



Dossier

Le nouveau Système international d'unités



Images de la physique
**La sonde atomique
tomographique**

Avancées de la recherche
**Écoulements granulaires
géophysiques**

Au sein et autour de la SFP
**Peut-on faire mieux
que le peer review ?**

La route difficile mais nécessaire vers la science ouverte

La science ouverte est à la une, mais de quoi s'agit-il ? L'ambition est l'ouverture mondiale, immédiate et gratuite des publications scientifiques, ainsi que des données et codes associés. L'enjeu est d'avoir les résultats de la science accessibles à tous les niveaux de la société et sur tous les continents, aussi bien pour les chercheurs d'autres disciplines que pour les entreprises afin de booster l'innovation. Hélas, et malgré l'arrivée d'Internet, nous en sommes encore loin, que ce soit pour les données scientifiques et plus encore pour les articles. La majorité de nos revues s'appuient encore sur le modèle économique de la souscription. Sans abonnement, pas d'accès aux articles, et impossible de s'abonner à tout, c'est simplement trop cher, même pour un pays comme la France. La science ouverte est devenue une priorité politique, en Europe via le Plan S [1], en France via le plan national lancé par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation il y a juste un an. La Société Française de Physique (SFP) soutient pleinement ces enjeux d'ouverture.

La communauté des physiciens et physiciennes a toujours été « ouverte » en ce qui concerne ses découvertes scientifiques, en déposant ses *preprints* dans les différentes archives ouvertes, telles que ArXiv et au niveau national HAL. À côté des archives, la SFP reconnaît le rôle des maisons d'édition, ayant elle-même fondé les Éditions de Physique (devenues EDP Sciences) il y a près d'un siècle. Les maisons d'édition organisent la relecture par les pairs (*peer review*), un travail professionnel qui n'est pas fourni par les archives ouvertes. Le *peer review* constitue une étape dans l'édition scientifique, étape que vous êtes une grande majorité à estimer indispensable, comme vous pouvez le lire dans ce numéro qui présente (p. 50) l'enquête de la SFP sur ce sujet, menée en 2018 pendant les Journées de la Matière Condensée.

La science ouverte est un défi majeur, qui requiert une nouvelle façon de penser le partage de nos avancées scientifiques. Il y a des barrières psychologiques et économiques. L'ouverture des données est perçue comme lourde et inutile par de nombreux chercheurs. Or, c'est eux qui, les premiers, profitent de ces données bien documentées. L'édition scientifique est devenue un *business* complexe, qui s'est profondément mondialisé avec l'implication de quelques maisons d'édition puissantes dont les actionnaires attendent des retours sur investissement. Il est donc plus que jamais nécessaire d'avoir une réflexion originale pour ouvrir la science, et une solidarité internationale qui rendent possible d'imposer cette ouverture aux grandes maisons d'édition.

Dans un communiqué de presse récent [2], la SFP s'est interrogée sur la lettre d'accord établie entre le consortium national Couperin et la multinationale Elsevier, couvrant presque un tiers de toutes les publications scientifiques en France. Cet accord s'appuie encore sur le modèle de souscription, et compte sur l'archive nationale HAL pour l'implémentation du libre accès. En Allemagne, universités et organismes de recherches, réunis dans le consortium DEAL, se mobilisent pour une nouvelle formule "*publish and read*". Certes, ce modèle n'est pas parfait non plus, mais il a le mérite d'esquisser un premier pas vers le libre accès pour tous. Pour l'instant, les négociations de DEAL avec Elsevier ont échoué.

La science ouverte constitue un enjeu important. La SFP est consciente qu'en France les différentes communautés ont des visions diverses sur l'évolution de l'édition scientifique. C'est une richesse et non un obstacle pour progresser. La croissance d'une « biblio-diversité » dans le paysage de l'édition scientifique est une condition *sine qua non* pour avancer ensemble, afin de créer demain un modèle durable adapté aux enjeux du 21^e siècle.

Bart van Tiggelen^(a) et Catherine Langlais^(b)

(a) Président de la Commission des publications de la SFP

(b) Présidente de la Société Française de Physique

[1] B. van Tiggelen *et al.*, *Reflets de la physique* **61** (2019) 48-51.

