquark léger $\bar{c}$ de chiralité droite.

L'étude de la chiralité et de la violation de *CP* dans le secteur des quarks est compliquée, car ils sont sensibles à l'interaction forte. Cette dernière lie de façon très puissante les quarks au sein d'objets composites (états liés), les hadrons (par exemple, le proton et le neutron). Il est donc beaucoup plus compliqué d'obtenir des informations sur la chiralité des quarks à partir des observations expérimentales faites sur les hadrons. Plus généralement, il est très difficile sur le plan théorique de relier la dynamique des hadrons effectivement observés dans les accélérateurs de particules aux équations décrivant des quarks liés par l'interaction forte. Ces équations sont déduites de la théorie quantique des champs décrivant l'interaction forte par l'échange de gluons (c'est la chromodynamique quantique, appelée aussi *QCD* pour *Quantum ChromoDynamics*), mais leur résolution reste un défi théorique. Seules certaines désintégrations sont effectivement utilisées pour tester la violation de *CP* dans le secteur des quarks, pour lesquelles des mesures précises sont disponibles et une bonne compréhension théorique de l'interaction forte a été atteinte. Cela passe par différents outils analytiques (théories effectives des champs, relations de dispersion) et numériques (simulations de *QCD* sur réseau).



4. Illustration de l'action des symétries discrètes de parité *P* et de conjugaison de charge *C*, reliant respectivement une particule de chiralité gauche à celle de chiralité droite, et une particule à son antiparticule. La combinaison de ces deux transformations est la symétrie *CP*.

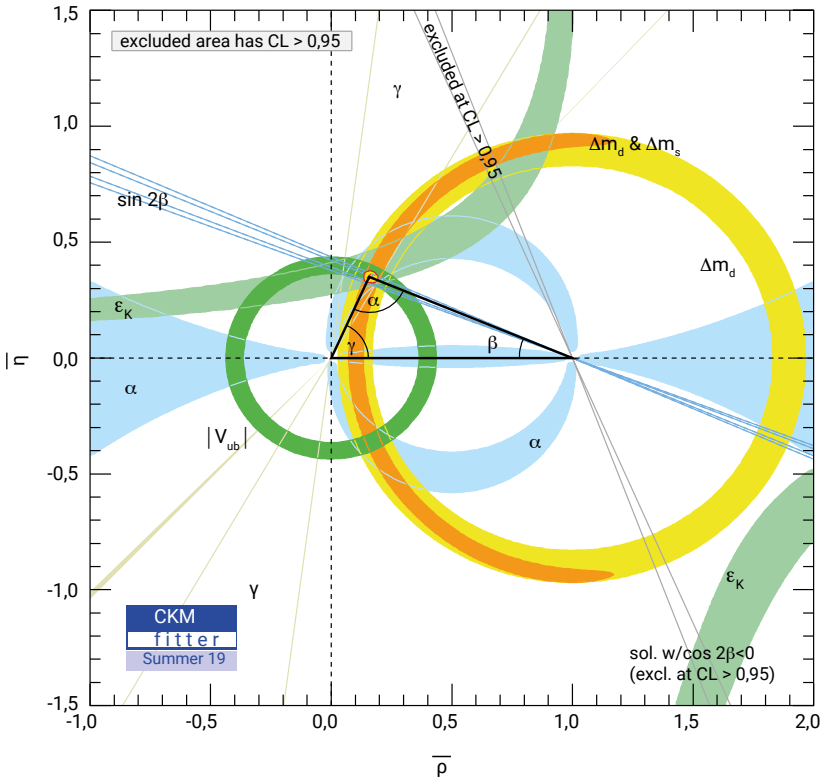
En dépit des difficultés expérimentales et théoriques pour analyser la violation de *CP* dans le secteur des quarks, des progrès majeurs ont été effectués. Sur le plan expérimental, une quantité impressionnante de données a été accumulée en trente ans par les accélérateurs de particules depuis le LEP jusqu'au LHC (expériences LHCb, CMS, ATLAS) au CERN, en passant par les « usines à B » BaBar (Stanford) et Belle (Tsukuba) et les expériences du Tevatron (au Fermilab). Sur le plan théorique, une connaissance fine de la dynamique de l'interaction forte pour les différents types de quarks (s (étrange), c (charme), b (beau)) a été obtenue analytiquement et numériquement.

Cela a permis d'accumuler de nombreuses contraintes précises sur la violation de *CP* : l'ensemble des contraintes étudiées montre une cohérence globale remarquable et en parfait accord avec le Modèle Standard. La violation de *CP* dans le secteur des quarks est décrite par le seul paramètre $\bar{\eta}$, aboutissant à une très petite asymétrie *CP* dans ce secteur (fig. 5). De fait, il n'est pas possible d'expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière en utilisant seulement la violation de *CP* observée à l'heure actuelle dans le domaine des quarks. Ces contraintes sont sans cesse affinées grâce à l'amélioration des mesures expérimentales, et du fait des progrès théoriques dans l'évaluation des effets de l'interaction forte.

La chiralité des neutrinos

La chiralité des neutrinos est une porte vers une physique au-delà du Modèle Standard des particules. Depuis l'expérience de Mme Wu, on sait que les neutrinos produits lors de désintégrations faibles sont de chiralité gauche. Si on sait aujourd'hui, grâce aux expériences dites d'oscillations des neutrinos, que ces derniers sont massifs, les bornes supérieures sur la masse des neutrinos données par les mesures directes (désintégration bêta du tritium), ~ 0,8 eV/c^2 (qui est la limite supérieure déterminée en mai 2021 par l'expérience KATRIN à Karlsruhe), sont très petites devant la masse de l'électron (511 keV/c^2). De ce fait, la chiralité des neutrinos — qui n'interagissent que par interaction faible — est gauche. Cependant, si le mécanisme de génération de la masse du neutrino

>>>

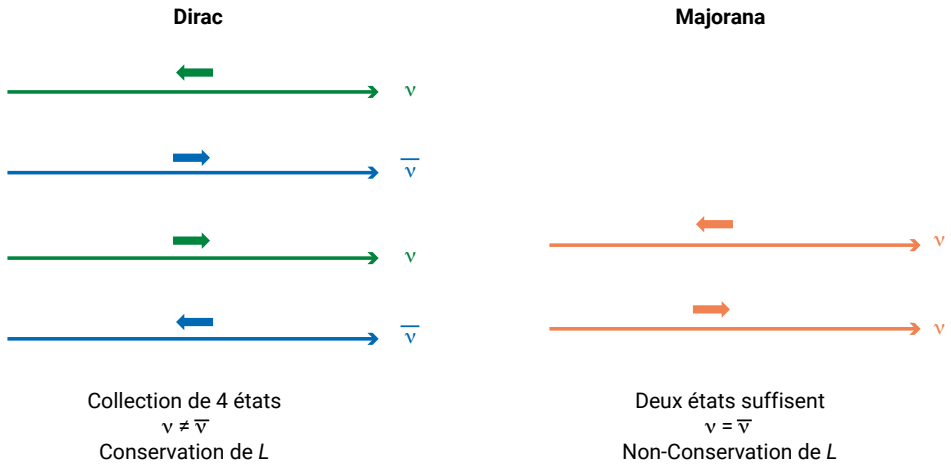


5. Représentation des contraintes actuelles sur la violation de *CP* dans le secteur des quarks. L'ensemble des transitions entre quarks est décrit par les quatre paramètres de la matrice CKM (voir ci-dessus, p. 13), dont les paramètres $\bar{\rho}$ et $\bar{\eta}$ sont représentés sur ce graphique. Le paramètre $\bar{\eta}$ (en ordonnée) est différent de zéro quand la symétrie CP est violée. Chaque bande colorée provient des mesures expérimentales qui sont effectuées sur un type de désintégration donné et qui permettent de contraindre ces paramètres du Modèle Standard. On constate un excellent accord entre les différentes contraintes. La petite ellipse jaune entourée de rouge (au sommet α du triangle noir) indique les valeurs favorisées pour $\bar{\eta}$ et $\bar{\rho}$. La valeur non nulle de $\bar{\eta}$ (0,350 ± 0,006) confirme que l'interaction faible ne satisfait pas la symétrie *CP* [2, 3].

>>>
est le même que celui des autres fermions élémentaires (quarks, leptons chargés) *via* le mécanisme de Higgs, il devrait exister un neutrino de chiralité droite. Ce dernier n'est pas prévu dans la construction du Modèle Standard, dont le contenu est conforme à l'observation : l'interaction faible ne « voit » que les fermions de chiralité gauche et, comme le neutrino est électriquement neutre, la chiralité droite ne peut jamais être détectée directement. De ce fait, on dit que le neutrino de chiralité droite est « stérile ».

Il faut donc concevoir un cadre théorique dans lequel les neutrinos sont massifs et se mélangent entre les différentes saveurs (familles). Le neutrino ne portant ni charge électrique ni charge baryonique (nombre quantique qui distingue les quarks entre eux), comment alors le différencier de son antiparticule ? Pour ce faire, on introduit le nombre quantique *L* appelé nombre leptonique, qui vaut 1 pour les leptons et -1 pour les antileptons. De plus, on définit un nouveau nombre quantique, le nombre leptonique de saveur, qui permet de distinguer les familles les unes des autres. On parle ainsi des nombres leptoniques, électronique pour le doublet (e, ν_e), muonique pour (μ, ν_m) et tauonique pour (τ, ν_t). Par une transformation *CP*, on observe que les antineutrinos ont l'hélicité droite. Signalons que le neutrino est la seule particule élémentaire pouvant être décrite soit comme une particule dite de Majorana (il est alors sa propre antiparticule sous une transformation *CP* et, dans ce cas, le nombre leptonique n'est plus conservé), soit comme une particule de Dirac comme le sont les quarks et les leptons chargés (fig. 6). On serait certain que le neutrino est de type Majorana si on observait la double désintégration bêta sans émission de neutrinos. Si au contraire le neutrino était de type Dirac, une masse non nulle impliquerait l'existence d'un neutrino additionnel de chiralité droite comme discuté plus haut, insensible à l'interaction faible dans le Modèle Standard.

Il est à noter cependant que la conservation du nombre leptonique n'est pas fondamentale dans le sens où, dans la construction du Modèle Standard, le contenu en particules de



6. Les deux descriptions possibles du (champ de) neutrino : fermion de Dirac et fermion de Majorana. *L* est le nombre leptonique, les flèches courtes représentent le *spin* du neutrino et les flèches longues son impulsion.

matière et la cohérence mathématique de la théorie (renormalisabilité) font que le nombre leptonique est conservé. Il s'agit donc d'une symétrie accidentelle et, de ce fait, la nature Majorana des neutrinos est possible.

Si la nature Majorana des neutrinos était prouvée, un mécanisme très simple permettrait d'expliquer la faible valeur de leur masse : le neutrino de chiralité gauche acquiert une petite masse au prix d'une très grande masse pour le neutrino doté d'une hélicité droite (fig. 7). Le neutrino de chiralité droite étant stérile du point de vue des interactions du Modèle Standard, cette masse est liée à l'échelle d'une nouvelle physique, pouvant aller des énergies accessibles aujourd'hui au LHC (TeV) jusqu'à l'échelle de la grande unification (10^{16} GeV).

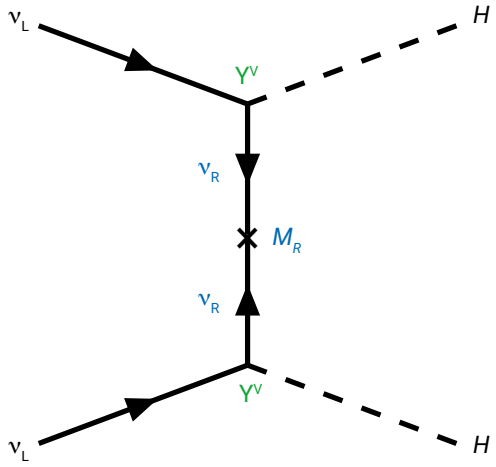
Outre le fait qu'ils apportent une explication à l'origine de la masse des neutrinos et de leurs mélanges, les neutrinos de chiralité droite (en abrégé « neutrinos droits ») constituent des candidats viables pour la matière noire. D'un point de vue théorique, ils ont tout à fait leur place dans de nombreuses constructions telles que les théories de grande unification.

L'existence nécessaire du neutrino droit pour expliquer que les neutrinos sont massifs, et la possible violation du nombre leptonique (le neutrino est sa propre antiparticule), ouvrent aussi la voie à une explication de la baryogenèse. Le scénario actuellement envisagé est celui de la leptogenèse à basse énergie (GeV-TeV), afin de pouvoir indirectement la « tester ». Des neutrinos droits produits par le bain thermique dans l'Univers primordial se sont désintégrés hors équilibre en violant le nombre leptonique (nature Majorana), les symétries *C* et *CP*, engendrant ainsi une asymétrie leptonique, laquelle est convertie en asymétrie baryonique par les processus non perturbatifs.

Perspectives

L'étude de la chiralité en physique des particules a abouti à la conclusion remarquable que le Modèle Standard ne traite pas de façon équivalente les chiralités gauche et droite, et que cette différence a des conséquences, d'une part sur les mécanismes générant une asymétrie entre particules et antiparticules et, d'autre part, sur la nature et les propriétés des neutrinos.

Ceci définit naturellement les recherches en cours pour les prochaines générations d'expériences. Du côté des quarks, il est prévu d'augmenter les performances du LHC par une amélioration (*upgrade*) des détecteurs LHCb, ATLAS et CMS, et par une augmentation de la luminosité et donc de la quantité de données enregistrées. D'autres expériences dans les secteurs du quark *b* (Belle II au Japon), du quark *c* (BES en Chine) et du quark *s* (NA62 au CERN et KOTO au Japon) doivent également donner des contraintes supplémentaires sur la violation de *CP* pour les quarks. Cela passera aussi par un progrès dans les calculs théoriques (simulations numériques de *QCD* sur réseau, corrections liées à l'interaction électromagnétique). Du côté des neutrinos, de nombreuses expériences dédiées à la mesure des éléments de la matrice de mélange des leptons sont en cours : nous sommes aujourd'hui dans une phase de précision concernant les angles de mélange des leptons. La phase de violation de *CP* et la hiérarchie de masse des neutrinos (gauches) sont les paramètres qui restent à déterminer. Concernant les neutrinos droits, de nombreux projets expérimentaux en cours (ou en développement) sont actuellement dédiés à leur traque. Ces questions font partie des thèmes actuellement abordés pour élaborer une stratégie commune européenne de la physique des particules pour les prochaines décennies.



7. Mécanisme de la « bascule » *(seesaw)*. Lorsque le boson de Higgs *H*, qui relie les deux chiralités gauche et droite par un couplage (Yukawa) Y^ν, prend sa valeur moyenne dans le vide, $\langle H \rangle = v$, le neutrino de chiralité gauche ν_L acquiert une masse inversement proportionnelle à la masse M_R du neutrino de chiralité droite ν_R : $m = - v^2 Y^{\nu T} Y^n / M_R$.

Ces progrès devraient permettre de contraindre plus précisément notre compréhension de la violation de *CP* dans les secteurs des quarks et des leptons, avec l'espoir non seulement de mieux mesurer les paramètres du Modèle Standard, mais aussi de découvrir des incohérences qui seraient la marque d'une physique au-delà de ce modèle.

(a) En physique subatomique, un fermion est une particule de *spin* demi-entier (1/2, 3/2...) et un boson une particule de *spin* entier (0, 1, 2...). Selon le théorème *spin*-statistique, la fonction d'onde d'un système de bosons identiques a la même valeur lorsque les positions de deux particules quelconques sont échangées, alors que la fonction d'onde d'un système de fermions identiques change de signe lorsque deux particules sont échangées. Cela aboutit au principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux fermions identiques ne peuvent se trouver au même endroit dans le même état quantique.

(b) Les symétries discrètes sont importantes en théorie quantique des champs : il s'agit des symétries de conjugaison de charge *C*, de parité *P* et d'inversion du temps *T* ; toute théorie des champs locale unitaire respectant l'invariance de Lorentz doit être invariante sous le produit *CPT* de ces trois symétries.

1• R. K. Ellis *et al.*, "Physics Briefing Book: Input for the European Strategy for Particle Physics Update 2020", Rapport CERN-ESU-004 (2020), arXiv:1910.11775 [hep-ex].

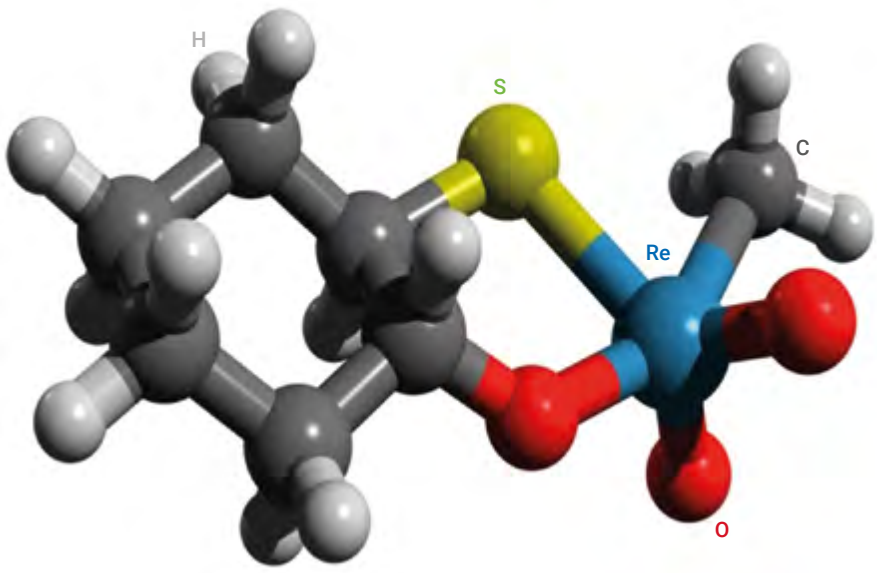
2• S. Descotes-Genon et P. Koppenburg, "The CKM Parameters", *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67** (2017) 97-127. doi:10.1146/annurev-nucl-101916-123109 [arXiv:1702.08834 [hep-ex]].

3• J. Charles *et al.* [CKMfitter Group], "*CP* violation and the CKM matrix: assessing the impact of the asymmetric *B* factories", *Eur. Phys. J. C* **41** (2005) 1-131. doi:10.1140/epjc/s2005-02169-1 [hep-ph/0406184] et mises à jour sur www.ckmfitter.in2p3.fr

Vers une mesure de la brisure de la parité dans les molécules

Benoît Darquié (benoit.darquie@univ-paris13.fr)
Laboratoire de physique des lasers (Université Sorbonne Paris Nord/Institut Galilée et CNRS)
99 avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse

Le vivant n'a sélectionné qu'une seule des deux formes, droite ou gauche, de molécules chirales aussi essentielles que les acides aminés ou les sucres. Les causes de cette asymétrie restent un mystère mais, d'après les prédictions théoriques, l'interaction nucléaire faible serait à l'origine d'une infime différence d'énergie entre les deux formes. Les enjeux relatifs à une première mesure de cette différence d'énergie sont présentés ici. Cette mesure apporterait une lumière précieuse sur un sujet qui touche à la fois à l'origine de la vie et à la physique fondamentale.



Représentation tridimensionnelle, calculée par simulation numérique, d'un complexe de rhénium chiral (molécule **2** de la figure 1).
Courtoisie : Radovan Bast (UiT The Arctic University of Norway).

Alors que de nombreuses molécules sont chirales et existent sous deux formes énantiomères (images miroir), dites gauche et droite [1], on observe un très fort déséquilibre entre ces deux populations dans les molécules du vivant : les acides aminés, qui composent les protéines de tous les êtres vivants, ainsi que toutes les molécules biologiques essentielles, n'y existent que sous l'une des deux formes. On parle d'homochiralité de la vie [2]. Il s'agit d'une condition nécessaire aux processus biomoléculaires tels que l'autoréplication et la reconnaissance moléculaire, et il est donc généralement admis que l'homochiralité sur Terre a précédé la vie. Presque tous les scénarios sur l'origine de l'homochiralité commencent par l'établissement d'un très faible excès énantiomérique dans une soupe prébiotique initialement racémique — c'est-à-dire contenant à part égale les deux formes énantiomériques — qui aurait ensuite été amplifié jusqu'à un état final de pureté chirale.

Il existe de nombreux mécanismes d'amplification plausibles, mais la question de savoir ce qui a causé l'excès initial reste très spéculative et très débattue. Puisque la chimie est essentiellement régie par des interactions électromagnétiques qui agissent de façon identique sur les deux énantiomères, n'induisant pas d'asymétrie entre gauche et droite, comment se peut-il qu'il y ait une préférence pour un énantiomère plutôt que pour l'autre ? Or, il se trouve que l'une des quatre interactions fondamentales, l'interaction nucléaire faible (que nous dénommerons plus simplement « interaction faible » dans la suite de l'article), ne respecte pas la symétrie par réflexion dans un miroir — on dit qu'elle brise la parité (voir l'article p. 10). Cette interaction est ainsi à l'origine d'une infime différence d'énergie entre les molécules gauche et droite [3], de l'ordre de la centaine d'atto-électron-volts ($\sim 10^{-16}$ eV, soit $\sim 10^{-11}$ J mol^{-1}) pour la plupart des molécules ordinaires. Certains scientifiques ont émis l'hypothèse que ces différences d'énergie, et les variations qui en résultent entre les barrières énergétiques et les taux de réaction, pourraient avoir créé le biais nécessaire pour induire l'homochiralité de la vie, alors qu'en revanche d'autres affirment que cet effet serait bien trop faible [4].

Notre objectif est de réaliser la toute première mesure de cette différence d'énergie. Cette mesure permettra d'alimenter le débat sur l'origine de l'asymétrie du vivant, mais constituera aussi un test très sensible des lois fondamentales de la physique. Cet article présente les enjeux expérimentaux liés à la mesure d'une grandeur aussi faible. Ils concernent aussi bien la synthèse des molécules susceptibles d'avoir l'effet le plus important et leur refroidissement jusqu'à des températures d'environ 1 K, que des développements de métrologie laser et l'amélioration de la sensibilité de la détection du signal.

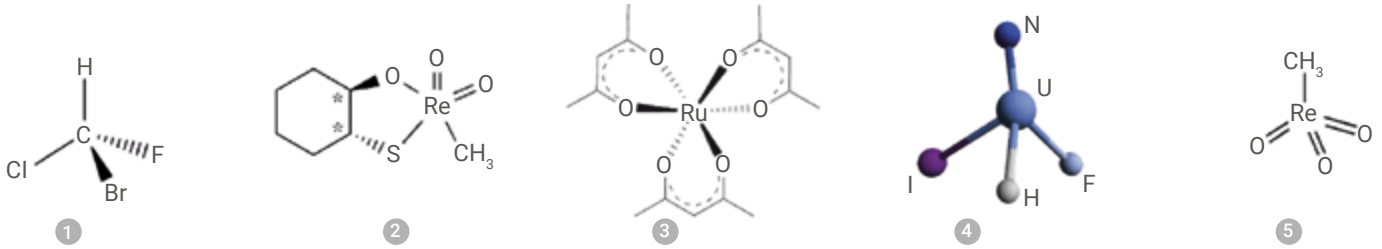
Interaction faible et physique moléculaire

La chiralité moléculaire peut avoir diverses origines [1], et le centre asymétrique en est sans doute l'exemple le plus familier. Il s'agit d'un atome qui est substitué à quatre atomes ou groupements d'atomes différents, et qui par conséquent ne peut pas être superposé à son image dans un miroir (voir encadré de l'introduction, p. 8). Par exemple, les molécules 1 et 4 de la figure 1 sont de géométrie tétraédrique, celle d'une pyramide composée de quatre faces triangulaires, et ont toutes deux un centre asymétrique, respectivement l'atome de carbone et l'atome d'uranium qui occupe le centre de la pyramide. La molécule 2 possède quant à elle deux centres asymétriques, les deux atomes de carbone marqués d'un astérisque. Mais il existe également d'autres configurations chirales, comme celle de la molécule 3 dont la structure est celle d'une hélice de bateau.

Comme prédit il y a près de cinquante ans, l'interaction faible serait à l'origine de différences infimes entre les niveaux d'énergie des deux énantiomères d'une molécule chirale [3]. En effet, malgré la répulsion coulombienne, certains électrons de la molécule ont une très légère probabilité de « se trouver dans le noyau » (leur fonction d'onde quantique, bien que s'étendant essentiellement à l'extérieur du noyau, a avec lui un recouvrement non nul). Or, ces électrons interagissent avec les protons et les neutrons du noyau *via* l'interaction faible. Ceci a pour effet de perturber les niveaux d'énergie de la molécule, par ailleurs presque exclusivement déterminés par les forces électromagnétiques ; l'énantiomère droit voit donc ses niveaux d'énergie déplacés dans un sens, alors que les niveaux de l'énantiomère gauche sont décalés d'une même quantité, mais en sens opposé.

De nombreuses idées d'expériences ont été proposées pour mesurer la différence d'énergie attendue entre les énantiomères d'une molécule chirale, mais aucune n'a encore atteint la sensibilité requise. La mesure la plus précise à ce jour a été réalisée il y a vingt ans dans notre laboratoire. Il s'agissait de mesurer la fréquence de vibration de la liaison C-F des deux énantiomères de la molécule chirale CHFClBr (fig. 1, molécule **1**) par spectroscopie d'absorption de très haute précision d'une vapeur confinée dans une cellule à température ambiante. Cette fréquence est proportionnelle à

>>>



1. Classes de complexes organo-métalliques chiraux (molécules 1 à 4) et non chiraux (molécule 5) d'intérêt pour l'expérience.
Molécule **1** : le bromochlorofluorométhane CHFClBr possède un carbone asymétrique ; molécule **2** (voir la modélisation 3D page 16) : ce complexe dioxorhénium à ligand cyclohexane-1-olato-2-thiolato est un dérivé chiral de la molécule non chirale **5** et possède deux carbones asymétriques marqués d'une étoile (*) ; molécule **3** : le tris-acétylacétonate de ruthénium(III) possède une structure chirale en hélice de bateau ; molécule **4** : ce composé chiral d'uranium de géométrie tétraédrique possède un centre asymétrique au niveau de l'atome d'uranium ; molécule **5** : le méthyltrioxorhénium (MTO) est le précurseur non chiral de la molécule chirale **2**. Les vibrations considérées pour la mesure de la différence de fréquence due à l'interaction faible sont les modes d'élongation C-F, Re=O, C-O et N≡U pour les molécules **1** à **4** respectivement.

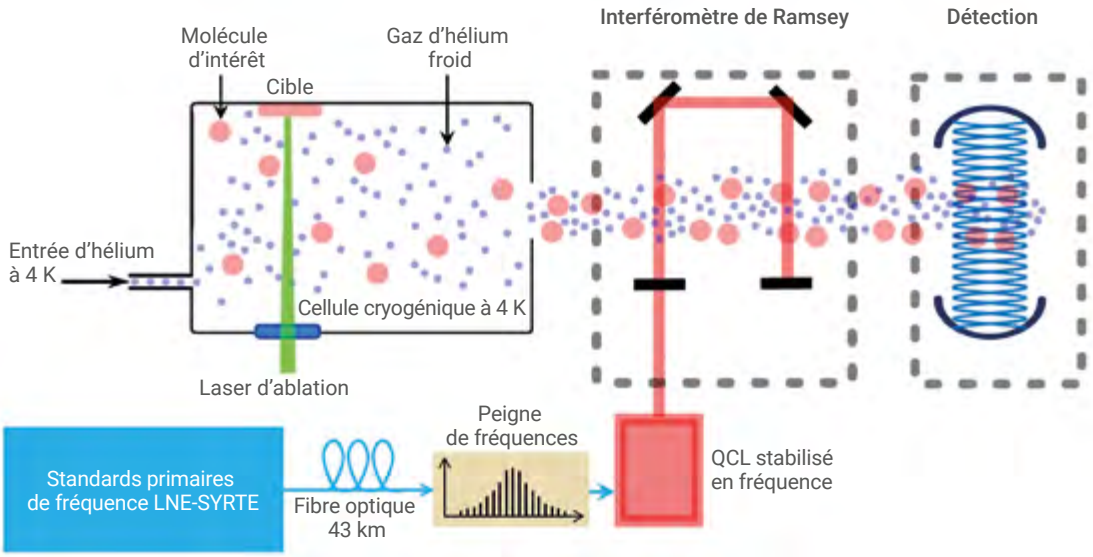
>>>

la différence d'énergie des niveaux de vibration moléculaire entre lesquels a lieu l'absorption du photon et est égale à environ 30 THz (infrarouge moyen, $\lambda \approx 10$ µm). Chaque niveau étant affecté de façon distincte par l'interaction faible, on s'attend à une différence de fréquence entre énantiomères, de l'ordre de 2,5 mHz. La mesure de fréquence a été réalisée avec une précision de 8 Hz, soit ~ 3×10^{-13} en valeur relative, ce qui est un record, mais qui reste 3000 fois plus grand que la différence de fréquence prévue.

Les molécules considérées

La différence d'énergie entre énantiomères croît fortement avec la charge nucléaire et nous nous intéressons donc à des molécules possédant des atomes lourds. Pour la recherche de molécules candidates, nous avons établi des collaborations étroites avec des chimistes théoriciens, experts en calculs de chimie quantique relativistes incluant l'interaction faible, et avec des expérimentateurs, spécialistes de la synthèse de complexes chiraux contenant des atomes lourds, notamment métalliques. La molécule candidate idéale doit en effet satisfaire plusieurs critères qui sont autant d'enjeux, tant au niveau théorique qu'au niveau de la synthèse : elle doit (i) présenter une différence de fréquence importante induite par l'interaction faible, pour une transition vibrationnelle intense dans une gamme accessible aux technologies laser actuelles ; (ii) être disponible en quantité suffisante, à l'échelle de plusieurs grammes, et pouvoir être dédoublée (la séparation des deux énantiomères s'appelle le dédoublement) ; (iii) avoir une volatilité suffisante ou pouvoir être sublimée pour permettre des études en phase gazeuse. Cette quête a notamment débouché sur la synthèse de composés organo-métalliques solides de rhénium ou de ruthénium, tels que les espèces **2** et **3** de la figure 1, possédant des transitions vibrationnelles autour de 30 THz et des décalages de fréquence entre énantiomères atteignant ~ 1 Hz, soit 100 à 1000 fois plus importants que pour CHFClBr. Plusieurs autres pistes sont actuellement explorées et d'autres molécules sont en préparation. Nos collaborateurs théoriciens ont en particulier identifié un composé chiral d'uranium (N≡UHFI, fig. 1, molécule **4**), avec un décalage de fréquence estimé à un niveau record d'environ 20 Hz. La synthèse et la séparation de ces énantiomères ne sont pas encore démontrées, mais pourraient l'être dans le futur avec le développement du domaine encore peu exploré de la chimie de l'uranium.

Afin de mieux appréhender l'instrumentation et le savoir-faire requis pour effectuer des mesures spectroscopiques précises sur des espèces aussi complexes, nous avons mené, en collaboration avec des collègues spécialistes de spectroscopie micro-onde, millimétrique ou infrarouge, des études préliminaires sur certaines espèces candidates et sur certains de leurs précurseurs non chiraux comme le MTO (méthyltrioxorhénium, CH_3ReO_3, fig. 1, molécule **5**). Sur la base de ces premiers résultats, nous avons démarré la construction d'un dispositif de nouvelle génération dédié à la spectroscopie vibrationnelle de précision de molécules chirales.



2. Principe de l'expérience proposée pour mesurer la différence de fréquence vibrationnelle entre les énantiomères d'une molécule chirale. Le dispositif combine (i) une source intense de molécules froides et lentes issues d'une cellule cryogénique, (ii) un interféromètre de Ramsey utilisant des lasers à cascade quantique (QCL) calibrés sur des étalons de fréquence primaires pour sonder avec une grande précision la transition de rotation-vibration d'intérêt, et (iii) un détecteur de haute sensibilité du signal interférométrique qui mesure le rayonnement micro-onde émis par les molécules en rotation.
Le LNE-SYRTE (Laboratoire national de métrologie et d'essais - Systèmes de référence temps-espace) est le laboratoire chargé de la réalisation des références dans le domaine du temps et des fréquences.

Présentation du dispositif

La figure 2 illustre le principe de cette nouvelle expérience. Un jet lent (de quelques dizaines de mètres par seconde) et froid (quelques kelvins) d'une espèce chirale organo-métallique est obtenu en introduisant les molécules dans une cellule contenant un gaz d'hélium refroidi (voir encadré ci-contre), puis en extrayant les molécules refroidies par collisions avec les atomes d'hélium. Ce type de source est l'une des technologies de jet moléculaire les plus récentes, avec à la fois une vitesse environ dix fois plus faible et des flux dix à cent fois plus élevés qu'un jet traditionnel.

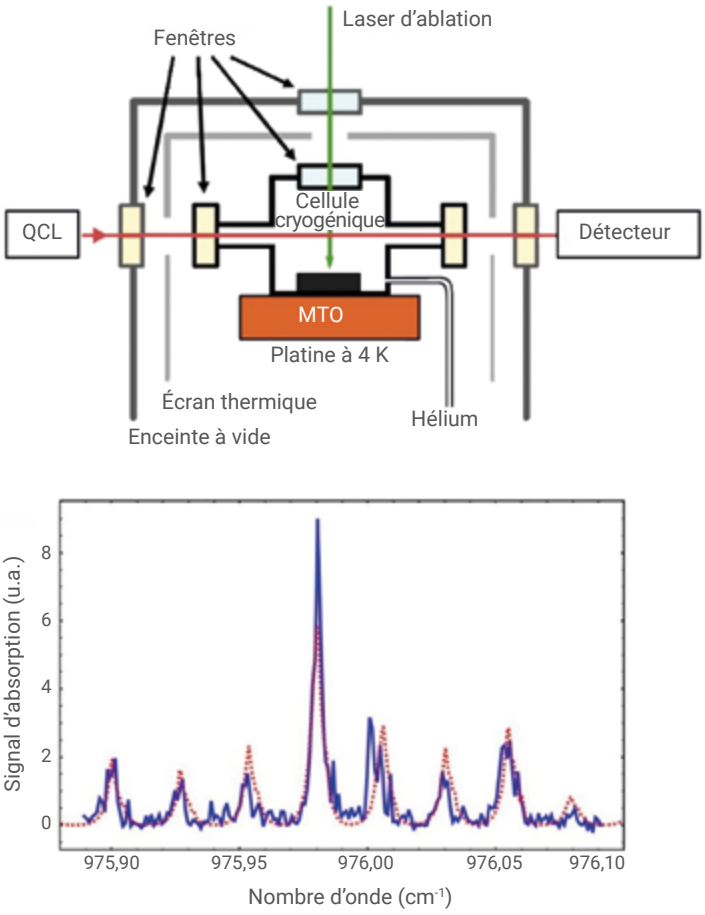
Les molécules traversent ensuite un interféromètre suffisamment sensible pour mesurer des décalages de fréquence vibrationnelle aussi petits que 100 mHz. L'interféromètre est basé sur une méthode utilisée en métrologie des fréquences, la méthode des champs séparés, introduite par N. F. Ramsey. Dans cet interféromètre, nous préparons ainsi chaque molécule dans une superposition quantique cohérente de deux états afin qu'elle oscille à une fréquence vibrationnelle naturelle et, pour mesurer les décalages de fréquence, nous comparons cette oscillation et celle d'un laser très stable, d'abord pour un énantiomère puis pour l'autre. Chaque niveau vibrationnel est constitué de plusieurs sous-niveaux correspondant aux énergies de rotation de la molécule. La transition qui nous intéresse couple donc deux états de rotation bien définis, l'un dans l'état vibrationnel fondamental, l'autre dans un état vibrationnel excité. Notre équipe a été pionnière dans l'exploitation de cette méthode pour la mesure de fréquences vibrationnelles, avec un niveau de précision record de quatorze chiffres significatifs [5].

La fréquence requise se situe dans la région de l'infrarouge moyen du spectre électromagnétique, entre 10 et 100 THz (soit une longueur d'onde entre 3 et 25 µm). Les lasers, et en particulier les lasers stables, ont longtemps fait défaut dans cette fenêtre spectrale, mais la technologie des lasers à cascade quantique (QCL, de l'anglais *quantum cascade laser*), qui a émergé il y a vingt-cinq ans, est aujourd'hui suffisamment robuste pour pallier ce manque [6]. En collaboration avec le LNE-SYRTE

>>>

➲ REFROIDISSEMENT CRYOGÉNIQUE PAR UN GAZ TAMPON

Nos travaux sur le refroidissement des composés organo-métalliques sont le fruit d'une collaboration avec M. R. Tarbutt et ses collègues du *Centre for Cold Matter* à l'Imperial College London, l'un des quelques groupes à travers le monde à avoir développé la technologie du refroidissement cryogénique par gaz tampon, jusque-là essentiellement limitée aux espèces diatomiques et aux radicaux légers. De nombreuses molécules polyatomiques sont peu volatiles aux températures facilement accessibles, ce qui rend difficile le refroidissement par des collisions en phase gazeuse avec une espèce plus froide. Grâce à l'ablation laser d'une cible solide contenant du MTO (fig. 1, molécule **5**) et placée à l'intérieur d'une cellule cryogénique, nous avons pour la première fois refroidi à quelques kelvins une espèce organo-métallique par collisions avec un gaz tampon d'hélium à 4 K (fig. E1). La température du gaz de MTO évaluée par la population des niveaux rotationnels est d'environ 6 K. Ces résultats montrent que les complexes de rhénium, d'intérêt pour mesurer la brisure de la symétrie droite-gauche dans les molécules chirales, survivent au processus d'ablation et sont efficacement refroidis par collisions avec l'hélium, ce qui est très prometteur pour la production de jets moléculaires froids, lents et intenses.



E1. Refroidissement de molécules de MTO (CH_3ReO_3, fig. 1, molécule 5) par collisions avec un gaz tampon cryogénique.
En haut : le dispositif expérimental. Une cible contenant du MTO, placée dans une cellule de cuivre remplie de ~ 10^{-2} mbar d'hélium, est refroidie à 6 K à l'aide d'un cryoréfrigérateur. La cellule est entourée d'écrans thermiques en aluminium à une température d'environ 40 K et placée dans une enceinte à vide. L'ablation de la cible est réalisée avec un laser Nd:YAG à 1064 nm. La lumière d'un laser à cascade quantique (QCL) émettant à ~ 976 cm^{-1} (~ 29,3 THz) traverse la cellule pour enregistrer le spectre d'absorption.
En bas : spectre du mode vibrationnel d'élongation antisymétrique Re=O obtenu. La structure observée résulte des différentes transitions entre niveaux de rotation pour la vibration étudiée. Chacun des pics est composé de plusieurs transitions que l'on ne résout pas. Le pic central correspond au signal produit par les molécules qui tournent initialement autour de leur propre axe de symétrie. La courbe en pointillés (rouge) est un ajustement des données permettant d'évaluer la température rotationnelle à 6 K ± 3 K.

>>>
(le laboratoire national de métrologie chargé de la réalisation des références dans le domaine du temps et des fréquences), nous avons récemment développé des QCL de très haute pureté spectrale et de très haute précision [7]. Comme illustré sur la figure 2, nous stabilisons le laser sur un peigne de fréquences optiques [8], lui-même verrouillé sur une référence de fréquence dans le proche infrarouge située au LNE-SYRTE. Cette référence est un signal laser ultrastable à 1,5 µm qui est transféré dans notre laboratoire par une fibre optique de 43 km de long, avec la correction du bruit de phase induit par la propagation [9]. Au LNE-SYRTE, ce signal est calibré sur des étalons de fréquence primaires qui sont les références ultimes en métrologie des fréquences, à savoir des horloges à fontaine de césium qui réalisent l'étalon de fréquence du système international d'unités. L'excellente pureté spectrale de la référence de fréquence est alors transférée au QCL, dont la largeur d'émission passe de 1 MHz à 0,1 Hz, soit une amélioration de sept ordres de grandeur. De plus, le lien aux étalons primaires du LNE-SYRTE permet de contrôler sa fréquence absolue avec une incertitude inférieure à 1 Hz. À notre connaissance, il s'agit du QCL le plus étroit et le plus précis existant.

Pour accéder au décalage de fréquence entre énantiomères gauche et droit, les molécules doivent être détectées avec une grande sensibilité. Les techniques de détection sensibles pour les molécules simples, comme l'absorption dans le moyen infrarouge, la fluorescence, la photodissociation ou la photoionisation sont inadaptées aux molécules complexes. Nous construisons donc actuellement un nouveau détecteur, basé sur l'enregistrement du champ micro-onde émis par les molécules lorsqu'elles tournent. Dans l'interféromètre de Ramsey, un faisceau moyen-infrarouge transfère d'abord la population d'un état rotationnel bien défini de l'état vibrationnel fondamental (l'état 1) vers un état vibrationnel excité inoccupé (il s'agit de la transition d'intérêt pour notre mesure). Puis, en sortie de l'interféromètre, une impulsion micro-onde couple l'état 1 à un autre état rotationnel de l'état vibrationnel fondamental, et c'est le rayonnement induit par cette mise en rotation des molécules qui est détecté. L'amplitude de ce signal micro-onde dépend de la déplétion de l'état 1 par le laser moyen-infrarouge dans l'interféromètre de Ramsey. Nous obtenons ainsi le spectre vibrationnel avec un rapport signal-à-bruit satisfaisant. La fréquence vibrationnelle de chaque énantiomère doit être mesurée avec ce nouveau dispositif. Comme il s'agit d'une mesure différentielle entre les deux énantiomères, de nombreux effets systématiques à l'origine de décalages en fréquence seront réduits, sans être forcément éliminés totalement, notamment ceux découlant de la vitesse et de la température finie des molécules. Nous prévoyons une précision de mesure inférieure à 0,1 Hz, soit une amélioration d'au moins deux ordres de grandeur par rapport à l'expérience sur CHFClBr.

Conclusion

Inspirée des toutes dernières avancées sur les molécules froides et en métrologie des fréquences, l'exploitation combinée dans une expérience d'interférométrie de Ramsey d'échantillons moléculaires refroidis à 1 K et de lasers référencés aux meilleurs étalons de fréquence au monde devrait permettre de mesurer des décalages de fréquences vibrationnelles aussi petits que 100 mHz. La mesure de la différence de fréquence entre énantiomères induite par l'interaction faible, attendue à ~ 1 Hz pour certaines des molécules envisagées, parait donc à notre portée. Au stade actuel, la capacité à produire des jets de molécules froides suffisamment intenses pour obtenir un rapport signal-à-bruit satisfaisant est le défi principal, et le développement d'un détecteur de haute sensibilité est primordial. Une mesure — même grossière, comme un ordre de grandeur ou simplement le signe du décalage en fréquence — sera déterminante pour éclairer le débat sur l'homochiralité de la vie. Si la précision attendue est au rendez-vous, ces mesures constitueront aussi une source d'informations inédite sur l'interaction faible [3], qui pourrait permettre à terme d'explorer les limites du modèle standard de la physique. Il a en effet tout récemment été montré que les décalages en fréquence entre énantiomères étaient particulièrement sensibles à la présence hypothétique de matière noire [10].

1• A. Collet, J. Crassous, J.-P. Dutasta, L. Guy, *Molécules chirales – Stéréochimie et propriétés*, EDP Sciences - Collection : Savoirs Actuels (2006).

2• R.A. Hegstrom et D.K. Kondepudi, "The Handedness of the Universe", *Sci. Am.* **262** (1990) 108-115.

3• N. Jones, "Frontier experiments: Tough science", *Nature* **481** (2012) 14-17.

4• P. Schwerdtfeger, "The Search for Parity Violation in Chiral Molecules", in *Computational Spectroscopy: Methods, Experiments and Applications*, Chap. 7, pp. 201-221, Wiley-VCH Verlag (2010).

5• A Shelkovnikov *et al.*, "Stability of the Proton-to-Electron Mass Ratio", *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 150801.

6• F. Capasso *et al.*, "Quantum Cascade Lasers", *Physics Today* **55** (2002) 34-40 ; S. Forget *et al.*, « Les différents lasers : un tour d'horizon », *Reflets de la physique* **21** (2010) 18-23.

7• J.L. Miller, "Precision spectroscopy comes to the mid-IR", *Phys. Today* **68** (2015) 16.

8• A. Amy-Klein, « Des lasers à impulsions femtosecondes pour mesurer les fréquences », *Reflets de la physique* **21** (2010) 42-45.

9• A. Amy-Klein *et al.*, « La lumière des meilleures horloges accessible par les fibres du réseau Internet », *Reflets de la physique* **47**-**48** (2016) 91-94.

10• K. Gaul *et al.*, "Chiral Molecules as Sensitive Probes for Direct Detection of P-Odd Cosmic Fields", *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) 123004.

Je tiens à remercier toutes les personnes suivantes ainsi que leurs collègues : R. Bast, A. Borschevsky, L. Pašteka, T. Saue et P. Schwerdtfeger (chimie théorique), J. Crassous et L. Guy (synthèse moléculaire), P. Asselin, B. Tremblay, T.R. Huet et P. Soulard (spectroscopies micro-onde, millimétrique et infrarouge), M. Abgrall, Y. Le Coq, R. Le Targat, P.-É. Pottie (métrologie des fréquences), et enfin A. Amy-Klein, B. Argence, N. Cahuzac, A. Cournol, M. Goncalves, A. Goncharov, A. Kaladjian, L. Lecordier, O. Lopez, M. Manceau, H. Mouhamad, M. Pierens, R. Santagata, A. Shelkovnikkov, S.K. Tokunaga, D.B.A. Tran et F. Wiotte (participation au développement du nouveau dispositif).