[2] www.sfpnet.fr/prise-de-position-de-la-sfp-sur-les-negociations-avec-elsevier



Crédits photographiques : LNE

Photos : balance de Kibble, résonateur sphérique et étalon de tension Josephson (voir le dossier, pp. 11-31).

Comité de rédaction

Président : Stefano PANEBIANCO

Membres : Michel BELAKHOVSKY - Nadia BOULOUPA -
Françoise BOURÉE - Jean-Marie BROM - David CÉBRON -
Françoise COMBES - Nicolas DELERUE - Titaina GIBERT -
François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN -
François JULIEN - Michèle LEDUC - Arnaud LEPADELLEC -
Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS -
Patricia PINEAU - Laurence RAMOS - Sophie REMY -
Pascale ROUBIN - Christiane VILAIN

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

Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

Réalisation graphique : Lætitia MORIN

laetitiamorin-graphiste.fr

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

Service publicité : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 2^e trimestre 2019

ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777

© SFP - Édité à 3500 exemplaires

Imprimerie Jouve

11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cedex 01

Tél. : 01 44 76 54 40

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

Reflète de la physique

Contact : reflète@sfpnet.fr

Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

Éditorial

- 2 **La route difficile mais nécessaire vers la science ouverte**
B. van Tiggelen et C. Langlais

Images de la physique

- 4 **La sonde atomique tomographique**
L. Rigutti, F. Vurpillot, W. Lefebvre et A. Vella

Le nouveau Système international d'unités

- 11 **Introduction**
- 12 **Le Système international d'unités redéfini**
L. Julien
- 17 **Le CODATA**
F. Nez
- 18 **La redéfinition du kilogramme et la balance de Kibble**
M. Thomas, P. Espel, D. Ziane, P. Pinot et F. Piquemal
- 22 **Mesurer une masse grâce à l'impulsion d'un photon**
P. Cladé et S. Guellati-Khélifa
- 25 **Les étalons électriques quantiques**
S. Djordjevic, W. Poirier, F. Schopfer et O. Thévenot
- 29 **Le kelvin révisé et la constante de Boltzmann**
L. Pitre et M. Sadli

Avancées de la recherche

- 32 **Les instabilités hydrodynamiques dans les écoulements granulaires géophysiques**
S. Viroulet, J. L. Baker, A. N. Edwards et J.M.N.T. Gray

Histoire des sciences

- 38 **E. K. Zavoïskii (1907-1976) et la découverte de la RPE**
A. Semerok, E. Soulié et N. E. Zavoïskaya

Au sein et autour de la SFP

- 44 **Actualités de la SFP**
- 46 **La nuit de l'antimatière**
G. Wormser
- 48 **Hommage à Yves Couder (1941 – 2019)**
P. Huerre
- 49 **Prix scientifiques**
- 50 **Peut-on faire mieux que le *peer review* ?**
M. Knoop, A. Henri, J. Dailliant et B. van Tiggelen

Reflète de la physique et ses lecteurs

- 54 **Tribune libre**
M. Leduc et F. Graner
- 56 **Index des articles parus en 2018**
- 58 **Notes de lecture**

La sonde atomique tomographique

Au-delà du microscope, un laboratoire multiphysique

Lorenzo Rigutti (lorenzo.rigutti@univ-rouen.fr), **François Vurpillot, Williams Lefebvre** et **Angela Vella**

Groupe de Physique des Matériaux (Université de Rouen Normandie, INSA de Rouen, CNRS), Avenue de l'Université, BP 12, 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray Cedex