Brève

Einstein Telescope : la collaboration désormais en ordre de marche

Résumé de l'actualité scientifique du CNRS/IN2P3 du 28 juin 2022

Einstein Telescope (ET), détecteur européen d'ondes gravitationnelles de « troisième génération » (après Virgo en Europe et LIGO aux États-Unis), a été imaginé il y a une quinzaine d'années pour détecter, avec une sensibilité décuplée par rapport à ses prédécesseurs, les infimes soubresauts de l'espace-temps engendrés par les phénomènes cosmiques extrêmes. Il repose sur l'expérience acquise avec les détecteurs actuels de seconde génération.

Comme ses prédécesseurs, *ET* fera appel à des interféromètres lasers géants pour percevoir les ondes gravitationnelles. Il en comptera trois, longs de 10 km et organisés en triangle, à comparer à Virgo qui en utilise un unique, long de 3 km. Autres différence notable, *ET* sera souterrain pour s'affranchir du bruit sismique de surface. Enfin, le détecteur sera composé de deux interféromètres distincts ; le premier sera à température ambiante, tandis que l'autre aura des miroirs refroidis à température cryogénique pour réduire les vibrations thermiques.

La collaboration *Einstein Telescope*, qui comprend plus de 1200 membres, vient de franchir une étape importante avec la rencontre à Budapest les 7 et 8 juin 2022 des quelques 80 représentants du Conseil de la collaboration pour entériner les règles de fonctionnement, ses objectifs scientifiques et les développements nécessaires pour y parvenir.

L'objectif est dorénavant de mener à bien les études de faisabilité et de choix du site d'implantation, pour que la construction d'*Einstein Telescope* puisse démarrer en 2026, et les premières observations en 2035. Avec le satellite européen LISA, qui s'envolera dans la même période pour sonder les trous noirs super-massifs, et le détecteur d'ondes gravitationnelles américain *Cosmic Explorer*, *ET* continuera la révolution astronomique et de physique fondamentale commencée avec Virgo et LIGO.

www.et-gw.eu/index.php

Ce que la Covid-19 nous apprend sur **la modélisation des épidémies**

Jean-François Mathiot[1] (jean-francois.mathiot@clermont.in2p3.fr), **Laurent Gerbaud**[2] **et Vincent Breton**[1]

(1) Laboratoire de Physique de Clermont (UMR6533 CNRS/IN2P3, Université Clermont Auvergne), 4 avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière Cedex

(2) Institut Pascal (UMR6602 CNRS, Université Clermont Auvergne, CHU Clermont-Ferrand, SIGMA Clermont), 4 avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière Cedex

L'épidémie de Covid-19 se transmet par les voies respiratoires. Ce mode de transmission dépend essentiellement des relations sociales entre individus, par opposition aux épidémies dont l'élément pathogène est transmis à longue distance, comme par exemple par l'eau.

Après un bref résumé des différents types de modèles utilisés jusqu'à présent pour comprendre cette épidémie, nous présentons un nouveau modèle basé sur la théorie de la percolation. Il permet d'intégrer de façon naturelle les trois caractéristiques des relations sociales, pertinentes pour la propagation de l'épidémie : leur densité, leur intensité et leur variété. Quelques résultats sur la modélisation de l'évolution de l'épidémie de Covid-19 en France depuis ses débuts sont présentés.

La Covid-19 nous a appris à être particulièrement prudents sur les prédictions que l'on pouvait raisonnablement faire sur l'évolution d'une épidémie. Pourtant, sa modélisation mathématique est essentielle à plusieurs points de vue : en premier lieu, bien évidemment, pour comprendre la dynamique propre aux différentes phases de sa propagation. Cette compréhension est indispensable pour anticiper son évolution et pouvoir prendre, si ce n'est les bonnes décisions, tout au moins les moins mauvaises au moment adapté, en évitant de surréagir ou de réagir avec retard.

La propagation d'une épidémie dépend de ses caractéristiques, en particulier sa contagiosité ou la durée de la période pendant laquelle une personne contaminée peut en infecter une autre. Il convient aussi de tenir compte des conditions physiques de cette propagation. De ce point de vue, nous pouvons identifier deux grandes classes d'épidémies :

- (I) celles qui se propagent de proche en proche par proximité physique lors d'interactions sociales, telles que les épidémies transmises par voies respiratoires ;
- (II) celles qui se propagent à grande échelle par l'intermédiaire d'un élément extérieur, à l'exemple des épidémies transmises par l'eau (choléra...) ou par un vecteur comme le moustique pour le paludisme.

L'étude de la Covid-19 permet de mettre en évidence les caractéristiques essentielles des épidémies de classe I sur plusieurs années. C'est un véritable défi pour tous les modèles utilisés, et une situation tout à fait nouvelle par rapport à la modélisation d'une épidémie de grippe saisonnière. Cette dernière se caractérise en effet par une propagation simultanée sur tout le territoire, une couverture vaccinale initiale importante, une durée de quelques mois et une contagiosité relativement faible.

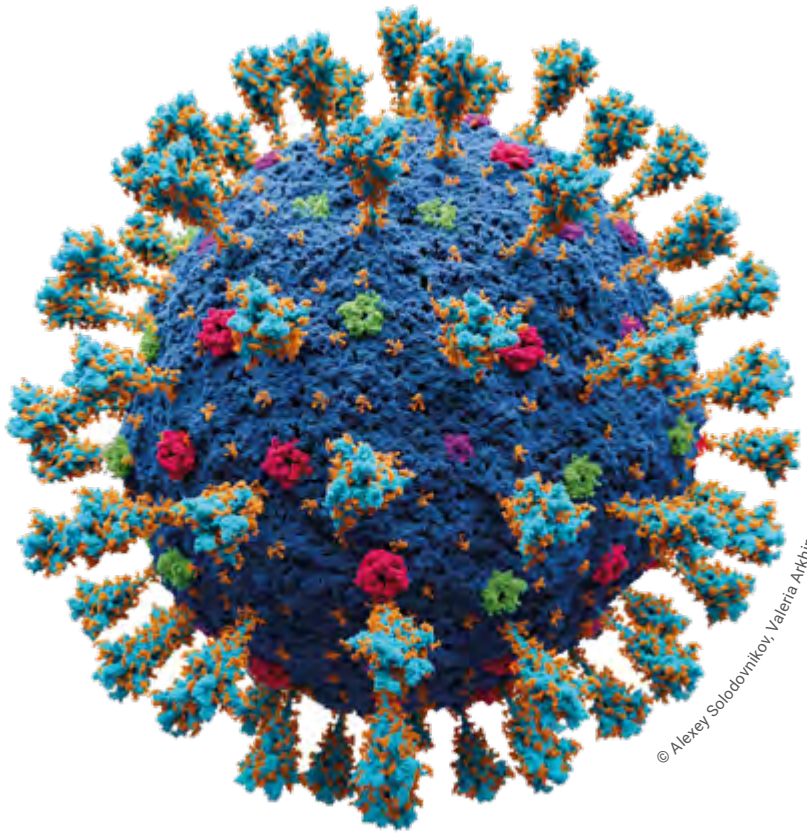
L'épidémie de Covid-19 a démarré quant à elle à partir d'un nombre extrêmement restreint de personnes infectées. Différentes publications documentent une circulation précoce du virus en France, plusieurs semaines avant les premiers cas répertoriés officiellement le 24 janvier 2020 [1, 2]. Cette propagation souterraine s'est faite au sein d'une population sans aucune couverture vaccinale et avec un virus bien plus virulent que celui de la grippe. Ces caractéristiques propres induisent des contraintes très fortes sur les modèles existants et ouvrent la voie pour explorer de nouvelles approches.

Comment modéliser l'épidémie de Covid-19

De manière générale, nous pouvons identifier trois grandes familles de modèles pour décrire la propagation d'une épidémie :

- les modèles « compartimentaux », déployés au milieu des années 1920 pour décrire en particulier l'évolution démographique d'une population animale ;
- les modèles « multi-agents », élaborés dans le milieu des années 1970 avec l'apparition de l'intelligence artificielle distribuée ;
- enfin, les modèles de « percolation », développés en chimie au milieu des années 1950 pour décrire la diffusion d'un liquide dans un milieu poreux.

Ces différentes modélisations ne sont pas toutes adaptées aux caractéristiques fondamentales de l'épidémie de Covid-19.



© Alexey Solodovnikov, Valeria Arkhipova (Wikimedia Commons).

Modèle atomique d'un virus de SARS-CoV-2. Chaque petite sphère représente un atome.

Modèles de type compartimentaux

Ils s'intéressent à l'évolution du nombre d'individus dans certaines catégories [3], comme par exemple les catégories Saine, Infectée ou Rétablie, d'où leur nom générique de « modèles SIR ». Par construction, ces modèles considèrent que n'importe quelle personne contaminée peut infecter une personne saine où qu'elle se trouve dans le territoire étudié, et donc sans qu'il y ait eu nécessairement un contact lors d'une interaction sociale. La propagation de l'épidémie dépend alors d'un paramètre global R, appelé taux de reproduction. Celui-ci représente le nombre moyen de personnes saines qu'une personne contaminée va infecter pendant toute sa période de contagiosité.

Les modèles compartimentaux sont adaptés à une épidémie se développant à grande échelle, de classe II dans la nomenclature rappelée en introduction, mais le sont peu pour comprendre l'évolution d'une épidémie de type Covid-19 sur le long terme, pour laquelle l'environnement local est essentiel.

Toute la dynamique de l'épidémie est définie dans ces modèles par le taux de reproduction R. Celui-ci dépend de facteurs de nature très différente : la nature intrinsèque du virus, le comportement social des personnes, l'historique de l'épidémie ou encore le taux de vaccination de la population concernée. Il est ainsi impossible d'avoir une détermination indépendante de R, qui doit être estimé typiquement par la mesure des contaminations pendant une quinzaine de jours.

Modèles de type multi-agents

Ces modèles consistent en une simulation numérique d'un territoire restreint, typiquement une ville ou un quartier, avec tous leurs habitants et leurs différentes interactions, presque heure par heure [4]. Ils nécessitent la connaissance détaillée de ces interactions, qu'elles soient dans le milieu professionnel, associatif, familial, à l'école ou entre amis, ou pour aller faire ses courses. Les échelles caractéristiques d'espace et de temps de ces modèles sont relativement petites ; elles sont entièrement tributaires des capacités de calcul disponibles.

Les modèles multi-agents sont adaptés pour répondre à des questions très précises sur un territoire limité, comme par exemple pour étudier l'importance des contaminations à l'école, dans une entreprise ou dans un Ehpad, sur une échelle de temps limitée. Il est donc plus difficile d'extraire une information générique sur un grand territoire, comme une région ou un pays, et de suivre une épidémie sur le long terme.

Modèles de type percolation

Ces modèles s'intéressent à la propagation de proche en proche d'un évènement donné dans un milieu constitué d'un très grand nombre d'éléments [5]. Cet évènement peut être par exemple un liquide s'écoulant de cavité en cavité dans un milieu poreux, ou un feu se propageant d'arbre en arbre dans une forêt. Dans un réseau de communication ou de transport d'électricité à grande échelle, il correspond à la propagation d'une information ou d'un courant électrique, de relais en relais. Tout naturellement, ces modèles ont été appliqués à la transmission de proche en proche d'une épidémie dans une population donnée, par la formation d'agrégats ("clusters" en anglais).

Les modèles de percolation ont une propriété tout à fait intéressante dans le cas de la propagation d'une épidémie : l'identification du seuil au-delà duquel elle devient incontrôlable sauf

>>>

>>>

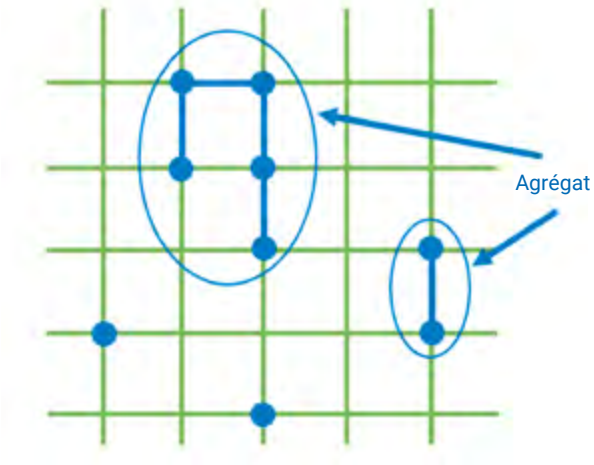
en cas de mesures radicales, confinement ou autres restrictions fortes des relations sociales, par exemple. Ils sont particulièrement flexibles, et sont pertinents dès lors que le nombre de personnes considérées est élevé, comme par exemple pour une ville de 100 000 habitants et plus. Ils sont donc tout à fait adaptés pour décrire une épidémie du type Covid-19 et nous ont inspirés pour construire le modèle PERCOVID [6], en complément des modèles compartimentaux souvent utilisés [7].

Qu'est-ce que PERCOVID ?

Un modèle de percolation est défini sur un réseau, composé de sites reliés entre eux par des liens. Il est ainsi caractérisé par trois quantités fondamentales :

- la dimension D du réseau ($D = 1, 2, 3, 4...$), choisie selon la nature du problème étudié ;
- la densité p de sites dits occupés, comprise entre 0 et 1 ;
- la probabilité q d'établir un lien entre deux sites occupés voisins, comprise entre 0 et 1.

Un agrégat est constitué par l'ensemble des sites occupés, reliés entre eux par un lien (fig. 1). Selon la valeur des paramètres p et q, pour une dimension donnée du réseau, on pourra alors identifier deux configurations bien distinctes : l'une correspond à quelques agrégats de petite taille répartis uniformément sur tout le réseau, l'autre à un très grand agrégat composé typiquement de plus de la moitié des sites occupés, et entouré de tout petits agrégats. Dans ce dernier cas, on dira que le système se trouve dans la « zone de percolation ». Lorsqu'on augmente p et/ou q, la transition entre ces deux configurations est extrêmement brusque dès lors que le nombre de sites considérés est grand. On parle alors de « transition de percolation ».



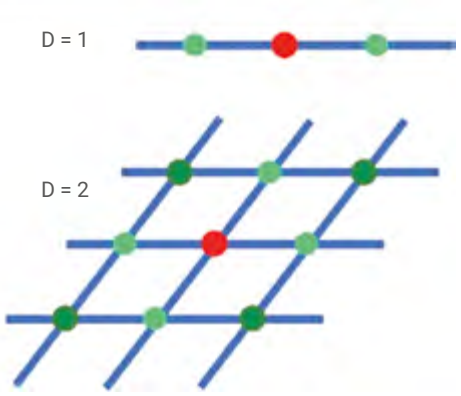
1. Exemple simple de réseau à deux dimensions. Les sites occupés sont représentés par des points bleus, et les liens établis entre deux sites occupés par des traits bleus. Cette situation correspond à $p = 9/25$ et $q = 5/6$.

Les épidémies par voies respiratoires sont entièrement déterminées par les relations sociales. Pour tenir compte de la proximité géographique naturelle au sein de chaque foyer, chaque site du réseau représente un foyer de 1, 2, 3 personnes, ou plus. Les relations sociales faisant basculer l'épidémie d'un foyer vers un autre sont représentées quant à elles par trois de leurs caractéristiques principales, pertinentes pour la propagation d'une épidémie : leur densité, leur intensité et leur variété plus ou moins grande, qui dépendent des pratiques sociologiques de chaque territoire, ainsi que de la règlementation en vigueur.

Ces trois caractéristiques sont directement associées aux trois paramètres fondamentaux d'un modèle de percolation :

- la densité des relations sociales est définie par le nombre moyen de contacts sociaux qu'une personne peut avoir dans une journée, rapporté au nombre maximal de voisins proches ou moins proches sur le réseau. Elle est représentée par la densité p ;
- l'intensité des relations sociales est définie par la plus ou moins grande facilité de contaminer son voisin dans le réseau social. Cette intensité est représentée par la probabilité q ;
- la construction d'un réseau à D dimensions permet de prendre en compte la variété de ces relations sociales. D pourra être pris égal à 1, 2, 3 ou 4 selon la plus ou moins grande complexité des relations sociales dans le territoire étudié, comme par exemple dans le domaine professionnel, familial ou associatif, ou pour les interactions de la vie courante.

La grande flexibilité des modèles de percolation permet de traiter de façon tout à fait naturelle certaines

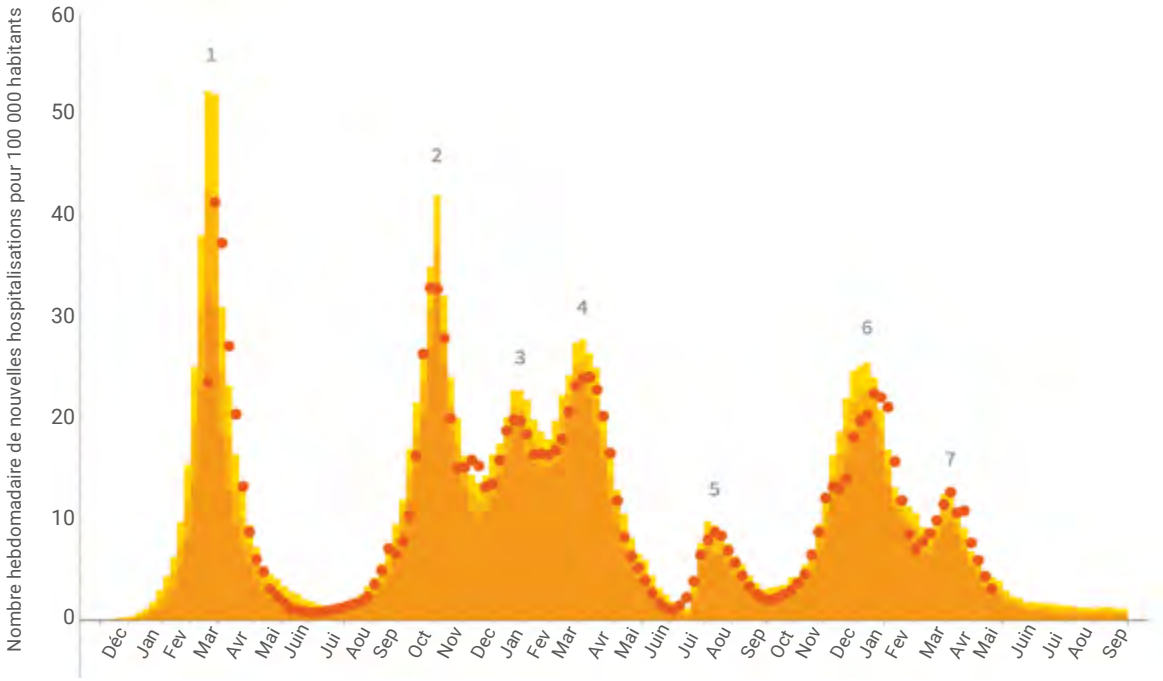


2. Réseaux à une ($D = 1$) et deux ($D = 2$) dimensions. Les voisins proches, ou relations essentielles, d'une personne infectée (en rouge) sont représentés en vert clair, alors que les voisins moins proches, ou relations moins essentielles, sont représentés en vert foncé. À une dimension, il n'existe que des relations essentielles.

spécificités mises en valeur par l'épidémie de Covid-19. La propagation différenciée suivant les relations essentielles ou moins essentielles que chaque individu peut avoir dans son environnement social correspondra par exemple à la propagation différenciée vers les voisins les plus proches ou un peu moins proches (fig. 2).

Chaque individu d'un foyer est dans un état différent : sain, infecté mais non contagieux, contagieux, guéri, hospitalisé, décédé, vacciné avec ou sans rappel. Lorsqu'il est infecté, il pourra l'être avec la souche initiale du virus ou avec chacun de ses variants et être soit symptomatique soit asymptomatique. Tous ces états correspondent à des comportements sociaux différents, et donc à une valeur de la probabilité q différente. Le taux de vaccination peut être modulé chaque jour, avec une efficacité du vaccin variant en fonction du temps.

Dans le modèle PERCOVID, la propagation de l'épidémie se fait pas à pas, où un pas de temps numérique correspond à une journée. À chaque pas, toute personne contagieuse du réseau va pouvoir infecter un proche voisin dans son premier cercle de relations essentielles, un voisin moins proche dans son second cercle de relations moins essentielles, ou encore une personne de son propre foyer. Elle va le faire avec une probabilité $q \times r$, où r est la contagiosité intrinsèque du virus. Ce paramètre r est caractéristique de chaque virus et variant, et permet de moduler la propagation du virus selon sa contagiosité. Lorsqu'une



3. L'épidémie de Covid-19 en France, à partir de décembre 2019. Le nombre hebdomadaire de nouvelles hospitalisations, pour 100 000 habitants, est indiqué en points rouges (données de Santé Publique France [9]), avec la modélisation en orange. Les différentes teintes d'orange correspondent à l'incertitude statistique associée, pour un calcul moyenné sur une dizaine de simulations. Chaque pic est identifié par un nombre.

personne est infectée, une horloge interne démarre. Cette horloge permet de suivre pas à pas l'évolution de l'infection.

Quelques résultats

La simulation présentée ici est effectuée sur un réseau à trois dimensions comportant environ trois millions de foyers (un dixième de la population française). Elle est initialisée au 1er décembre 2019, avec une quinzaine de personnes infectées. Cela correspond au nombre minimal de personnes infectées pour que l'épidémie puisse se propager sur le réseau. Chaque simulation dure environ trente minutes sur un ordinateur portable.

Les paramètres de la modélisation sont de trois types : épidémiologiques, ou liés aux comportements sociaux des populations concernées, ou liés à la mobilité des individus en dehors du premier ou du second cercle de leurs relations sociales. Les paramètres épidémiologiques ne sont pas toujours connus avec une grande précision, en particulier au démarrage de l'épidémie comme ce fut le cas pour la Covid-19. La modélisation de l'épidémie consiste alors à étudier plusieurs scénarios possibles suivant la valeur de ces paramètres, en les affinant au fur et à mesure de la publication de nouvelles études.

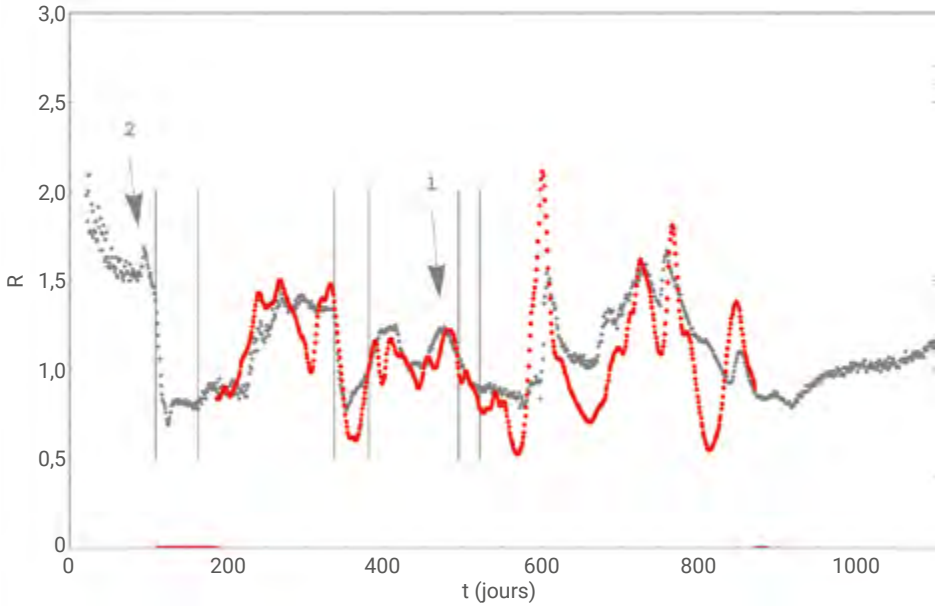
Certains paramètres liés aux comportements sociaux peuvent être déduits d'études sociologiques, comme pour la densité des relations sociales en France [8]. L'estimation de l'intensité de ces relations sociales, et de sa variation en fonction du temps, est plus subjective, et ne peut être faite que par ajustement de la simulation avec des données expérimentales. Le suivi de l'épidémie de Covid-19 est de ce point de vue particulièrement instructif, avec pratiquement toutes les situations possibles de relations sociales : sans aucune restriction au tout début de l'épidémie avec un comportement social typique de chaque population considérée, restrictions plus ou moins fortes pendant les périodes de confinement, restriction de l'accès aux relations moins essentielles et restrictions dues aux couvre-feux, influence des gestes barrières, relâchement des restrictions et des comportements lors des vacances d'été.

La mobilité des personnes en dehors de leurs relations essentielles ou moins essentielles a été très peu étudiée. Cette mobilité joue un rôle important dans les phases de démarrage de l'épidémie ou d'apparition de nouveaux variants, car elle permet une dissémination du virus dans des territoires nouveaux. Une fois l'épidémie implantée, cette mobilité n'a pas d'effet dominant dans notre simulation.

En l'absence d'une stratégie de tests aléatoires systématiques sur tout le territoire, la façon la plus objective de suivre la propagation de l'épidémie est de considérer le nombre hebdomadaire de nouvelles hospitalisations. Cette donnée est indiquée sur la figure 3 en points rouges, avec la modélisation en orange. Elle est caractérisée par des périodes de brusque intensification pendant lesquelles le nombre de cas de Covid-19 évolue rapidement vers un pic épidémique, et se traduit par une évolution en forme de vagues successives. Chacun des pics observés peut être identifié dans notre simulation à un évènement particulier.

- Le pic (1), en mars 2020, correspond à un développement exponentiel de l'épidémie dans une population non vaccinée, en l'absence de restrictions fortes et avec un virus relativement contagieux. Avec un confinement très strict, la décrue du nombre d'hospitalisations est extrêmement brutale.
- Le pic (2), en octobre 2020, correspond à la reprise épidémique de l'automne

>>>



4. Taux de reproduction R en fonction du temps. Les données de Santé Publique France [9] sont indiquées en rouge, et les prédictions du modèle PERCOVID en gris. Le temps t = 0 correspond au 1er décembre 2019. Les paires de traits verticaux encadrent les trois périodes de confinement en France.

>>>

suite à un relâchement des pratiques sociales et des gestes barrières, et après une dissémination de l'épidémie sur tout le territoire pendant les vacances d'été. La décrue du nombre d'hospitalisations est ici aussi brutale, suite à la deuxième période de confinement.

- Le pic (3), en janvier 2021, correspond juste à un relâchement des comportements sociaux après le deuxième confinement et pendant et après les fêtes de fin d'année, sans explosion de l'épidémie.
- Le pic (4), en mars/avril 2021, est entièrement dû à l'apparition du variant *alpha*, bien plus contagieux que la souche initiale du virus. Il correspond à un pic classique de propagation d'une épidémie.
- De la même façon, le pic (5) de l'été 2021 est dû à la propagation du variant *delta*. La contagiosité de ce variant est encore bien plus forte que celle du variant *alpha*. Cela lui permet de se propager de façon significative, même en été, sans cependant beaucoup d'intensité compte tenu de l'immunité naturelle acquise par les personnes guéries et du taux de vaccination croissant de la population française.
- Le pic (6) en janvier 2022 est la conséquence de deux effets bien différents : tout d'abord, en novembre/décembre, une remontée des infections par le variant *delta* due à la perte progressive de l'immunité vaccinale et naturelle, renforcée à partir de décembre 2021 par la propagation du variant *omicron* bien plus contagieux. Cette très forte virulence induit un pic de contamination élevé, puis une décroissance très rapide en janvier 2022 une fois ce pic franchi, grâce à l'immunité naturelle acquise par les personnes guéries dans l'environnement social de chaque individu.
- Le pic (7), observé à partir de la fin février 2022, trouve son origine dans la propagation de la mutation *BA.2* du variant *omicron*, avec une contagiosité encore plus forte. Cette propagation est favorisée par le relâchement des comportements sociaux au retour des vacances scolaires.

La propagation de l'épidémie pendant l'été 2022 devrait rester faible mais continue, comme le montre la valeur du taux de reproduction R proche de 1 (fig. 4). Dans notre simulation, cela est dû à la perte progressive de l'immunité. Cette propagation pourra devenir importante seulement en présence d'un nouveau variant échappant de façon significative à la protection vaccinale ou naturelle.

L'étude du nombre hebdomadaire de nouvelles hospitalisations ne permet cependant pas d'anticiper sur la dynamique propre de l'épidémie : l'hospitalisation éventuelle d'une personne infectée a lieu environ une quinzaine de jours après son infection. Cette dynamique est entièrement déterminée par le taux de reproduction R. Grace à l'horloge interne déclenchée dans notre modélisation lorsqu'une personne est infectée, nous pouvons calculer quotidiennement la valeur exacte de ce paramètre et donc anticiper sur l'évolution de l'épidémie. Ce taux est ici une prédiction, alors qu'il est un paramètre nécessaire pour initialiser les modèles de type compartimentaux.

La figure 4 présente une comparaison entre la valeur de R prédite par le modèle PERCOVID et celle estimée par Santé Publique France à partir des données de taux d'infection journalier [9]. Typiquement, un pic dans le comportement de R apparait environ une quinzaine de jours avant un pic des contaminations. Le pic noté par une flèche (1) sur cette figure est ainsi antérieur d'une quinzaine de jours sur le pic des contaminations noté (4) sur la figure 3, correspondant à la troisième période de confinement. Celle-ci n'a eu ainsi que peu d'influence sur la valeur de R car la dynamique de l'épidémie était déjà dans une phase décroissante, contrairement aux deux premières périodes de confinement qui ont induit une chute brutale de cette valeur. Le pic (2) correspond, quant à lui, au franchissement des seuils épidémiques dans le Haut-Rhin [2] au tout début de l'épidémie.

Conclusion

Le modèle PERCOVID, par sa capacité à intégrer les caractéristiques pertinentes des relations sociales dans la propagation des épidémies des voies respiratoires, est un outil original pour l'analyse des maladies émergentes. Il est un bel exemple d'étude pluridisciplinaire à l'interface entre épidémiologie, mathématique, physique et sociologie.

Cette étude représente une nouvelle manière de concevoir les caractéristiques d'une épidémie des voies respiratoires, en séparant clairement le comportement intrinsèque du virus, sa contagiosité en particulier, des effets dus aux comportements sociaux des populations au sein desquelles il se propage. Cela peut se faire par exemple en comparant la dynamique

de plusieurs épidémies — comme la grippe, la Covid-19, Ebola — dans un même territoire ou une même épidémie dans des territoires aux pratiques sociologiques différentes — comme différents pays en Europe, Afrique ou en Asie. Le modèle PERCOVID permet alors d'accéder aux propriétés du virus, indépendamment du contexte social dans lequel ce dernier se propage.

1• F. Carrat *et al.*, "Evidence of early circulation of SARS-CoV-2 in France: findings from the population-based "CONSTANCES" cohort", *Eur. J. Epidemiol.* **36** (2021), 219-222 ; https://doi.org/10.1007/s10654-020-00716-2.

2• L. Gerbaud *et al.*, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **17** (2020) 7175 ; https://doi.org/10.3390/ijerph17197175.

3• Modélisation d'une épidémie : https://cutt.ly/Modelisation-d-une-epidemie

4• B. Gaudou *et al.*, "COMOKIT: a modeling kit to understand, analyze and compare the impacts of mitigation policies against the COVID-19 epidemic at the scale of a city ", *Front. Public Health* **8** (2020) 563247 ; https://cutt.ly/doi-10-3389 ; https://comokit.org.

5• Modèles de percolation : https://cutt.ly/La-percolation-jeu-de-pavages-aleatoires

6• J.-F. Mathiot, L. Gerbaud et V. Breton, "Highlighting the impact of social relationships in the propagation of respiratory viruses using percolation theory", *Scientific Reports* **11** (2021) 24326 ; www.nature.com/articles/s41598-021-03812-9.

7• H. Salje *et al.*,"Estimating the burden of SARS-CoV-2 in France", *Science* **369** (2020) 208-211 ; https://doi.org/10.1126/science.abc3517

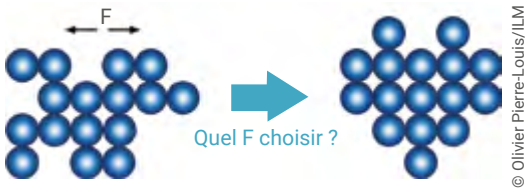
8• G. Béraud *et al.*, "The French Connection: The First Large Population-Based Contact Survey in France Relevant for the Spread of Infectious Diseases" *PLoS One* **10(7)** e0133203 ; https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133203 (2015).

9• Santé Publique France : https://geodes.santepubliquefrance.fr.

Brève

Contrôler les formes à l'échelle du nanomètre

Actualité scientifique de l'Institut de physique (CNRS) du 8 juillet 2022



© Olivier Pierre-Louis/ILM

1. Un nanocluster fluctuant thermiquement peut être guidé vers une forme cible (ici un cœur) à l'aide d'une force (horizontale) dont le sens s'adapte à chaque instant à une configuration selon une stratégie optimale.

À l'échelle moléculaire, la température correspond à l'agitation désordonnée des atomes. Ce phénomène a été découvert au XIX^{e} siècle par le biologiste Brown lors de l'observation sous microscope du mouvement erratique de particules de pollen de taille micrométrique dans l'eau. Einstein a montré en 1905 que ce « mouvement brownien » résulte des collisions des pollens avec les molécules d'eau en perpétuel mouvement chaotique — la manifestation microscopique de la température. Dans certains cas, cette agitation thermique est même susceptible d'engendrer des changements de forme spontanés dans les objets nanoscopiques. Ces derniers sont composés d'un petit nombre d'atomes ou de particules regroupés en agrégats denses appelés "*clusters*", qui peuvent facilement se réarranger et explorent de fait au cours du temps une grande variété de formes.

Dans une nouvelle étude, des chercheurs de l'institut Lumière Matière à Lyon (iLM, CNRS/Univ. Claude Bernard Lyon 1) posent une question originale : combien de temps met un groupe d'atomes pour atteindre une forme donnée ? De façon surprenante, ils ont découvert que dans certains cas, il existe une température particulière pour laquelle ce temps est minimum. Plus encore, il est possible d'optimiser la durée de ce processus de transformation vers la forme désirée en exploitant astucieusement les fluctuations thermiques par application d'une force dépendant de la forme instantanée du cluster. Ce travail est publié dans la revue *Physical Review Letters* [1].

Dans leur approche, les physiciens se sont concentrés sur des assemblages simples et faciles à observer, formés de quelques atomes ou particules liés entre eux par des interactions attractives et étalés en une monocouche sur un substrat thermalisé (fig. 1). Ces assemblages, appelés *clusters* bidimensionnels, et leurs réarrangements spontanés dus à l'agitation thermique sont couramment observés dans de nombreux domaines : par exemple avec des atomes métalliques, des nanoparticules (comme les fullerènes), ou encore des colloïdes (comme les pollens).

Afin de trouver la stratégie optimale pour guider les nano-objets vers une forme arbitrairement choisie, les auteurs ont couplé la physique statistique hors équilibre à des outils de simulation numérique basés sur la « programmation dynamique ». Celle-ci, largement utilisée en ingénierie et en mathématiques appliquées, permet de résoudre des problèmes d'optimisation très variés, incluant par exemple la gestion de barrages dans les réseaux hydrologiques.

Dans le cas présent, la programmation dynamique a permis aux chercheurs de réduire de plusieurs ordres de grandeur le temps moyen nécessaire pour atteindre une forme présélectionnée, particulièrement dans les cas d'intérêt quand la température est basse et le *cluster* suffisamment gros (typiquement une douzaine de particules).

1• F. Boccardo et O. Pierre-Louis, *Phys. Rev. Lett.* **128** (2022) 256102.

Olivier Pierre-Louis (olivier.pierre-louis@univ-lyon1.fr), Institut Lumière Matière.

De la métrologie à la métallurgie de précision
Charles-Édouard Guillaume, prix Nobel de physique 1920

Philippe Lebrun[a] (Philippe.Lebrun@cern.ch) et **Hubert Schaff**[b]
(a) Président de l'Institut scientifique européen (ESI-Archamps)
Ancien chef du département Technologie des accélérateurs du CERN
(b) Ancien directeur Partenariat et Innovation de Aubert et Duval
Ancien président de la SF2M (Société Française de Métallurgie et de Matériaux)

Dans un précédent numéro de *Reflets de la physique*, un article de J.E. Wesfreid (n°65, pp. 30-33) décrivait les recherches aérodynamiques de Gustave Eiffel. Suite à cet article, avec Hubert Schaaf (ancien président de la SF2M), j'ai interrogé les lecteurs sur le nom du lauréat Nobel qui a effectué la mesure de la hauteur de la Tour. La riche et unique réponse à la question que j'avais posée a été donnée par Philippe Lebrun, physicien des accélérateurs du CERN.

Ces deux chercheurs (qui ne se connaissaient pas auparavant) nous présentent, dans une rubrique d'histoire des sciences, l'ensemble des activités de recherche appliquée du métallurgiste Charles-Édouard Guillaume (prix Nobel de physique 1920), insuffisamment reconnu aujourd'hui. Le centième anniversaire de la mort d'Eiffel en 2023 fournira d'autres occasions d'aborder la métallurgie.

Étienne Guyon

On connaît bien le premier prix Nobel de physique attribué à des chercheurs d'un laboratoire français, celui d'Henri Becquerel, Pierre Curie et Marie Sklodowska-Curie, en 1903. On sait moins que le deuxième récipiendaire a été en 1920, Charles-Édouard Guillaume — bien avant Jean Perrin (1926) et Louis de Broglie (1929) — *en reconnaissance du service rendu aux mesures de précision en physique par sa découverte des anomalies des alliages fer-nickel*. Outre son importance pratique, en particulier en métrologie et en horlogerie, cette découverte a marqué le début de la métallurgie de précision et le développement d'une nouvelle forme de coopération entre science et industrie. À un siècle de distance, il vaut la peine de rappeler ces travaux et d'évoquer le parcours de l'homme de science qui les a réalisés.

Issu d'une famille d'horlogers du Jura suisse, Charles-Édouard Guillaume nait le 15 février 1861 à Fleurier, dans le Val-de-Travers, où l'on peut encore voir sa maison natale. Après des études au Collège de Neuchâtel puis à l'École Polytechnique Fédérale de Zürich, il entre à 22 ans au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) sur le conseil d'Adolphe Hirsch, principal bâtisseur de la Convention du Mètre, le traité international signé par dix-sept États qui a fondé le BIPM

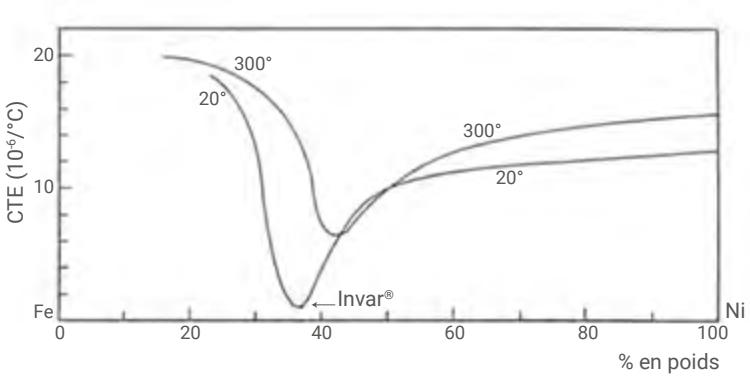
© Jacques Boyer / Roger Viollet

1. Charles-Édouard Guillaume à son bureau du BIPM en 1920.

en 1875. Les missions de cette jeune organisation étaient alors de fabriquer les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, d'élaborer et de distribuer les étalons nationaux, et de veiller à l'adoption généralisée du système métrique [1]. Guillaume y fera une carrière de cinquante-trois ans, gravissant les échelons jusqu'au poste de directeur qu'il occupe entre 1915 et 1936 (fig. 1) ; il en restera directeur honoraire jusqu'à son décès le 13 mai 1938.

Guillaume aura aussi de nombreuses autres fonctions, *inter alia* correspondant de l'Académie des sciences, président de la Société Française de Physique (en 1913), président du Conseil de l'Institut International du Froid (de 1924 à son décès). Il s'intéressera à des questions scientifiques diverses : on peut citer, par exemple, son livre *Les rayons X et la photographie à travers les corps opaques* publié en 1896 (un an après la découverte de Roentgen) ou, la même année, son estimation de la température de l'Univers (5 à 6 K) avant Eddington et Nernst, et *a fortiori* avant les estimations basées sur l'expansion de l'Univers.

Au BIPM, ses premiers travaux portent sur la calibration des thermomètres utilisés pour la compensation de dilatation des étalons de longueur. Le cout élevé de ces étalons, constitués de platine iridié pour sa dureté, sa stabilité et sa résistance aux agents chimiques, était un frein à leur réplication comme étalons secondaires. Guillaume se met donc, dès 1891, à la recherche de solutions alternatives.



2. Coefficients de dilatation thermique des alliages Fe-Ni à 20°C et à 300°C en fonction de la teneur en nickel.

Sérendipité et systématique

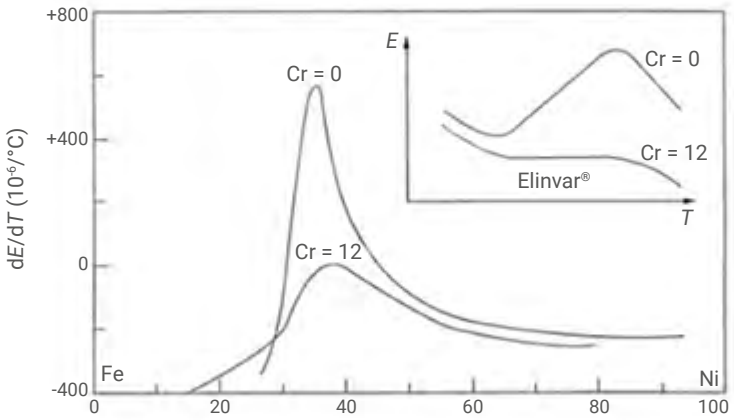
En 1895, à la demande de la Section technique de l'artillerie, le BIPM étudie un acier contenant 22 % de nickel et 3 % de chrome et découvre qu'il est plus dilatable que ses composants — violant ainsi la « loi des mélanges » — et non magnétique, double anomalie qui n'est pas sans rappeler les observations d'Hopkinson faites quelques années plus tôt. Un an plus tard, Guillaume ne manque pas d'étudier la dilatabilité d'un acier à 30 % de nickel, reçu au BIPM en vue de la construction de poids de précision : elle est, cette fois, plus faible que celles de ses composants, soit environ un tiers de celle du platine [2]. « *J'eus alors une des plus grandes émotions de ma vie. Traversant la cour au galop, j'annonçai cette découverte à mon directeur J.R. Benoît… "j'ai un sujet de recherche qui va m'occuper pour dix ans". Dans cette évaluation, j'avais commis une erreur de 200 % ; c'est trente ans que je lui ai consacrés.* » [3]

« *Maintenant c'était fini pour le rôle du hasard ; une étude s'imposait ; elle était pleine de promesses ; mais pour que ces promesses deviennent réalité, il fallait encore un gros effort métallurgique et métrologique.* » [3] Or, la réduction du budget du BIPM depuis 1889 ne permettait pas d'y allouer les crédits nécessaires. Les aciers au nickel étudiés

>>>

>>>
au BIPM ayant été produits à l'usine d'Imphy (Nièvre) de la Société de Commentry-Fourchambault & Decazeville, Guillaume prend contact avec son directeur général Henri Fayol, qui lui accorde sa confiance et l'assure de sa coopération. En 1896, Imphy fournit dix-sept échantillons de compositions précisément connues, avec des teneurs en nickel variant de 5 % à 44 % : l'alliage à 36 % de nickel présente un minimum de dilatation, un dixième environ de celle du platine [4]. Avec des éléments d'addition et des traitements thermiques appropriés, on peut même l'annuler : c'est l'Invar® (fig. 2).

Guillaume continue à explorer systématiquement les propriétés des alliages fer-nickel, dont six-cents échantillons de diverses nuances seront fournis par Imphy [2]. Il en résultera *inter alia* le Platinite, un alliage à 48 % de nickel, qui permet des scellements au verre. Guillaume s'intéresse aussi à leur anomalie d'élasticité, et met au point en 1920 un alliage ternaire de 34 % de nickel et 12 % de chrome, l'Elinvar®, qui présente un module élastique constant entre - 50 °C et + 100 °C (fig. 3) [5], condition nécessaire pour fabriquer des ressorts de montre insensibles aux variations de température.



Dépendance en fonction de la teneur en nickel du coefficient de variation thermique dE/dT du module d'Young des alliages Fe-Ni et Fe-Ni-12%Cr. En encart : variation en fonction de la température du module d'Young des alliages Fe-34%Ni à 0 et 12 % de chrome.

Des applications révolutionnaires

La géodésie par triangulation a besoin d'une ou plusieurs bases rectilignes de longueur connue, en pratique de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Ces bases étaient traditionnellement mesurées en reportant bout à bout un grand nombre de fois une règle étalon de 4 m, processus fastidieux jusqu'à ce qu'Edvard Jäderin, géomètre suédois, le remplace par un fil d'acier sous tension d'une longueur de 24 m, dont la dilatation thermique devait être compensée [6]. Guillaume lui substitue un fil d'Invar® attaché à un fléau lesté par des poids, instrument qui équipe avec succès en 1899 l'expédition de Jäderin pour mesurer l'arc de méridien au Spitzberg. En mars 1906, la courte période de disponibilité du tunnel du Simplon entre son percement et le début de son exploitation ferroviaire est mise à profit par les géomètres suisses pour y mesurer une base de plus de 20 km à l'aide des appareils à fil d'Invar® de Guillaume : l'écart des mesures aller et retour entre Brigue et Iselle n'est que de 22 mm [7]. Cette méthode a été par la suite largement utilisée, y compris pour la topométrie et l'alignement des grands accélérateurs de particules. En 1913, Guillaume tend un fil d'Invar® de 116 m entre le deuxième étage de la Tour Eiffel et le sol pour en enregistrer les déformations sous l'effet des variations de température (et des coups de vent !). « *La Tour se présente ainsi comme un gigantesque thermomètre, le plus grand du monde, vraisemblablement.* » [8]

Depuis, l'Invar® a trouvé de nombreuses applications, au laboratoire comme dans l'industrie, chaque fois que la dilatation devait être limitée ou contrôlée : bilames thermostatiques, cales de compensation pour assurer le maintien des assemblages cryogéniques, *shadow-masks* pour tubes cathodiques de télévision couleur et avec la mise au point de nuances soudables, réalisation de cuves de méthaniers et de tuyauteries cryogéniques sans soufflets de compensation.

➲ L'EFFET INVAR

L'effet Invar, forte réduction voire annulation de la dilatabilité thermique, s'observe dans plusieurs catégories d'alliages présentant un ordre ferromagnétique et une forte magnétostriction positive spontanée en volume. Cette magnétostriction vient compenser les variations naturelles de volume dues à l'anharmonicité des vibrations du réseau cristallin sous l'effet de la température (loi de Grüneisen).

L'Invar $Fe_{64}Ni_{36}$ est un alliage de deux éléments de transition 3d très voisins, en solution dans une structure cubique à faces centrées. En abaissant la température depuis le point de Curie de 550 K, les atomes de fer et de nickel adoptent une configuration ferromagnétique. La magnétostriction spontanée qui en résulte compense graduellement la contraction du réseau. Au-dessus de la température de Curie T_c, l'ordre ferromagnétique disparait et le matériau se dilate normalement.

L'effet Invar a fait l'objet de nombreuses études expérimentales (diffraction des rayons X sous pression, spectrométrie Mössbauer...) et théoriques (calculs de structure électronique), mais son origine précise est encore controversée [a, b]. Dans une première interprétation, les atomes de fer existent dans deux états de *spin* différents – un état de *spin* élevé de plus grand volume, et un état de *spin* plus faible, de plus petit volume et d'énergie légèrement plus élevée – dont les proportions changent avec la température. D'autres interprétations font appel à des structures ferromagnétiques non colinéaires, ou à de fortes variations avec la distance interatomique de l'intégrale d'échange entre moments magnétiques.

[a] K. Lagarec *et al.*, *J. Mag. Mag. Mat.* **236** (2001) 107-130.

[b] L. Nataf *et al.*, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 184422.

Le fonctionnement des montres est perturbé par les variations de température qui affectent le moment d'inertie du balancier, ainsi que la longueur et le module élastique du ressort spiral. La compensation thermique de ces effets est un problème qui a occupé les physiciens depuis Huygens [9], et Guillaume, fils et petit-fils d'horloger, s'y est évidemment attelé. Tout d'abord en concevant dès 1899 un balancier à inertie constante, constitué d'un bilame associant au laiton un acier à 44 % de nickel : le « balancier Guillaume ». Ce dernier corrige ainsi l'« erreur secondaire » des montres et chronomètres de marine. Dans les cinq ans qui suivront, cette invention équipera la quasi-totalité des montres. Après 1920, les montres à balancier monométallique seront équipées de ressorts spiraux en Elinvar®. Les découvertes de Guillaume ont ainsi, en deux décennies, amélioré la précision des montres de quelques minutes à quelques secondes par jour.

Entre science et industrie

En décembre 1920, Guillaume conclut son discours de réception du prix Nobel en expliquant les facteurs qui lui ont permis de réussir ses recherches. Il insiste sur l'accueil qui lui a été réservé à Imphy en 1896, alors qu'il était tout jeune ingénieur fraichement arrivé au BIPM. Sans contrat et sans budget, Henri Fayol, directeur général, a accepté de lancer immédiatement l'élaboration d'une série de coulées d'essais d'alliages fer-nickel, « *non sans que les administrateurs s'imaginent qu'ils seraient récompensés par quoi que ce soit d'autre que la satisfaction d'avoir prêté une assistance efficace à une recherche scientifique d'exploration.*» [2]

L'enthousiasme de Guillaume à explorer l'inconnu de façon systématique a été immédiatement partagé par Fayol, et ils ont inventé ensemble cette nouvelle forme de coopération, appelée bien plus tard « recherche conceptive » [10]. Pour Fayol, les programmes de recherche faisaient partie des paris à prendre sur l'avenir par l'état-major, au même titre que les autres inconnues de toute nature auxquelles l'entreprise aurait à faire face.

C'est ce modèle de recherche, basé sur une relation étroite entre science et industrie, qui l'a conduit en 1911 à recruter Pierre Chevenard pour créer un véritable laboratoire de recherche métallurgique. Un des pionniers de la métallurgie scientifique, connu dans le monde entier, Chevenard a inventé la dilatométrie en tant que technique d'étude des changements de phase, en mettant au point à Imphy dès 1916, le « dilatomètre Chevenard » encore utilisé aujourd'hui. Cela constitue une forme d'aboutissement des premières mesures de dilatation de Guillaume à Sèvres sur les deux échantillons dont on ne comprenait pas le comportement en dilatation et en magnétisme, les changements de phase des aciers alliés étant très mal connus à cette époque. Chevenard a été président de la Société Française de Physique en 1939, et cofondateur de la Société Française de Métallurgie en janvier 1945.

Dans un discours prononcé en juin 1925 lors d'une réception à Paris en l'honneur de Fayol, Guillaume rend à nouveau hommage à leur *coopération exemplaire* et conclut : « *Lorsqu'on prêche pour une union de plus en plus intime entre science et industrie, on croit affirmer seulement une chose : c'est que l'industrie a beaucoup à gagner à s'inspirer des méthodes scientifiques. Mais on oublie de dire que les hommes de science pourraient très utilement s'inspirer des méthodes industrielles !* » [11] Cette extraordinaire connivence entre Guillaume et Fayol a fait d'eux des visionnaires : les aciéries d'Imphy, aujourd'hui APERAM, filiale d'Arcelor-Mittal, existent encore, et les Invar® et les alliages magnétiques font toujours partie de leurs spécialités. ▮

> **“ Outre son importance pratique, la découverte de l'Invar® a marqué le départ de la métallurgie de précision et le développement d'une nouvelle forme de coopération entre science et industrie.”**

1• L. Julien, « Le système international d'unités redéfini », *Reflets de la physique* **62** (2019) 12-16.

2• Ch.-Éd. Guillaume, “Invar and elinvar”, Nobel lecture, 11 December 1920.

3• Citations de Ch.-Éd. Guillaume par A.C. Déré, F. Duffaut et G. De Liège, « Cent ans de science et d'industrie », dans *Les alliages de fer et de nickel*, Technique et documentation, Paris (1996) 1-23.

4• Ch.-Éd. Guillaume, « Sur la dilatation des aciers au nickel », *C.R. Académie des sciences*, **124** (1897) 178.

5• Ch.-Éd. Guillaume, « L'anomalie d'élasticité des aciers au nickel : réalisation d'un élinvar et son application à la chronométrie », *C.R. Académie des sciences*, **171** (1920) 83.

6• E. Jäderin, *Méthode pour la mensuration des bases géodésiques au moyen de fils métalliques*, Mémoires présentés à l'Académie des sciences de l'Institut de France, **32**, 7 (1902).

7• R. Gautier, « La mesure des bases géodésiques et la mesure du tunnel du Simplon en mars 1906 », *Le Globe. Revue genevoise de géographie*, **46** (1907) 138-148.

8• Ch.-Éd. Guillaume, *Le premier quart de siècle de la Tour Eiffel*, Société Astronomique de France, Paris (1913) ; Hachette Livre BNF (2016).

9• C. Attinger, « De Christian Huygens à Charles-Édouard Guillaume, la compensation thermique des horloges et des montres », *Chronometrophilia* **25** (1988) 42-80.

10• P. Le Masson et B. Weil, « Fayol, Guillaume, Chevenard – La science, l'industrie et l'exploration de l'inconnu : logique et gouvernance d'une recherche conceptive », *Entreprises et Histoire*, **83** (2016) 79-107.

11• Ch.-Éd. Guillaume, discours prononcé le 7 juin 1925 à Paris, Salle Hoche. Banquet en l'honneur de Henri Fayol.

Louis Pasteur dans l'œil du microscope

Clotilde Policar (clotilde.policar@ens.psl.eu)
Laboratoire des biomolécules (UMR7203, CNRS-ENS-PSL-SU),
Département de chimie de l'École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

Louis Pasteur, très connu pour ses travaux en biologie, a été formé comme chimiste à l'École normale supérieure. Parmi ses premiers travaux, on compte l'étude des acides tartriques qui l'amène à l'idée de dissymétrie moléculaire qu'il relie à la vie.

L'acide tartrique et la loi de l'isomorphisme

L'acide tartrique est un composé naturel qui nous vient du raisin (en latin, *racemus*). En 1818, Charles Kestner, un industriel alsacien qui produit de l'acide tartrique pour l'industrie textile, isole un nouveau composé lors de la purification de cet acide, purification qui comporte une étape de chauffage. Appelé acide thannique par son découvreur, il sera nommé acide racémique en 1828 par Joseph Louis Gay-Lussac, puis acide paratartrique par Jacob Berzelius en 1830. Ce dernier nom souligne qu'il est à la fois proche de l'acide tartrique — même composition chimique, même acidité, même solubilité — et différent : alors que les solutions d'acide tartrique dévient le plan de polarisation de la lumière (en l'occurrence, vers la droite, elles sont dextrogyres), celles d'acide paratartrique n'ont pas d'effet. Cette différence intrigue les chimistes qui étudient les cristaux de ces deux substances. Eilhard Mitscherlich, chimiste et minéralogiste, professeur à l'université de Berlin, ne trouve, entre ceux de sels de tartrates et ceux de sels de paratartrates, aucune différence autre que leurs propriétés optiques [1]. C'est un paradoxe qui retient l'attention du jeune Louis Pasteur, alors qu'il est encore élève à l'École normale supérieure.

Pour comprendre ce qui a surpris Pasteur ici, il faut rappeler la loi de l'isomorphisme émise en 1821 par Mitscherlich, qui stipule que des substances qui cristallisent similairement (sous même forme cristalline) sont similaires en termes de composition chimique [2, 3]. Sous-jacente est l'idée que la forme macroscopique des cristaux est liée à celle des molécules constitutives. Jean-Baptiste Biot, professeur au Collège de France où il occupe la chaire de physique mathématique, étend ces observations à des substances organiques liquides (comme l'essence de térébenthine) ou mises en solution (comme le saccharose ou l'acide tartrique) : il rapporte que la dissolution de cristaux dissymétriques donne des solutions optiquement actives et celle de cristaux symétriques des solutions inactives. Dans le cas du quartz, l'activité optique est une propriété du cristal et de l'organisation des rhomboèdres, et le quartz dissous n'a plus d'activité rotatoire. En revanche, note Jean-Baptiste Biot, dans le cas des substances dissoutes ou liquides, elle est vraisemblablement liée à une propriété moléculaire.

L'acide paratartrique : un défi

Revenons aux acides tartrique et paratartrique : que deux substances identiques pour l'ensemble des propriétés physico-chimiques (sauf pour l'activité optique), puissent donner des cristaux de même morphologie rompt avec la loi de l'isomorphisme de Mitscherlich.

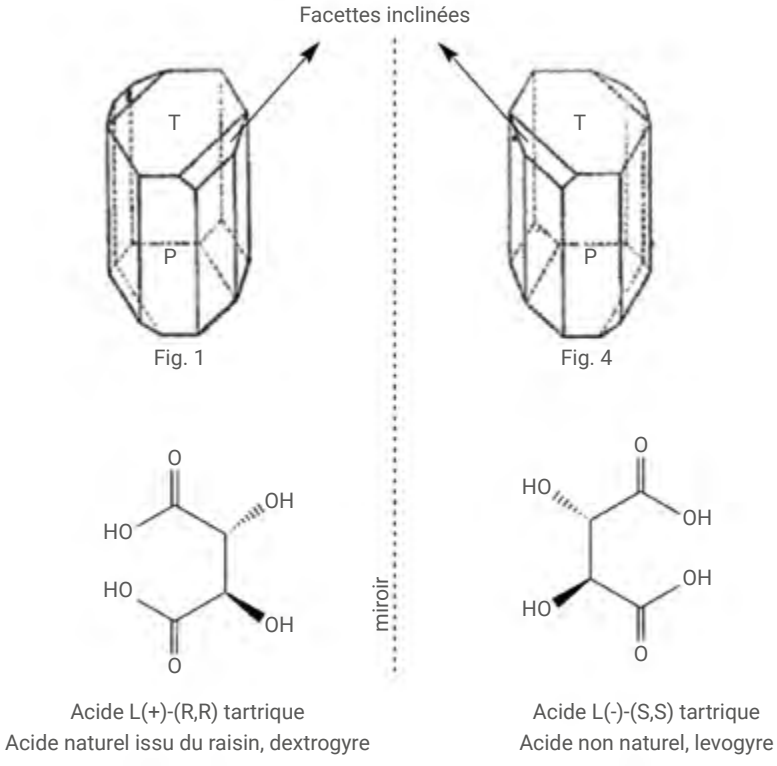
Pasteur s'attèle à l'étude de l'acide tartrique naturel qu'il cristallise : il constate que les cristaux sont dissymétriques. Il précise que cette dissymétrie est difficile à voir : « *M. Mitscherlich, [pense-t-il] aussitôt, se sera trompé sur un point. Il n'aura pas vu que son tartrate double était hémiédrique, que son paratartrate ne l'était pas, et si les choses sont telles, [ses]* résultats *[…] n'ont plus rien d'extraordinaire.* » [4]

Pour le vérifier, Pasteur cristallise donc l'acide paratartrique. Mais à sa grande surprise, ces cristaux présentent eux aussi une dissymétrie : ils sont hémièdres[(a)] (fig. 1). Il décrit un « *serrement de cœur* » [5] : il y a là un de ces petits grains de sable qui perturbent les rouages du savoir, mais qui, on le sait, sont, en recherche, parfois annonciateurs d'un grand basculement. Il continue donc à manipuler

© Institut Pasteur / Musée Pasteur, Paris.

Louis Pasteur dans son laboratoire de l'École normale supérieure à Paris. Dessin de A. Marie dans *L'Univers illustré* du 1er décembre 1885.

ces cristaux sous le microscope. Il lui vient « *l'idée heureuse de [les] orienter [...] et [il voit] que, dans cette masse confuse des cristaux de paratartrate, il y en [a] deux sortes* » [5]. Peut-être comme un puzzle s'assemble, ou comme, dans une image d'Escher, on passe du poisson à l'oiseau, il réalise qu'il y a sous ses yeux deux populations de cristaux, l'une comportant une série de facettes inclinées à droite et l'autre avec ces mêmes facettes inclinées à gauche (fig. 1). Il les sépare minutieusement puis les dissout séparément [6] : « *Je vis alors, avec non moins de surprise que de bonheur, que [les solutions] de cristaux hémièdres à droite déviaient à droite, que [celles de] cristaux hémièdres à gauche déviaient à gauche le plan de polarisation, et quand je prenais de chacune des deux sortes de cristaux un poids égal, la solution mixte était neutre pour la lumière par neutralisation des deux déviations individuelles égales et de sens opposés* » [4], tout comme l'était la solution d'acide paratartrique.



1. Acides tartriques énantiomères (figure inspirée de G. Vandomme et J. Crassous [12]).
En haut : dessins par Pasteur des cristaux d'acide tartrique naturel (à gauche) et de l'acide énantiomère (à droite), matérialisant l'une des paires de facettes inclinées au sein de ces deux hémièdres (figures issues de [6]).
En bas : représentation des molécules des acides tartriques énantiomères.
En pointillés : la matérialisation du miroir par lequel les cristaux et molécules sont image l'un de l'autre.

La chance et un esprit préparé

Pasteur vient de montrer que l'acide paratartrique est un composé qu'on appelle aujourd'hui « racémique », >>>

© Institut Pasteur / Musée Pasteur, Paris

Microscope, modèle de cristal et différents objets utilisés par Louis Pasteur lors de ses travaux sur la cristallographie entre 1845 et 1848.

>>>

c'est-à-dire le mélange équimolaire de deux molécules qui sont, comme leurs cristaux, image l'une de l'autre dans un miroir, l'une lévogyre (-) et l'autre dextrogyre (+) (ce sont des « énantiomères » [7], voir la figure 1, p. 33). Charles Kestner, par chauffage, avait provoqué une isomérisation de l'acide tartrique naturel dextrogyre (acide L(+)-tartrique)[(b)]. Les solutions d'acide paratartrique n'ont pas d'activité optique, car les effets des deux formes sur la lumière polarisée se compensent. Pasteur réalise ainsi, par cristallisation en un conglomérat[(c)], le premier dédoublement, c'est-à-dire la première séparation de deux énantiomères. Il faut noter que très peu de substances (moins de 5 à 10 % des composés organiques) conduisent à ce type de phénomène [8]. Dans le cas de l'acide paratartrique, la séparation en conglomérats se produit si l'on part d'une solution à moins de 28 °C [1]. On raconte que Pasteur aurait réalisé cette expérience décisive en février dans un laboratoire mal chauffé…

Pasteur insiste sur la difficulté de repérer ces petites faces. Et si sa pratique de jeunesse de la lithographie avait été un atout pour cette découverte ? La technique lithographique consiste à dessiner sur une pierre calcaire avec de la cire qui retiendra le colorant : on presse ensuite une feuille de papier pour produire un dessin imprimé qui est l'image en miroir du dessin fait sur la pierre. Dans une lettre à ses parents en 1841, Pasteur précise : « *J'ai bien pris soin en faisant [le portrait en lithographie] de le regarder souvent dans un miroir* » et ce, afin de voir s'il était bien ressemblant. Il avait donc l'habitude de projeter mentalement une image dans un miroir. J. Gal propose que cette pratique artistique l'a prédisposé à cette première grande découverte [9, 10].

(a) Hémiédrie : caractère de certains cristaux, qui possèdent seulement la moitié des faces qui devraient normalement être présentes d'après la symétrie du réseau cristallin périodique.

(b) Rappelons que les notations D ou L pour les configurations absolues sont dérivées des configurations des D et L-glycéraldéhides : elles ne présupposent en aucune façon les propriétés dextrogyre, qu'indique la notation (+), ou lévogyre (-). Prenons l'exemple des acides aminés L : si la L-phénylalanine et la L-tyrosine sont bien lévogyres (-), la plupart des acides aminés chiraux sont dextrogyres (par exemple, la L-(+)-méthionine).

Chiralité et applications

C'est un résultat majeur qui confirme l'idée initiale de Jean-Baptiste Biot : si le caractère dissymétrique se manifeste encore après la dissolution des cristaux, c'est qu'il est dû à une propriété moléculaire. Pasteur va donc parler de dissymétrie moléculaire. C'est celle d'un objet qui n'est pas superposable à son image dans un miroir, celle de la main : une main droite est image dans un miroir d'une main gauche, mais elles ne peuvent se superposer. On parle aujourd'hui de « chiralité », du grec χειρ [cheir] = main [7].

À l'issue de ces travaux, Pasteur poursuit l'étude des acides tartriques et met au point toutes les méthodes de dédoublement connues à ce jour. Il constate en particulier que certains micro-organismes consomment un seul des énantiomères, laissant l'autre intact, révélant que le vivant sait identifier cette dissymétrie et donc la forme moléculaire. C'est ce qui fait le lien entre ses travaux sur la dissymétrie moléculaire et la biologie.

Comme c'est le cas pour la plupart des découvertes de Pasteur, celle de la dissymétrie moléculaire a eu des implications pratiques importantes. Beaucoup de médicaments sont des petites molécules qui interagissent avec une cible, souvent protéique, par une reconnaissance tridimensionnelle, et le plus souvent un seul des énantiomères d'une paire est actif.

Même si Pasteur est plus connu pour ses travaux en biologie, sa contribution en chimie est donc tout autant essentielle. Pasteur confiait à ses proches à la fin de sa vie que cette découverte de la dissymétrie des produits naturels lui tenait à cœur plus qu'aucune autre [11]. Il avait sans doute perçu les promesses de développements scientifique et pratique qu'elle allait inaugurer, et son petit-fils Louis Pasteur Vallery-Radot rapporte ses propos : « *Ah, que n'ai-je une nouvelle existence devant moi ! Avec quelle joie je reprendrais ces études sur les cristaux !* ». ▮

(c) Un conglomérat est un mélange mécanique de deux cristaux énantiomères, chaque cristal contenant un seul des deux énantiomères.

1• A.J. Ihde, *The development of modern chemistry*, Dover Science Book, Toronto (1984).

2• E. Mitscherlich, *Ann. chim. phys.* **14** (1820) 172-190.

3• E. Mitscherlich, *Ann. chim. phys.* **19** (1821) 350-419.

4• L. Pasteur, dans *Leçons de chimie professées en 1860 par MM. Pasteur, Cahours, Wurtz, Berthelot, Sainte-Claire Deville, Barral et Dumas*, édité par la Société Chimique de Paris, Hachette (1861).

5• L. Pasteur, Conférence à la Société Chimique de Paris, 22 décembre 1883.

6• L. Pasteur, *Ann. chim. phys.* **28** (1850) 56-99.

7• A. Zehnacker et P. Roubin, ce numéro, pp. 5-9.

8• J. Jacques et A. Collet, *Enantiomers, Racemates, and Resolution*, Krieger Pub Co (1994).

9• J. Gal, *Nature Chemistry*, (2017) 604-605.

10• J. Gal, « Pasteur et les Beaux-Arts », dans *Louis Pasteur, le visionnaire*, Éditions de la Martinière (2017), pp. 134-147.

11• L.P. Vallery-Radot, dans *Œuvres de Pasteur, réunies par Pasteur Vallery-Radot*, Masson et Cie, Paris (1922).

12• G. Vantomme et J. Crassous, *Chirality* **33** (2021) 597-601.

69ème congrès national

des professeurs de physique et de chimie

Union des Professeurs de Physique et de Chimie

udppc

Lille

2 - 5 novembre 2022

SCIENCE EN NORD

ACADÉMIE DE LILLE
Liberté
Égalité
Fraternité

Faculté des Sciences et Technologies
Département Chimie
Département Physique

Université de Lille

https//udppc-lille2022.sciencesconf.org

Université de Lille

LILLIAD
Learning Center
Innovation

HOBIT

Un concept innovant pour la transformation des pratiques pédagogiques en physique

Bruno Bousquet[1] (bruno.bousquet@u-bordeaux.fr), **Lionel Canioni**[2], **Jean-Paul Guillet**[3], **Stéphanie Fleck**[4], **Erwan Normand**[1,4] et **Martin Hachet**[5]

(1) Département Mesures Physiques, IUT de Bordeaux, 33175 Gradignan

(2) Département de Physique, Université de Bordeaux, 33405 Talence

(3) Département Génie électrique et Informatique industrielle, IUT de Bordeaux, 33175 Gradignan

(4) Psychologie ergonomique et sociale pour l'expérience utilisateurs (PErSEUs), Université de Lorraine, 57045 Metz

(5) INRIA Bordeaux, 33405 Talence

La transformation des pratiques pédagogiques est devenue une nécessité pour faciliter l'accès au savoir d'étudiants qui ont du mal à comprendre les concepts abstraits ainsi que les modèles physiques et les outils mathématiques sous-jacents.

Dans ce contexte, nous avons conçu, développé et évalué le dispositif HOBIT, destiné à soutenir l'apprentissage des connaissances fondamentales et des compétences techniques dans le domaine de l'optique, grâce au couplage d'une simulation numérique et d'une manipulation d'objets physiques dans un environnement hybride de réalité augmentée tangible.

Nous présentons ici notre démarche de conception et la manière dont HOBIT, dont le concept pourrait être étendu à d'autres disciplines de la physique, a d'ores et déjà modifié nos pratiques pédagogiques.

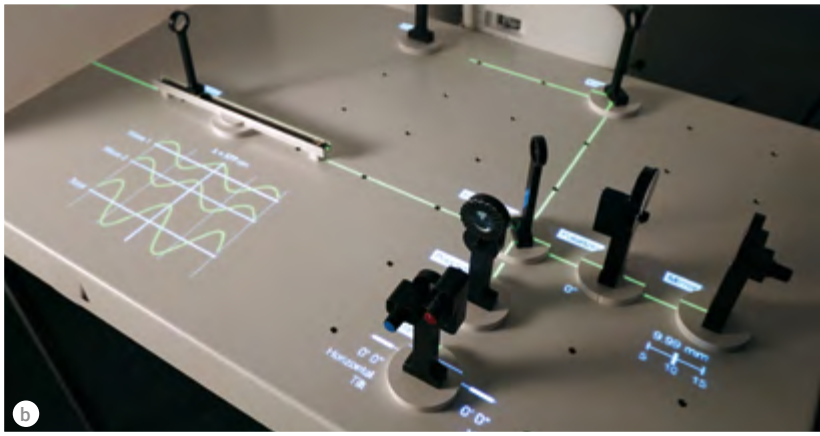
Les raisons du développement et les objectifs de HOBIT

Et si nous parlions un peu de sciences et technologies dans l'enseignement supérieur ? Le constat que l'on fait aujourd'hui dans les universités au niveau international est que les étudiants rencontrent de multiples difficultés pour progresser dans leurs apprentissages. D'un côté ils sont quotidiennement confrontés à un monde très technologique et, d'un autre côté, ils ont souvent du mal à comprendre et manier certains concepts abstraits, ou encore à utiliser les outils mathématiques qui constituent les briques élémentaires des différents modèles physiques.

Les difficultés se nichent autant dans les représentations des phénomènes, que ce soit dans un plan (2D) ou dans l'espace (3D), que dans la description et la manipulation de certaines grandeurs physiques qui ne sont pas directement observables comme le vecteur champ électrique, ou encore dans l'appropriation de certaines notions fondamentales comme la phase d'une onde.

Finalement, le lien entre les observations et les modèles physiques associés est devenu extrêmement difficile à établir pour une partie croissante des étudiants. Et même si l'optique, qui permet de « voir » les manifestations d'un grand nombre de notions générales de physique, joue, pour cette raison, un rôle essentiel dans les parcours de formation scientifique, il reste malgré tout très difficile pour les étudiants de s'approprier certaines notions abstraites comme les interférences ou encore la polarisation de la lumière, pour ne citer qu'elles.

a



b

1. Photos des différentes versions de HOBIT.
(a) Première version simulant un interféromètre de Michelson non reconfigurable.
(b) Dernière version permettant d'assembler librement des composants optiques grâce à un code numérique adaptatif.

Ce constat nous a conduits à concevoir dès 2013 un système innovant d'aide à l'apprentissage, que nous avons baptisé HOBIT et qui a fait l'objet d'un brevet en 2015 [1]. HOBIT est un acronyme anglais qui signifie *Hybrid optical bench for innovative teaching*. Il s'agit d'un dispositif technique qui mélange physique (réel) et numérique (virtuel), et qui permet de réaliser des expériences d'optique. Il repose sur des manipulations et réglages d'objets interconnectés, répliques factices des composants optiques classiques tels que des sources lumineuses, des miroirs, des lentilles ou encore des polariseurs, tandis que les phénomènes lumineux résultants sont affichés sur un écran.

Mais HOBIT permet aussi de disposer d'informations projetées aussi bien sur le plan de travail que sur l'écran d'observation, qui constituent une aide précieuse à l'apprentissage. Il s'agit d'une part de données relatives aux positions et réglages des composants optiques (par exemple l'angle d'inclinaison d'un miroir), et d'autre part des différentes modalités de représentation des grandeurs physiques (par exemple une représentation schématique de la différence de chemin optique sous forme d'égaliseur dans le cas d'interférences entre deux ondes issues d'une source polychromatique). Grâce à ces projections, HOBIT est un dispositif de réalité augmentée, et toutes ces « augmentations » sont mises à jour plusieurs fois par seconde afin de donner à l'utilisateur une impression de parfaite fluidité comme lorsqu'on joue à un jeu vidéo. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si c'est à partir d'un moteur de jeu vidéo (Unity3D) que le logiciel de HOBIT a été développé.

Les premières versions

La figure 1a illustre la première version développée entre 2013 et 2015. Il s'agissait d'un interféromètre de Michelson, qui ne disposait que de quatre points de réglage et de composants tous fixés à la table, tandis que le code numérique exploitait seulement deux formules mathématiques valables uniquement dans le plan d'observation de la figure d'interférences. Cependant, les aides pédagogiques sélectionnées pouvaient être activées de façon progressive à partir d'un pavé numérique, et l'enseignant pouvait par ailleurs décider de bloquer leur affichage momentanément selon ses choix pédagogiques. La version présentée sur la figure 1a a été exploitée à partir de 2015 à l'IUT de Bordeaux, d'abord à des fins d'évaluation pédagogique puis en usage routinier.

En 2018, nous avons développé une toute nouvelle version du dispositif, qui a donné lieu en 2019 à la version actuelle présentée sur la figure 1b. Il s'agit d'une table équipée de points de branchement reliés à un ordinateur, sur laquelle on peut désormais ajouter ou retirer n'importe quel composant optique. Au-delà de son réseau de capteurs communicants qui a nécessité de choisir les encodeurs et les protocoles de communication adaptés, cette nouvelle version s'appuie sur un code numérique totalement différent du précédent, qui permet de prendre en compte la propagation de la lumière depuis la source jusqu'à l'écran, en tenant compte des propriétés physiques relatives à la nature du rayonnement émis par la source et de toutes les interactions entre ce rayonnement et les composants optiques rencontrés au cours de sa propagation.

Depuis 2019, la dernière évolution de HOBIT a permis d'apporter de grandes améliorations en ce qui concerne l'ergonomie et d'étendre le panel des composants, notamment avec l'arrivée de montures en rotation, indispensables aux expériences concernant la polarisation. En 2020,

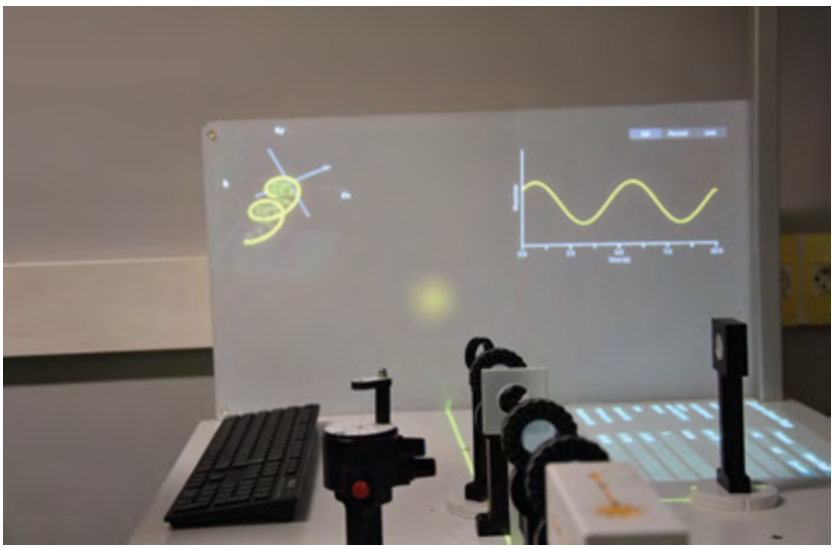
>>>

>>>
le code numérique a été enrichi afin de permettre de nombreux paramétrages, une automatisation des changements de réglage, la visualisation et l'enregistrement des valeurs mesurées à l'aide de différents capteurs et de nouvelles aides pédagogiques.

Les questions que nous nous sommes posées au cours de notre démarche de conception et de développement ont été nombreuses :

- Quel est l'intérêt de reproduire à l'aide d'un simulateur des expériences d'optique que l'on peut très bien faire avec du matériel classique ?
- L'utilisation de HOBIT permet-elle d'apprendre plus facilement ?
- Est-ce que HOBIT peut être qualifié de facile à utiliser, plaisant, stimulant ?
- Est-ce qu'on peut faire avec HOBIT plus de choses qu'avec un système classique et envisager grâce à lui une démarche de transformation des pratiques pédagogiques ?

Cette liste est loin d'être exhaustive, mais illustre bien l'état d'esprit dans lequel s'est trouvée notre équipe lors de la conception et du développement.



2. Photo montrant certaines représentations lorsque HOBIT est utilisé pour étudier la polarisation de la lumière. Sur l'écran vertical, on observe en haut à gauche l'état de polarisation qui peut être vu en deux dimensions, ou comme ici en trois dimensions. La courbe en haut à droite représente les variations d'intensité que l'on obtient en faisant tourner un polariseur pour analyser l'état de polarisation montré à gauche. Sur le plan horizontal, on devine une zone graphique dans laquelle il est possible de modifier les paramètres du composant sélectionné sur le montage.

Un simulateur versatile

Dans une étude [2], réalisée sur un panel de 101 étudiants à l'IUT de Bordeaux, nous avons montré que HOBIT ne présentait pas d'intérêt en tant que simple simulateur, mais que l'ajout de soutiens pédagogiques en réalité augmentée le rendait à la fois très apprécié par les étudiants et très efficace pour les apprentissages. La version utilisée pour cette étude était celle présentée sur la figure 1a, à savoir un interféromètre de Michelson. Elle a permis aux étudiants d'améliorer nettement leur compréhension des notions de phase, déphasage et battement de fréquences, tout en augmentant leur sentiment de confiance en soi et d'autonomie.

Si l'on prend comme autre exemple une expérience dédiée à l'étude de la polarisation de la lumière, HOBIT se distingue très nettement du dispositif classique par le fait qu'il permet de « voir » l'évolution du vecteur champ électrique au cours du temps à l'aide d'une représentation 3D animée (fig. 2). Ainsi, la notion de vecteur et celle de repère dans l'espace deviennent beaucoup plus faciles à appréhender, alors que le montage optique est pourtant strictement identique à celui d'une expérience classique. Cette utilisation spécifique de HOBIT a été très appréciée par les étudiants de l'IUT de Bordeaux. En 2020, nous avons conduit une évaluation destinée à étudier le transfert des compétences acquises sur HOBIT vers un dispositif classique et, en 2021, nous avons transformé nos pratiques pédagogiques en utilisant HOBIT d'abord comme une nouvelle ressource pédagogique de TP-cours, puis en le mettant en accès libre lors des séances de TP pour que chaque étudiant puisse effectuer des vérifications des montages classiques et des résultats à atteindre.

Nos différents travaux nous autorisent aujourd'hui à conclure que HOBIT permet non seulement de reproduire fidèlement les expériences classiques, mais aussi d'apporter un ensemble d'informations spécialement conçues pour aider à l'apprentissage. Le passage d'un montage à l'autre ne prend que quelques secondes, de même que le changement de source de lumière.

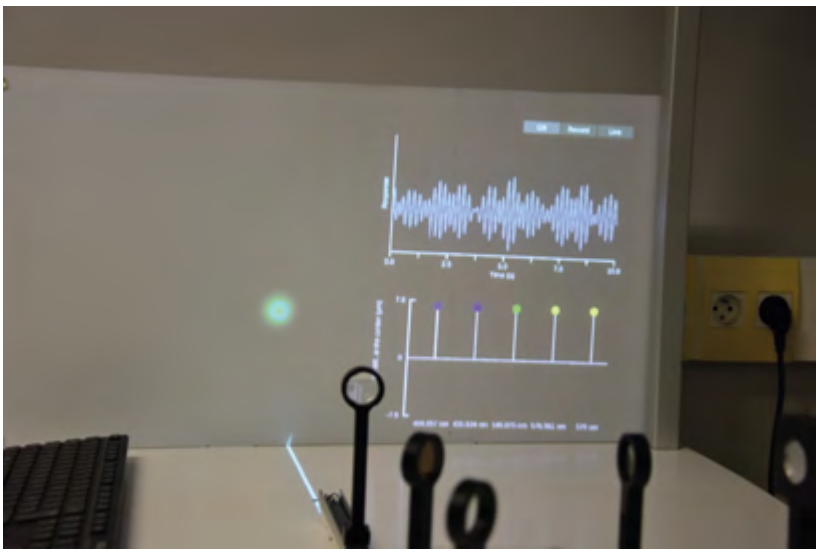
HOBIT permet par ailleurs de s'affranchir des problèmes de maintenance de matériel, de réglages de certaines expériences et de sécurité laser. L'enseignant peut alors consacrer beaucoup plus de temps à ses objectifs pédagogiques.

Par extension, HOBIT ouvre aussi la voie à de possibles séances de travail en autonomie, souvent difficiles à mettre en œuvre avec du matériel classique, pouvant présenter des risques. Dans ce contexte, des aides pédagogiques servant de pont entre des notions abstraites, des montages/réglages et des observations/mesures peuvent être déclenchées selon des scénarios prédéfinis par l'enseignant, afin de donner accès à une progression personnalisée. Ainsi, en agissant uniquement sur le choix des augmentations, un même montage optique peut convenir pour des niveaux d'études très différents, et chaque étudiant peut aussi suivre sa progression en auto-évaluation.

Repousser les limites

Le second intérêt d'utiliser HOBIT réside dans sa capacité à repousser les limites des systèmes pédagogiques classiques.

Si l'on considère une expérience d'optique de manière générale, on doit prendre en compte la source de



3. Photo montrant certaines représentations lorsque HOBIT est utilisé pour étudier les interférences à deux ondes. La courbe en haut à droite représente les variations d'intensité en fonction du temps au centre des anneaux d'interférences, mesurées par une photodiode de dimension négligeable placée dans le plan focal image d'une lentille convergente. Chaque disque coloré, représenté en bas à droite, indique la valeur de la différence de chemin optique entre les deux ondes, pour une longueur d'onde donnée. Les positions des disques évoluent lorsqu'on agit sur les paramètres du montage, et l'équaliseur permet de vérifier si l'interféromètre est bien compensé pour toutes les longueurs d'ondes.

lumière, les différents composants optiques et les supports mécaniques sur lesquels ils sont fixés, et enfin l'écran d'observation et le détecteur qui permet de réaliser des mesures. Dans un monde idéal, l'enseignant aimerait pouvoir changer de source de lumière, de composants optiques et mécaniques et de détecteur, afin de montrer l'influence de chacun d'entre eux sur le résultat final. HOBIT offre cette possibilité et permet donc de concevoir de toutes nouvelles séances de travail selon une progression pédagogique qui n'a encore jamais pu être envisagée.

Les possibilités sont infinies et nous n'en citerons ici que quelques-unes, comme celle de changer en quelques secondes les caractéristiques du rayonnement lumineux en passant d'une lampe blanche à une lampe spectrale ou encore à un laser. Il devient aussi possible de modifier les caractéristiques de n'importe quel composant optique tels que la réponse spectrale d'un filtre optique, l'épaisseur et l'indice de réfraction d'une lame, ou encore le pas d'un réseau de diffraction. Il en est de même pour les caractéristiques mécaniques des supports de composants optiques. Enfin, il devient possible de changer les caractéristiques d'un détecteur, afin d'explorer leur influence sur le signal mesuré. En utilisant HOBIT de cette manière, il ne s'agit plus de reproduire des expériences facilement accessibles avec du matériel classique, mais plutôt d'explorer des scénarios pédagogiques encore jamais explorés lors des séances de travaux pratiques.

De plus, HOBIT permet d'automatiser n'importe quelle série de mesures optiques. En effet, il devient possible de faire varier la valeur de chaque paramètre physique (angle, position, etc.) et d'enregistrer la valeur d'intensité mesurée à l'aide d'un détecteur. À titre d'exemple, l'automatisation de la translation d'un miroir dans un interféromètre de Michelson permet d'enregistrer un interférogramme et d'en déduire ensuite le spectre du rayonnement utilisé. Tandis que cette méthode, à l'origine de la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est relativement compliquée à mettre en œuvre avec du matériel classique, elle devient non seulement très facilement accessible avec HOBIT (fig. 3), mais en plus celui-ci permet d'étudier l'influence de tous les paramètres expérimentaux sur le signal mesuré. Sur le même principe, HOBIT permet d'enregistrer la variation d'intensité en fonction de l'angle de rotation d'un polariseur ou d'une lame retardatrice et de remonter ainsi à l'état de polarisation de la lumière (fig. 2).

Enfin, avec le contrôle automatisé d'un paramètre expérimental, on peut envisager de multiples extensions à HOBIT, en intégrant notamment des effets électro-optiques ou acousto-optiques, ou encore des contrôles en température pour la génération de seconde harmonique, parmi des centaines d'autres.

Conclusion

Ces exemples illustrent le fait que HOBIT offre la possibilité de compléter, voire supplanter, n'importe quel dispositif classique et ouvre de nouvelles potentialités pour transformer en profondeur nos approches pédagogiques. Un réseau pédagogique, qui compte quatre partenaires (IUT de Bordeaux, Université de Limoges, Institut d'Optique Graduate School et Université de Bordeaux), a vu le jour en 2021 dans le cadre d'un projet financé par la région Nouvelle-Aquitaine, dans le but d'explorer les transformations pédagogiques rendues possible par HOBIT à différents niveaux d'études et de mutualiser des retours d'expériences.

Bien que HOBIT ait été développé dans le cas particulier de l'enseignement de l'optique, son principe de base peut s'appliquer à d'autres disciplines de la physique. Sa transposition au domaine de l'acoustique a d'ores et déjà été envisagée.

Les développements successifs de HOBIT ont été réalisés grâce aux soutiens financiers de l'université de Bordeaux, de l'Inria, de l'IUT de Bordeaux et de son Fablab Coh@bit, et enfin de la SATT Aquitaine, entre 2014 et 2020. HOBIT est commercialisé depuis 2020 par Nova Physics.

1• https://cutt.ly/RKACkp9

2• David Furio *et al.*, "HOBIT: Hybrid Optical Bench for Innovative Teaching", CHI'17 - Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, May 2017, Denver, United States. 10.1145/3025453.3025789. hal-01455510

Bureau national 2022 de la SFP

Guy WORMSER
président

Daniel ROUAN
vice-président

Jean-Paul DURAUD
secrétaire général

Marc LEONETTI
trésorier

Henri MARIETTE
secrétaire délégué aux prix

Gabriel CHARDIN
secrétaire

Anne-Sophie CHAUCHAT
secrétaire

Marie GÉLÉOC
secrétaire

Yves SACQUIN
secrétaire

Conseil d'administration

Moulay-Badr ATTAIAA

Estelle BLANQUET

Mohamed Amine BOUSSEJRA

Joël CIBERT

Marie E. COUPRIE

Stéphane COUSSAN

Bérengère DUBRULLE

Lydie FERRIER

Hélène FISCHER

Agnès HENRI

Aurélie HOURLIER-FARGETTE

Sarah HOUVER

Dominique LANGEVIN

Arnaud LE PADELLEC

Dominique LESGUER

Dave LOLLMAN

Julien MASBOU

Alexandre MERLEN

Jérôme PACAUD

Arnaud RAOUX

Bart VAN TIGGELEN

Nouveau membre du bureau : Daniel Rouan, vice-président entrant

Daniel Rouan est né en 1950. Ancien élève de l'École normale supérieure, agrégé de physique, il soutient sa thèse d'état en 1981 et est recruté par le CNRS en 1982. Il est actuellement directeur de recherche émérite au CNRS dans le Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, situé à Meudon. Il a été élu en 2005 à l'Académie des sciences, au sein de laquelle il est membre du comité de l'enseignement des sciences.

L'activité scientifique de Daniel Rouan porte sur deux axes principaux : l'instrumentation et la recherche en astrophysique.

En instrumentation, il a joué un rôle majeur dans le développement de l'astronomie infrarouge, au sol et dans l'espace, et plus particulièrement dans celui de l'imagerie à haute résolution angulaire et à haut contraste (optique adaptative et coronographie) ; à titre d'exemple, il a été l'inventeur d'un dispositif de coronographe original à masque de phase quatre quadrants.

En astrophysique, il s'est consacré à la recherche des exoplanètes et à l'étude de la physique du milieu interstellaire et circumstellaire ; il est codécouvreur d'une trentaine de planètes extrasolaires, dont Corot-7b, la première planète rocheuse détectée, ainsi que d'une planète géante imagée directement autour de l'étoile Beta Pictoris.

Il a dirigé l'école doctorale Astronomie Astrophysique d'Île-de-France de 2008 à 2013 et a été membre du comité de rédaction de *Photoniques*, la revue de la Société Française d'Optique.

Préoccupé par la chute inquiétante du niveau en sciences des élèves français, chute qui s'accompagne d'un creusement jamais atteint des inégalités, il s'est fortement impliqué dans l'action en faveur d'un réveil et d'un renouvellement de l'enseignement des sciences à l'école primaire et au collège. Il a été président de la Fondation La Main à la Pâte de 2014 à juin 2022, et a participé à la rédaction du rapport conjoint des Académies des sciences et des technologies qui a été récemment présenté aux ministres concernés. En tant que vice-président de la SFP, il s'impliquera énergiquement dans cette action, avec évidemment une valence forte concernant la physique.

Compte rendu de la Journée de la division Champs et Particules du 31 mars 2022

La division Champs & Particules de la SFP a tenu sa dernière journée scientifique le 31 mars 2022 dans l'amphithéâtre Charpak du LPNHE, sur le campus Pierre et Marie Curie (Sorbonne Université – Jussieu).

L'objet de cette journée, intitulée « Expériences de précision, évènements rares, un chemin vers la nouvelle physique », était de passer en revue la recherche de *nouvelle physique* (expression convenue dans la communauté pour qualifier les écarts au-delà du Modèle Standard de la physique des particules) en complément des pistes explorées dans les expériences en cours auprès du LHC (*Large Hadron Collider*) au CERN. La journée a rassemblé une soixantaine de participants, qui ont débattu sur la base d'arguments essentiellement théoriques autour du point de vue dichotomique entre mesures de précision *versus* événements rares.

La première approche a été illustrée à travers deux thématiques : la mesure du moment magnétique anormal du muon et les mesures de précision avec des neutrons ultrafroids. Pour la seconde, les exposés se sont focalisés sur la recherche directe de matière noire avec des expériences d'astroparticules en laboratoires souterrains, la recherche de désintégrations extrêmement rares dans le secteur leptonique du Modèle Standard, comme la désintégration double bêta sans émission de neutrino et les transitions avec changement de la saveur leptonique (muonique vers électronique) ; des propositions de nouvelles expériences ont également été discutées pour veiller à la production de nouvelles particules à long temps de vie auprès des accélérateurs. Enfin, on a abordé l'important sujet des propriétés de l'antimatière et, en particulier, les expériences du CERN qui vont sonder la réponse de l'anti-hydrogène à la gravitation.

La conclusion de cette journée est que l'état d'avancement de ces recherches devrait atteindre son point critique dans les cinq prochaines années, avec une foison de nouveaux résultats qui permettront de tester le Modèle Standard avec des contraintes accrues.

Olympiades de Physique France

XXIX^{e} concours national

La finale de la XXIX^{e} édition du concours des Olympiades de Physique France s'est déroulée malgré les contraintes diverses liées aux mesures sanitaires, et tous se sont mobilisés pour sa réussite. L'Université Paris-Saclay a pu accueillir les 28 et 29 janvier 2022 les équipes sélectionnées, à l'invitation de la section Paris-Sud de la Société Française de Physique et de la section académique de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie.

1. La marraine, Sylvie Retailleau, présidente de l'Université Paris-Saclay.

Le fonctionnement des Olympiades de Physique France, créées à l'initiative de la Société Française de Physique et de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, est notamment assuré grâce à ses mécènes (https://odpf.org/nos-mecenes.html).

Le comité national des Olympiades de Physique France remercie le ministère de l'Éducation nationale, l'Université de Paris-Saclay, les laboratoires scientifiques qui ont préparé avec une grande efficacité ce concours et accueilli le jury, le comité national et toutes les équipes dans les meilleures conditions, ainsi que les mécènes et donateurs qui ont contribué au succès de la 29^{e} édition du concours. Sa reconnaissance s'adresse aussi à tous les acteurs bénévoles de cette réussite.

Les dates et modalités d'inscriptions pour le 30^{e} concours sont accessibles sur : https://odpf.org/le-calendrier.html

Palmarès

Le palmarès complet et la totalité des mémoires sont accessibles sur le site des Olympiades de Physique France, à l'adresse : **https://odpf.org/archives.html**

Cette finale nationale a rassemblé les vingt-trois équipes sélectionnées, dont une de l'étranger (Maroc), une de l'Outre-Mer (Mayotte) et vingt-et-une provenant de neuf académies de l'hexagone. Elle a été parrainée par Mme Sylvie Retailleau, physicienne, présidente de l'Université Paris-Saclay (fig. 1).

Les épreuves se sont tenues dans le nouveau bâtiment H-Bar de l'enseignement de la physique de l'Université Paris-Saclay, dans le respect des mesures de distanciation et ventilation indispensables liées à la pandémie.

Parmi les projets retenus pour la finale nationale, voici deux exemples de prestations de grande qualité couronnées d'un premier prix, pour le travail expérimental original et remarquable effectué par les équipes.

De la couronne à l'accolade

Ce projet a été présenté par une équipe féminine du lycée Édouard Branly à Boulogne-sur-Mer : Aurore Maréchal, Julietta Scheidler, Erynne Lefebvre, Candice Mailly, Clara Defrétin (fig. 2), encadrées par Olivier Buridant et Didier Soret.

Ces élèves sont parties d'un travail expérimental fait à la maison lors du deuxième confinement.

Le thème abordé en sciences de laboratoire cette année est l'eau. Pour cette équipe, ce sera plus particulièrement l'interaction de l'eau avec un support, en utilisant les moyens du bord : des pipettes improvisées à partir de stylos Bic, la fonction photo du smartphone, rapporteur et règle pour les mesures d'angle et l'eau du givre d'un congélateur pour l'eau distillée, en attendant de retrouver le matériel de laboratoire du lycée.

À partir de nombreuses expériences, cette équipe s'est interrogée sur l'évolution de la forme d'une goutte suivant son volume et le support utilisé ; elle a cherché à expliquer le profil d'une goutte qui gèle sur un support suffisamment froid et s'est enfin intéressée à l'évaporation d'une goutte d'eau salée.

2. Lycée Branly à Boulogne-sur-Mer : une belle équipe.

L'étude menée montre que le volume de la goutte, ainsi que la nature du support, influent sur l'angle de mouillage. Du chocolat au pétale d'une orchidée, en passant par le fard à paupière, la plaque de verre et le dentifrice, les supports les plus variés ont été utilisés pour classer les types de mouillage.

Allant toujours plus loin, les élèves ont cherché comment pouvait évoluer la forme d'une goutte d'eau de 5 µL sur des cristaux de sel qu'elles ont fabriqués elles-mêmes. Une petite caméra leur permet de suivre l'expérience : la goutte s'aplatit (dissolution du sel) pour montrer ensuite une sorte de bourrelet.

L'étape suivante s'impose : regarder l'évaporation d'une goutte d'eau salée pour expliquer le bourrelet. Le gradient de tension superficielle est directement lié à la concentration en sel dans la goutte et augmente du centre à la périphérie par un phénomène de transport (effet Marangoni). Et c'est bien une couronne de sel qui apparait sur le pourtour de la goutte, du fait de la saturation.

Enfin, l'étude se porte sur la forme d'une goutte d'eau de 50 µL sur une surface hydrophobe, parfaitement nettoyée et refroidie. En gelant, la forme de la goutte se transforme en arc d'accolade.

En utilisant des travaux déjà menés par d'autres équipes des précédentes Olympiades de Physique, en cherchant de l'aide auprès d'ingénieurs et de chercheurs de différentes universités en France et à l'étranger, en adaptant des codes de calcul à leurs expériences, ces élèves dynamiques et curieuses ont su faire preuve d'une vraie démarche de recherche.

3. Lycée Blomet, Paris 15e : dernière expérience pour convaincre le jury.

Énergie éco-Seebeck

Inès Deparis, Tobias Libreros, Pierre Quintart, Chloé Segond, Timothée Serin et Marie Valenciennes, du lycée Blomet, Paris, 15e, étaient encadrés par leur professeure Nadia Djebbar.

Ces élèves ont cherché comment récupérer de l'énergie thermique gaspillée — par exemple à l'ouverture d'un four — pour la transformer en énergie électrique en utilisant l'effet Seebeck.

Ils décident de fabriquer leur propre module Peltier à partir de thermocouples constitués de métaux sous forme filaire pour leur facilité d'utilisation et leur faible cout. Des fils de cuivre, nickel, fer, constantan (alliage cuivre-nickel) et nichrome vont permettre de réaliser dix thermocouples, dont il faudra tester les caractéristiques.

La source chaude est un banc Kofler à 200°C, la source froide est de l'eau liquide à 0,3°C. Pour une même différence de température, le couple constantan-cuivre l'emporte avec la tension la plus élevée (7,1 mV). Ce résultat expérimental est vérifié par un calcul délicat : le coefficient Seebeck du thermocouple dépend de la température.

Afin d'obtenir une plus grande tension, il faut mettre les thermocouples en série, mais la fragilité des jonctions amène à choisir des modules de dix thermocouples.

Les élèves étudient ensuite l'influence de la température, les facteurs de rendement, l'influence de la longueur des fils, de la longueur de la jonction, du type de soudure et de l'épaisseur des fils afin de construire le four le plus performant (fig. 3).

Finalement, vingt-quatre modules de dix thermocouples, flexibles, isolés entre eux, ainsi qu'une sonde de température sont collés à l'intérieur du four. Les mesures de tension et de température sont envoyées par deux microprocesseurs aux ordinateurs pour traitement par le logiciel Arduino. Les données seront visualisées sous forme de graphiques, grâce à l'utilisation de l'éditeur Python.

L'énergie électrique récupérée par le dispositif sera stockée dans des condensateurs : la tension délivrée est de 1,5 V.

Ces élèves, passionnés par leur projet, se sont interrogés sur l'amélioration de leur dispositif par l'utilisation de semi-conducteurs, et sur son utilisation pour remédier au gaspillage énergétique en transformant de l'énergie thermique inutilisée en énergie électrique. Un beau travail !

Grand Prix Jean Ricard 2021

Aleksandra Walczak

À la suite de sa formation initiale à Varsovie en Pologne, Aleksandra Walczak a effectué son doctorat en physique au Centre de physique biologique théorique de l'Université de Californie à San Diego de 2002 à 2007, puis un séjour postdoctoral de trois ans à l'Université de Princeton. Elle a été recrutée par le CNRS en 2010 au Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure de Paris. Elle y est directrice de recherche depuis 2016.

Après ses premiers travaux sur le repliement des protéines, Aleksandra Walczak a créé des directions de recherches originales, très fructueuses, dans le domaine de la biophysique théorique, permettant de comprendre des données biologiques complexes avec une approche de la physique statistique. Elle a produit des résultats majeurs sur l'étude des fluctuations dans les réseaux génétiques et les limites à la signalisation biologique qu'elles impliquent. Elle s'est aussi intéressée à la stabilité épigénétique, tout en apportant une contribution originale à l'étude de transitions quantiques exotiques dans la matière corrélée.

L'universalité des outils théoriques qu'elle maitrise lui a permis ensuite de contribuer avec brio à l'étude de questions variées. Ses résultats, reconnus par la communauté des biophysiciens, ciblent aussi bien les comportements collectifs des espèces animales (interactions locales et distribution des vitesses des oiseaux au sein d'un vol groupé) que la compréhension quantitative du système immunitaire (optimisation de la transmission d'informations avec un nombre limité de molécules-capteurs), et la structure de généalogie dans les populations à adaptation rapide.

Aleksandra Walczak a créé un groupe de recherche particulièrement productif et reconnu, attirant étudiants et collaborations, et obtenant des succès répétés aux appels des agences de moyens (ERC, ANR).

Le prix Jean Ricard de la SFP s'inscrit naturellement dans une suite impressionnante de prix (Grand Prix Jacques Herbrand 2014 de l'Académie des sciences, médaille de bronze 2016 du CNRS), témoignant de la nature et de l'ampleur exceptionnelles de son activité scientifique.

Grand Prix Émilie du Châtelet 2021

Philippe Dugourd

Ancien élève de l'École normale supérieure de Paris, où il a obtenu un DEA en physique quantique, Philippe Dugourd a effectué une thèse en physique moléculaire soutenue à Lyon en 1991. Il a ensuite passé une année (1995) à l'Université Northwestern (Illinois, USA). Il est actuellement directeur de recherche au CNRS et, depuis 2016, directeur de l'Institut Lumière Matière (iLM, CNRS/Université Lyon 1).

Philippe Dugourd a développé, avec son équipe, des approches expérimentales originales consacrées au départ aux agrégats atomiques. Au début des années 2000, ses recherches, combinant la spectrométrie de masse, les mesures de mobilité ionique et de spectroscopie optique au-delà des frontières traditionnelles, visent à comprendre la structure, la réactivité, la dynamique des agrégats atomiques puis moléculaires et également de protéines. Ces études ouvrent des applications en biochimie analytique, et permettent ainsi de caractériser des espèces moléculaires complexes, sélectionnées à la fois en masse et en isomère.

L'impact scientifique international de Philippe Dugourd témoigne de la valeur de ses innovations, à la pointe de l'état de l'art en physique moléculaire : collaborations internationales, direction de laboratoires internationaux associés (LIA) du CNRS avec l'Australie et la Croatie, conférences invitées, ERC Advanced Grant obtenue en 2012. En France, il a reçu en 2006 le prix Anatole et Suzanne Abragam de l'Académie des sciences pour ses résultats sur la polarisabilité et la mesure des dipôles électriques d'agrégats hétérogènes, ainsi que sur la détermination de la conformation des biomolécules isolées.

Sa politique de l'innovation et de la valorisation à la tête de l'Institut Lumière Matière, forte de partenariats industriels, soutenant la création de *start-ups*, a permis à l'iLM de recevoir en 2017 le trophée de l'innovation de l'Institut national de la propriété industrielle dans la catégorie recherche.

Philippe Dugourd est l'auteur de plus de 300 publications dans des revues internationales à comité de lecture et de cinq brevets. Il a encadré quinze doctorants, et est co-éditeur de l'ouvrage *Laser Photodissociation and Spectroscopy of Mass-separated Biomolecular Ions* (Springer, 2013).

Le jury des grands prix de la SFP est heureux de lui décerner le Grand Prix Émilie du Châtelet 2021.

Prix Paul Langevin 2021 (physique théorique)

Mariana Graña

Mariana Graña est née en 1973 à Buenos-Aires. Après ses études en Argentine, elle a effectué puis soutenu sa thèse en décembre 2002 à l'Université de Santa Barbara (Californie). Elle a été recrutée en 2005 par le CEA à l'Institut de physique théorique à Saclay.

Mariana Graña travaille dans le domaine de la théorie des cordes, qui se fixe pour objectif d'unifier les théories de la gravitation, de la mécanique quantique et le Modèle Standard de la physique des particules. Elle allie virtuosité mathématique sur les aspects formels, avec un effort en faveur des vérifications concrètes des prédictions obtenues. Un défi rencontré par ces approches tient dans la nécessité de « compactifier » la description originelle, dans un espace de dimension élevée (dix ou plus), pour rendre compte des propriétés de l'espace-temps à quatre dimensions tel que nous le connaissons. Elle a contribué d'une façon majeure à la *compactification* des théories des cordes.

Elle a, en particulier, identifié les contraintes pour obtenir une constante cosmologique positive dans ce contexte.

Autrice de contributions décisives (un article de revue dans *Physics Reports*), et qui ont eu un fort impact, organisatrice de plusieurs conférences internationales, Mariana Graña anime un groupe très actif et a su s'imposer comme leader incontestable de son domaine.

Prix Paul Langevin 2021 (physique théorique)

Cédric Deffayet

Cédric Deffayet a 49 ans. Entré à l'École normale supérieure, il choisit d'étudier la physique. En 2000, il soutient sa thèse à l'Université de Paris-Sud Orsay. Après un postdoctorat à l'Université de New-York, il est recruté par le CNRS en 2002. Il est actuellement directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris.

Le travail de Cédric Deffayet porte sur la cosmologie et les théories des champs relativistes. Ses résultats marquants concernent la cosmologie des univers « branes », l'étude des théories qui modifient la gravitation à longue distance, la gravité « massive », la généralisation de la relativité générale à des actions avec plusieurs dérivées. Ses contributions fondamentales ont eu un très fort impact et ont lancé toute une thématique, notamment autour de l'idée de modifications de l'interaction gravitationnelle à distances cosmologiques, en lien avec la question de l'énergie noire. Elles font désormais partie des fondements de la discipline, et sont reconnues comme tels.

Auteur d'une centaine d'articles dans des revues internationales à comité de lecture, il a obtenu la médaille de bronze du CNRS en 2007 et une ERC Starting Grant (2013-2018).

Chercheur exceptionnel et profond, Cédric Deffayet est très investi dans les activités de dissémination et d'enseignement. Depuis 2009, il est professeur chargé de cours à l'École polytechnique. Il a écrit plusieurs livres de science destinés à la jeunesse.

Prix Louis Ancel 2021 (physique de la matière condensée)

Benjamin Sacépé

Ancien élève de l'ESPCI, Benjamin Sacépé a soutenu en 2007 sa thèse à Grenoble sur le sujet de la spectroscopie tunnel dans les films minces proches de la transition supraconducteur-isolant. Après des stages postdoctoraux à l'Institut Weizmann (Israël) puis à l'Université de Genève, il a été recruté en 2011 par le CNRS à l'Institut Néel de Grenoble.

Benjamin Sacépé est à l'origine d'expériences uniques au monde et particulièrement ambitieuses et complexes, impliquant la combinaison de mesures de transport électronique avec des mesures locales de spectroscopie par effet tunnel. Physicien avec une compréhension très profonde de sa discipline, il se démarque par son ambition et sa capacité à aborder des questionnements aussi variés que centraux en physique de la matière condensée. Il s'est ainsi imposé comme un acteur majeur à l'international, tant en apportant un éclairage nouveau sur des questionnements de longue date autour de la transition isolant / supraconducteur qu'en contribuant à des problématiques émergentes dans les matériaux topologiques. La diversité de ses approches et des thématiques abordées témoigne d'une culture scientifique exceptionnelle.

Benjamin Sacépé est l'auteur d'un article de revue sur les mécanismes de destruction de la supraconductivité dans les matériaux de basse dimensionnalité, paru en 2020 dans *Nature Physics*.

L'attribution du prix Ancel 2021 récompense ainsi un physicien particulièrement créatif et un expérimentateur hors pair, aux approches originales et multifacettes en physique de la matière condensée.

Claude Manus (1927-2021)

Claude Manus, président de la SFP en 1983, nous a quittés le 25 décembre 2021.

Né à Paris, il obtient le diplôme d'ingénieur de l'École Polytechnique de l'Université de Lausanne, puis soutient en 1956 dans cette même université sa thèse intitulée « Spectrographe hertzien à haute résolution et relaxation nucléaire ».

Après une année à l'Institut Battelle de Genève, il est recruté en 1958 par le CEA dans le Service de Physique Appliquée à Saclay. Il y consacre ses premières années à des recherches sur les plasmas : étude de la diffusion anormale dans un plasma perpendiculairement au champ magnétique, et des oscillations dans les plasmas faiblement ionisés.

Puis, en 1965, il se lance avec Gérard Mainfray (prix Félix Robin 1987 de la SFP) dans une nouvelle aventure : la physique atomique et la physique des surfaces, s'efforçant d'établir des passerelles entre ces deux directions de recherche. Claude Manus et Gérard Mainfray démarrent une activité sur la physique atomique en champ laser continu. Ils s'équipent des premiers lasers au verre dopé au néodyme, fabriqués par la Compagnie Industrielle des Lasers (CILAS). Ces lasers de laboratoire délivrent une énergie par impulsion de l'ordre du joule en une dizaine de nanosecondes. C'est avec ce type de laser que cette équipe fera l'une des premières observations de l'ionisation multiphotonique d'un gaz, et des transitions multiphotoniques où l'atome absorbe simultanément plusieurs (jusqu'à 10) photons pour passer d'un niveau d'énergie à l'autre. Ces effets seront observés sur l'hydrogène et les atomes de gaz rares, puis sur les atomes d'alcalins et la molécule d'hydrogène, et enfin avec des lasers picoseconde de très haute intensité ($\sim 10^{15}$ W/cm^2). Dans les années 1980, Claude Manus montre, avec Anne L'Huillier et Gérard Mainfray, que ces processus peuvent conduire à des ions multiplement chargés (p. e. Xe^{4+}). À partir des années 1990, cette équipe étudie la génération d'harmoniques d'ordre élevé dans les gaz rares par irradiation laser.

Au sein de l'Institut de Recherche Fondamentale du CEA, dirigé par Jules Horowitz, Claude Manus devient chef du Service de Physique des Atomes et des Surfaces jusqu'en 1986, puis chef du Département de Physique Générale du CEA/Saclay de 1986 à 1990.

À la SFP, dont il assure la présidence en 1983, il consacre beaucoup d'énergie à relancer la commission « Formation et emploi », qui travaillera en étroite collaboration avec l'Association Bernard Gregory. Cette même année, du 19 au 23 septembre, le congrès général de Grenoble est une réussite : brillant dans le domaine des idées scientifiques, divers quant aux préoccupations des physiciens sur l'emploi des jeunes chercheurs, le transfert technologique, la popularisation de la science et l'édition scientifique. Claude Manus cosigne, avec Pierre-Gilles de Gennes et Philippe Nozières, une lettre ouverte au ministre de l'Éducation nationale, critiquant le nouveau projet de statut unique des enseignants qui était ressenti par la communauté des physiciens comme une atteinte à la recherche universitaire dans son ensemble.

Claude Bouchiat (1932-2021)

Le physicien théoricien Claude Bouchiat est décédé à Paris le 25 novembre 2021. Ancien élève de l'École polytechnique (X53), sa carrière scientifique a commencé avec une thèse préparée sous la direction de Louis Michel sur les effets de la violation de la parité dans la désintégration du muon, thèse qui a conduit à la formule de Bouchiat-Michel. Il a ensuite rejoint le laboratoire de physique théorique et des hautes énergies de l'université d'Orsay, tout juste créé par Maurice Lévy, où il a fondé avec Philippe Meyer un groupe de recherche très actif. En 1974, Bouchiat et Meyer ont créé le Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure (ENS) à Paris.

Les recherches de Claude Bouchiat couvrent un large domaine, même au-delà de la physique des particules. Avec Daniele Amati et Jean-Loup Gervais il a montré comment construire des diagrammes duaux satisfaisant aux contraintes d'unitarité, et comment étendre l'expression des anomalies dans la divergence du courant axial aux théories non-abéliennes. Bouchiat et ses collaborateurs ont aussi utilisé la théorie des champs sur le cône de lumière pour une meilleure compréhension du modèle des partons. Avec Philippe Meyer et Jean Iliopoulos, il a obtenu en 1972 la condition de compensation des anomalies dans le Modèle Standard de la physique des particules, montrant que la somme nulle des charges des quarks et des leptons est essentielle à sa cohérence.

Sa contribution la plus significative, faite en collaboration avec sa femme Marie-Anne, est sans doute leur calcul des effets de violation de la parité dus à l'échange d'un boson Z virtuel entre un électron et son noyau atomique. Ce travail a ouvert un nouveau domaine de recherche expérimentale, en particulier à l'ENS. D'autres contributions de Claude Bouchiat, en dehors de la physique des particules, concernent les propriétés d'élasticité des molécules d'ADN, et les phases géométriques associées à des topologies non triviales pour certains systèmes en physique atomique ou en physique du solide.

© C. Kuhn / CNRS Photothèque

Philippe Nozières (1932-2022)

La Société Française de Physique a la tristesse de faire part du décès de Philippe Nozières, survenu le 15 juin 2022. Personnalité marquante de la physique théorique de la matière condensée, il avait présidé la SFP en 1984.

Après ses études au lycée Janson-de-Sailly à Paris, Philippe Nozières intègre l'École normale supérieure en 1951 et obtient l'agrégation de sciences physiques en 1955. Puis il part aux États-Unis à l'Université de Princeton, où il travaille avec David Pines sur le problème des corrélations électroniques dans les solides, et obtient rapidement une réputation internationale. Il soutient sa thèse d'État en 1957 à l'Université de Paris sur le sujet de « L'effet de l'interaction de Coulomb sur les excitations élémentaires dans les solides ». Il y est ensuite nommé professeur et enseigne la physique statistique, en particulier au DEA de Physique des solides à Orsay.

Il s'établit en 1972 à l'Institut Laue-Langevin à Grenoble, au moment où démarrent les premières expériences de diffusion de neutrons. Il y dirige de 1976 jusqu'en 2000 le groupe de physique théorique, où il attire un grand nombre de postdoctorants et de visiteurs scientifiques de toutes nationalités. Il est en même temps professeur à l'Université scientifique et médicale de Grenoble.

Il entre à l'Académie des sciences en 1981, à l'American Academy of Arts and Sciences en 1992, et occupe la chaire de physique statistique du Collège de France de 1983 à 2001.

L'œuvre scientifique de Philippe Nozières est considérable. Elle a porté d'abord sur le problème à N-corps. Avec David Pines, il a développé une théorie complète des propriétés du gaz d'électrons en interaction dans les métaux.

Il s'est ensuite intéressé et a apporté des contributions importantes à de nombreux autres sujets. En 1969, avec Cyrano de Dominicis, il a obtenu une solution exacte du problème de l'absorption des rayons X dans les métaux. En 1980, avec André Blandin, il a donné une discussion complète du comportement des impuretés magnétiques dans un métal réel (effet Kondo à plusieurs canaux). Il a travaillé également sur l'effet tunnel inélastique, la condensation des excitons dans les semi-conducteurs, le mouvement brownien, les liquides quantiques (hélium 3 polarisé, superfluidité et supraconductivité), la transition métal-isolant, les phénomènes non linéaires et leur application à un modèle de dynamo terrestre, la croissance cristalline, le frottement solide…

Philippe Nozières a publié plusieurs ouvrages marquants, en particulier : *Le problème à N corps* (Dunod, 1963), *The Theory of quantum liquids* (avec D. Pines, W.A. Benjamin, 1965), *Thermodynamique statistique et mouvement brownien : une introduction* (Hermann, 2015).

Il a été lauréat de nombreux prix, en particulier du prix Holweck de la SFP et de l'Institute of Physics (1974), du prix Wolf de physique (1985) dont il fut le premier lauréat français, et de la médaille d'or du CNRS (1988).

En ce qui concerne la Société Française de Physique, Philippe Nozières avait des convictions fortes : *« [En physique] la tendance est à une spécialisation outrancière. Je crois qu'à terme cette évolution est mortelle. C'est la négation même du métier de chercheur, dont la curiosité et l'imagination doivent toujours être en éveil… Le premier rôle de la SFP est de lutter contre cette tendance. La SFP est le seul endroit où chaque physicien peut se situer dans un ensemble plus vaste… Ceci dit, dans l'ensemble, c'est aux sections locales de susciter et d'animer les débats. »* (Allocution de président entrant, 28 janvier 1984).

Enfin, Philippe Nozières s'est fortement impliqué dans le sujet des publications scientifiques. Président du Conseil d'administration des Éditions de Physique, il a joué un rôle clé dans la création en 1986 de la revue *Europhysics Letters*. Beaucoup plus tard, dans un courrier des lecteurs adressé en 2009 à *Reflets de la physique*, il a vigoureusement défendu la tentative avortée de vente d'EDP Sciences à Springer.

Bernard Bigot (1950-2022)

Nous avons également appris le décès, le 14 mai dernier, du chimiste et physicien Bernard Bigot, qui a été haut-commissaire puis administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique, et ensuite, depuis 2014, directeur général du projet international de réacteur de recherche civil à fusion nucléaire ITER, au Centre d'études nucléaires de Cadarache.

Un hommage lui sera rendu dans un prochain numéro de *Reflets de la physique*.

Index des articles publiés en 2021 dans *Reflets de la physique* (n°68 à n°70)

▸ Intitulé de l'article — Auteur, ***N° Reflets de la physique,*** page

Éditoriaux

▸ Allocution du président entrant, présentée à l'assemblée générale du 18 février 2021 — Wormser G., ***68***, p. 2.

▸ Rencontres avec les composantes de la Société Française de Physique — Wormser G., ***69***, p. 2.

▸ Des contacts très fructueux avec nos sociétés sœurs — Wormser G., ***70***, p. 2

Images de la physique

▸ Champ géomagnétique et dynamique du noyau terrestre — Gillet N., ***69***, p. 4.

▸ La supraconductivité à haute température dans les oxydes de cuivre : où en est-on ? — Sacuto A., Galais Y., Cazayous M., Houver S., ***70***, p. 4.

Avancées de la recherche

▸ Rôle des accélérateurs de particules dans la lutte contre le SARS-CoV-2 — Bayat S., Delerue N., ***68***, p. 4.

▸ Écoulement et capture d'aérosols dans les masques respiratoires — Duprat C., ***68***, p. 10.

▸ Recycler des masques chirurgicaux grâce aux accélérateurs de particules — Delerue N., ***68***, p. 15.

▸ Comment les bactéries explorent les surfaces — Peruani F., ***68***, p. 16.

▸ Le prix Nobel de physique 2020, ou la consécration des trous noirs — Deruelle N., Lasota J.-P., ***68***, p. 20.

▸ La stratégie européenne en physique des particules — Hamel de Monchenault G., Vacavant L., ***68***, p. 24.

▸ Dépistage de la Covid-19 : un nouveau modèle pour évaluer l'efficacité des tests groupés — (Brève), ***68***, p. 27.

▸ Une force de portance élastohydrodynamique en matière molle — Salez T., Saintyves B., Zhang Z., Bertin V., Maali A., ***69***, p. 10.

▸ Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques : un défi interdisciplinaire — Auffèves A., ***69***, p. 16.

▸ Du flou des images astronomiques à un prix Nobel de physique — Léna P., Perrin G., ***69***, p. 21.

▸ Miroirs temporels instantanés : une nouvelle approche du retournement temporel — Eddi A., Fort E., ***69***, p. 28.

▸ Le problème à N corps qui se cache derrière l'ordinateur quantique — Waintal X., ***70***, p. 18.

▸ Accélération de la recherche sur les technologies quantiques en France — (Brève), ***70***, p. 23.

▸ Missions du futur et nouveaux concepts en propulsion plasma — Garrigues L., Gaboriau F., Guglielmi A., Boeuf J.-P., ***70***, p. 24.

Physique et innovation

▸ Archiver les mégadonnées numériques à l'échelle moléculaire — Képès F., ***70***, p. 32.

Science et société

▸ Les Fab Labs et « ateliers numériques » en France — Piuzzi F., ***68***, p. 32.

▸ Starlink : dommages collatéraux de la flotte de satellites d'Elon Musk — Lehoucq R., Graner F., ***70***, p. 44.

Enseignement

▸ Yves Couder. De l'apprentissage par l'expérience et quand l'expérience guide la recherche — Thiria B., Courrech du Pont S., ***68***, p. 28.

▸ Comment des pédagogies alternatives peuvent aider à la réussite des étudiants de physique du 1er cycle universitaire — Demeyer R., Margueron J., ***69***, p. 34.

▸ L'Université Paris-Saclay, gagnante du French Physicists' Tournament 2021 — Périssé L., ***69***, p. 40.

▸ Olympiades de Physique France : XXVIIIe concours national — Le comité national des ODPF, ***70***, p. 52.

Culture scientifique

▸ Il faut plus de femmes scientifiques dans les médias ! Journée Sciences et Médias 2021 — Michaut C., ***70***, p. 38.

Prise de position de la SFP

▸ Renoncer à une formation scientifique minimale des enseignants du primaire : un mauvais coup porté à l'école, au pays et aux femmes — ***68***, p. 37.

Vie de la SFP

▸ L'assemblée générale du 18 février 2021 — ***68***, p. 38.

▸ *Reflets de la physique* : résultats de l'enquête de lectorat — Verguin M., ***68***, p. 48.

▸ Création de la division Physique Non Linéaire de la SFP — Falcon É., ***69***, p. 39.

▸ Sommaire des articles publiés dans *Reflets de la physique* en 2020 — ***69***, p. 48.

▸ La chaine YouTube de la Société Française de Physique — ***70***, p. 57.

Colloques, journées scientifiques

- Les prochaines Rencontres Physique-Entreprise-Recherche. Rapprocher l'industrie du monde académique ***69***, p. 41.
- Une soirée digitale consacrée au Temps Wormser G., ***69***, p. 42.

Portraits

- Patricia Bassereau, une biophysicienne passionnée Interview par S. Morin et V. Pierron-Bohnes, ***68***, p. 43.
- Jacques Friedel, homme des XX^{e} et XXI^{e} siècles Guyon É., ***69***, p. 43.
- Thierry Dauxois, nouveau directeur de l'Institut de physique du CNRS ***70***, p. 48.
- Jean Dalibard, lauréat de la médaille d'or 2021 du CNRS ***70***, p. 49.
- Jean-Michel Courty, lauréat de la médaille de la médiation scientifique du CNRS ***70***, p. 49.

Prix scientifiques

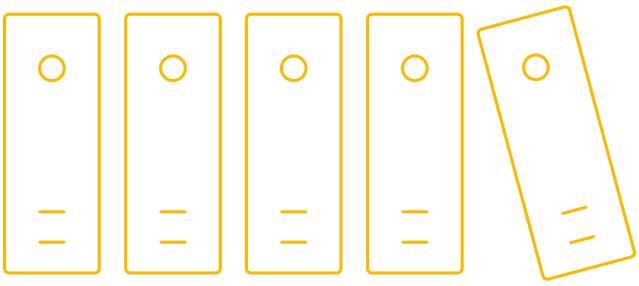
- Prix Friedel-Volterra 2019 (conjoint SIF-SFP) : Cristiano Ciuti ***68***, p. 40.
- Prix Charpak-Ritz 2019 (conjoint SSP-SFP) : Benoît Deveaud ***68***, p. 40.
- Prix Gentner-Kastler 2019 (conjoint DPG-SFP) : Christof Wetterich ***68***, p. 41.
- Prix Gentner-Kastler 2020 (conjoint DPG-SFP) : Lucia Reining ***68***, p. 41.
- Prix Thibaud 2020 de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon : Sarah Porteboeuf-Houssais, Cédric Lorcé et Guillaume Pignol ***68***, p. 42.
- Prix Jeune chercheur Saint-Gobain 2019 : William Legrand ***69***, p. 44.
- Prix Jeune chercheur Daniel Guinier 2019 : Claire Guépin ***69***, p. 44.
- Prix Jeune chercheur René Pellat 2019 (physique des plasmas) : Elmar Slikboer ***69***, p. 44.
- Prix Louis Ancel 2019 (matière condensée) : Étienne Brasselet et Denis Bartolo ***69***, p. 45.
- Prix Joliot-Curie 2019 (physique des particules) : Vincent Tisserand ***69***, p. 45.
- Prix Jean Ricard 2020 : Luc Blanchet ***70***, p. 50.
- Prix Émilie du Châtelet 2020 : Paul Loubeyre ***70***, p. 50.
- Prix Holweck 2020 (conjoint IoP-SFP) : Charles Adams ***70***, p. 51.
- Prix Charpak-Ritz 2020 (conjoint SSP-SFP) : Philip Werner ***70***, p. 51.

Biographies

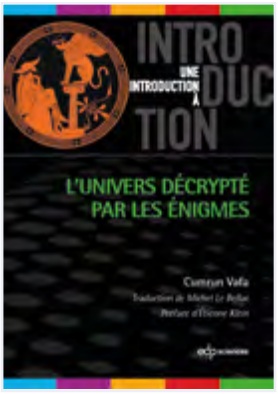
- Robert M. Pick (1932-2020) : un professeur inspirant très européen Dreyfus C., Bove L.E. et Polian A., ***68***, p. 46.
- Décès de notre chère collègue Christiane Vilain (1945-2020) Collin-Zahn S., le comité de rédaction de *Reflets de la physique*, et Moniez M. pour le comité de rédaction des *Images de la physique*, ***68***, p. 47.
- Marc Lefort (1922-2021) nous a quittés Bimbot R., Guerreau D. et Tamain B., ***69***, p. 46.
- Maurice Kléman (1934-2021) ***69***, p. 46.
- Ronald McCarroll (1934-2021) Les collègues de Ron de l'Observatoire de Paris-Meudon, de l'Université de Bordeaux et de Sorbonne Université, ***70***, p. 54.
- François Ducastelle (1943-2021) Didier Blavette et le Laboratoire d'Étude des Microstructures, ***70***, p. 55.
- Claudine Hermann (1945-2021) ***70***, p. 55.

Livres – Notes de lecture

- *La lumière révélée. De la lunette de Galilée à l'étrangeté quantique*, par S. Haroche Leduc M., ***68***, p. 50.
- *Mémoires*, par Y. Farge Guyon É., ***68***, p. 51.
- *Comment fait le gecko pour marcher au plafond ? À la découverte des nanostructures naturelles*, par S. Berthier Remy S., ***69***, p. 50.
- *Une histoire de flou – Miroirs, trous noirs et autres mondes*, par P. Léna Le Padellec A., ***69***, p. 51.
- *L'impératif de la sobriété numérique – L'enjeu des modes de vie*, par F. Flipo Lehoucq R., ***70***, p. 58.
- *Carnet de l'apprenti scientifique*, par N. Ostrowsky Leduc M., ***70***, p. 59.



L'Univers décrypté par les énigmes



Cumrun Vafa

Traduction de l'anglais par Michel Le Bellac – Préface d'Étienne Klein

EDP Sciences, collection Une introduction à...
(2021, 236 pages, broché : 25,00 €, e-book : 16,99 €)

Voici un livre singulier, étonnant, à nul autre pareil. Son auteur, professeur à Harvard, est l'un des plus grands physiciens-mathématiciens de notre temps. Les concepts actuels sur la gravitation quantique et la théorie des cordes, auxquels il a apporté des contributions majeures, sont si abstraits, si éloignés encore de toute prédiction vérifiable par l'expérience, que l'on pourrait donc craindre que ce livre ne soit accessible qu'à quelques lecteurs dotés d'un doctorat en physique théorique. Or l'auteur a bien choisi de s'adresser à tout esprit curieux qui s'interroge sur l'Univers. Mais ce n'est pas un livre de vulgarisation qui tenterait à travers des images simplificatrices, de faire comprendre des théories difficiles masquées souvent par un lourd appareil formel. Plutôt que de développer le formalisme difficile des théories contemporaines, il a choisi de les évoquer et de faire réfléchir ses lecteurs à travers une collection d'énigmes, c'est-à-dire de questions simples tirées de la logique, des mathématiques, de la physique, et en apparence éloignées du sujet.

C'est ainsi qu'il discute des symétries en remplissant les cases d'un échiquier avec des dominos, de la conservation de la charge électrique en examinant comment une corde, qui soutient un tableau en s'accrochant à deux pitons, pourrait encore faire son office si l'un des deux pitons cédait. Les lois de conservation sont illustrées par le mélange des contenus de deux pots de peinture de couleurs différentes. La brisure de symétrie, le boson de Higgs, la grande unification des forces de la nature, sont abordés en considérant la stratégie d'un canard qui veut sortir d'un étang sans se faire attraper par le renard. L'auteur choisit aussi des thèmes mathématiques, telle cette *corne de Gabriel* de volume fini qui ne peut être peinte qu'avec une quantité de peinture infinie, il illustre les paradoxes de l'infini en logeant un voyageur dans un hôtel dont toutes les chambres sont occupées. Il s'émerveille des relations entre physique et mathématique, par exemple en démontrant le théorème de Pythagore parce qu'un cristallisoir triangulaire rempli d'eau ne tourne pas sous l'effet des forces de pression. J'y ai appris que des savants du monde islamique, actifs autour de l'an 1000, s'étaient interrogés sur le fait qu'après le coucher du soleil l'horizon restait encore clair pendant quelques minutes. Ils avaient conclu à l'existence d'une couche au-dessus de nos têtes qui restait éclairée quelques minutes après que le soleil fut couché, et ils avaient déduit de cette observation une épaisseur de cette couche proche de celle que nous connaissons pour l'atmosphère. Admirable observation, et joli calcul, à une époque où nul ne savait que la Terre était entourée d'une enceinte gazeuse.

L'auteur parcourt ainsi beaucoup d'aspects de la physique moderne, relativité restreinte et générale, mécanique quantique et problèmes de la mesure, gravitation quantique. Tout est évoqué en mettant l'accent sur les idées plutôt que sur les calculs. Cumrun Vafa insiste sur l'importance contemporaine du concept de dualité qu'il a contribué à développer et à exporter de la physique aux mathématiques. Ce concept, qui a montré son utilité dans diverses branches de la physique contemporaine, bien qu'il soit le plus souvent conjecturé plus qu'établi, donne deux descriptions duales d'une même réalité. Dans l'une, les fluctuations quantiques sont faibles, dans l'autre au contraire elles sont très fortes ; les espaces-temps associés à ces deux descriptions sont différents dans leurs géométries et même dans leurs dimensions, alors qu'il s'agit bien de la même réalité. Cette idée a également fait son chemin dans les mathématiques pures d'aujourd'hui qui explorent des symétries-miroir géométriques insoupçonnées.

Comment lire ce livre ? Il faut d'abord souligner qu'il bénéficie d'un traducteur, Michel Le Bellac, qui est l'un de nos physiciens le mieux à même de suivre la ligne de l'auteur... et même parfois de la compléter par des notes pertinentes. La plupart des lecteurs se heurteront néanmoins de temps à autre à quelques développements mathématiques hors de leur portée. Mais le but de ce livre n'est pas d'être lu comme s'il s'agissait d'un traité scientifique. Il est d'abord un témoignage sur la façon dont un grand scientifique réfléchit sur l'Univers : si les sujets incompris sont certes multiples, ce n'est pas en résolvant des équations difficiles que les grandes idées prennent naissance. C'est ainsi que la relativité n'est pas née de calculs compliqués, mais de l'interrogation d'Einstein sur la vitesse de la lumière : vitesse par rapport à quel observateur ? Transposer des grandes interrogations en énigmes simplifiées, qui préservent l'essence de la question, a souvent été la source des plus grands progrès.

Ce livre illustre combien la science progresse par interrogations et non par dogmes ou postulats.

Édouard Brézin
Académie des sciences

Fragments de science

Corinne Labat et Carlos de Matos

EDP Sciences
Volumes 1 (84 pages) et 2 (82 pages) : mai 2022
Prix unitaire : 9,50 € (broché) ou 5,99 € (e-book)
Volume 3 : à paraitre en septembre 2022

Corinne Labat est docteure en sociologie, spécialiste du patrimoine. Carlos de Matos est docteur en physique et enseignant-chercheur. Tous deux sont affectés à l'Université Paul Sabatier (Toulouse), où Carlos de Matos est responsable de la collection des instruments anciens du département de physique.

Cette recension me donne l'occasion de vous parler d'une belle aventure éditoriale transdisciplinaire que j'ai suivie d'un peu plus près qu'ordinairement ; en effet, bien que je ne sois aucunement impliqué personnellement, mon établissement de rattachement en est à l'initiative. À la manière des cabinets de curiosité apparus à la Renaissance, transposition des *studiolo* italiennes et autres *wunderkammer* allemandes, l'idée est ici de raconter une histoire à partir de quatre disciplines (botanique, minéralogie, paléontologie, physique), ainsi que de présenter une notion scientifique. L'université Paul Sabatier n'est certes pas la seule à posséder des collections patrimoniales, mais les siennes sont clairement exceptionnelles par leur ampleur et qualité : en paléontologie (spécimens d'origines mondiale et régionale), en minéralogie (échantillons des Pyrénées et du sud du Massif Central avec une collection de 40 000 pièces initiée par Picot de Lapeyrouse dès la fin du XVIII^{e} siècle — une des toutes premières en France après celle du Muséum national d'Histoire naturelle à Paris), en botanique avec les fameux herbiers (pas loin de 400 000 planches dont l'Herbier des Pyrénées constitué en grande partie par le célèbre botaniste Henri Gaussen), ainsi qu'en physique (collection d'environ 500 instruments scientifiques anciens couvrant la mécanique, l'optique, l'acoustique…).

Cet établissement universitaire est en pointe sur la valorisation des collections scientifiques patrimoniales. Et quoi de mieux, en s'appuyant sur un important travail de documentation et mise en perspective, que de s'adresser au grand public (mais pas que !) avec une série d'ouvrages en format poche, et donc peu onéreux ?

Il s'agit donc d'expliciter des fragments d'aventures scientifiques, tout en renforçant notre mémoire collective. Très concrètement, chaque livre présente une séquence : plante, minéral, fossile, objet de physique, ainsi qu'un concept, le tout agrémenté de très belles photographies, planches et reproductions variées (quasi sans équations). En l'état actuel, ceci se retranscrit pour le premier ouvrage par *Drosera rotundifolia* (plante carnivore), *pyrite, Nautilus* (mollusque), *prisme de Newton, équation de d'Alembert ;* pour le deuxième par *Ulva lactuca* (algue), *malachite, Hyaenodon brachyrynchus* (animal à la fois chien et chat), *tuyaux sonores, loi de Planck* ; et pour le troisième (à paraitre) par *Isatis tinctoria* (pastel, normal pour Tolosa !), *quartz, Calamites suckowi* (fossile d'arbre), *anneau de S'Gravesande* (dilatation des matériaux), ainsi que le nombre π (Pi).

Une collection que je recommande vraiment, avec d'autres séquences à suivre !

Arnaud le Padellec
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse

Courrier des lecteurs

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt les deux excellents articles sur Ampère parus dans le numéro 72 de *Reflets de la Physique*.

Dans le second (Pierre Amouyal), p. 40, on trouve la phrase suivante : *« Les expériences d'Hippolyte Fizeau (1819-1896) en 1849 et de Léon Foucault (1819-1868) en 1862, en déterminant une vitesse de la lumière de l'ordre de 300 000 km/s dans l'air plus grande que dans l'eau, confirmeront l'hypothèse de Fresnel. »*

Je vous propose de publier le texte plus précis suivant :
« La vitesse de la lumière a été connue approximativement par la découverte en 1676 par Roemer et Cassini des retards ou avances des éclipses des satellites de Jupiter, puis la découverte de l'aberration par Bradley en 1728. Fizeau en 1849 puis Foucault en 1862 en ont fait les premières mesures directes, donnant respectivement 315 300 km/s et 298 000 km/s. Par ailleurs, Foucault puis Fizeau ont montré indépendamment en 1850 que la vitesse de la lumière est moins grande dans l'eau que dans l'air, confirmant ainsi définitivement l'hypothèse de Fresnel sur la nature ondulatoire de la lumière, contre celle de Newton. »

James Lequeux, Observatoire de Paris

30e OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE

Université LYON 1

Campus de la Doua - Villeurbanne

LYON

27–28 JANVIER 2023

EXPÉRIMENTER - ANALYSER - COMMUNIQUER

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS
Liberté Égalité Fraternité

Société Française de Physique

udppc

UNIVERSITÉ DE LYON

Lyon 1