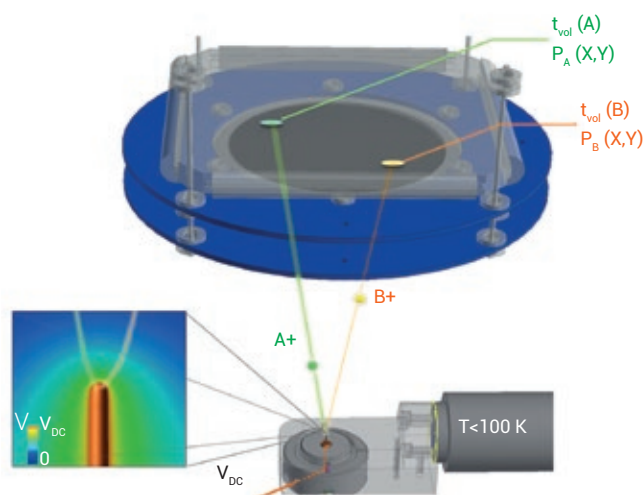
Au cours de la dernière décennie, la sonde atomique tomographique a élargi son domaine d'application, en partie grâce à de nouvelles approches qui l'associent à plusieurs techniques pour l'étude d'un même échantillon, permettant de lier propriétés structurales et fonctionnelles d'une variété croissante de systèmes.

Mais, au-delà de ses capacités d'imagerie et d'analyse, des développements récents montrent qu'elle peut également être considérée comme un laboratoire pour l'étude du comportement de la matière sous champ intense et de l'interaction rayonnement-matière aux échelles nanométrique et atomique.

La sonde atomique tomographique (SAT) est un instrument de microscopie et nano-analyse basé sur l'évaporation par effet de champ des atomes d'une pointe au sommet nanométrique (ou nanopointe). Cette technique (voir la figure 1 et l'encadré 1) a été développée pendant les années 1990 et appliquée alors à l'étude des métaux, l'évaporation étant contrôlée par des impulsions électriques. L'utilisation d'impulsions laser ultrarapides, introduite depuis 2005, a ouvert la technique à l'analyse de matériaux non métalliques. La SAT est actuellement en plein essor dans de nombreux domaines de la science des matériaux (métallurgie physique, étude des

oxydes...) et des nanosciences (vannes de *spin*, jonctions tunnel, hétérostructures...), où elle joue un rôle clé pour mieux appréhender les liens entre la microstructure et les propriétés physiques. Parallèlement, de multiples approches expérimentales ont été développées, d'un côté pour atteindre un niveau toujours plus avancé dans la corrélation entre les caractéristiques structurales et fonctionnelles des matériaux, de l'autre pour aboutir à une plus profonde compréhension des phénomènes d'interaction laser-matière-champ.

Dans cet article, nous allons parcourir ces développements qui font de cet instrument un véritable laboratoire multiphysique.



1. Principe de la sonde atomique tomographique. Soumis au potentiel V_{DC} , les ions A^+ et B^+ sont dirigés vers le détecteur, où leurs temps de vol t_{vol} et les positions de leurs impacts P_A et P_B sont mesurés.

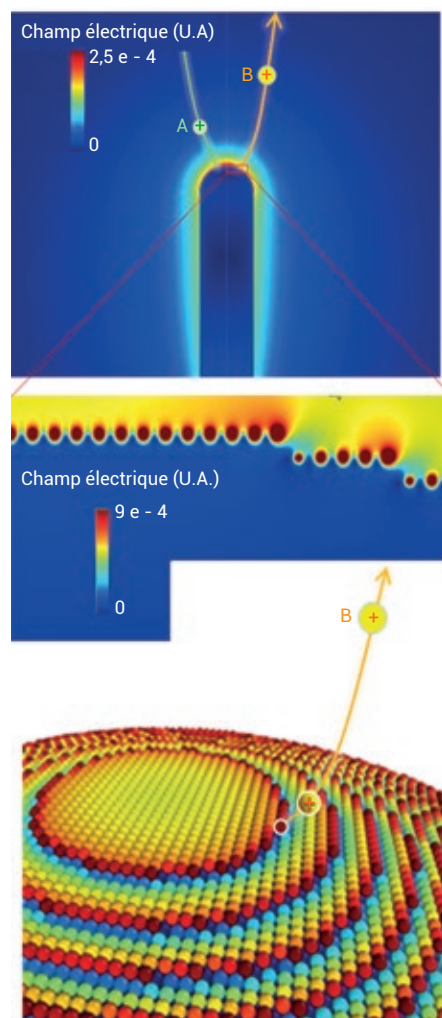
De l'émission par effet de champ à la sonde atomique tomographique

La sonde atomique tomographique (SAT) est un instrument unique de nano-analyse quantitative des matériaux (*Atom Probe Tomography* – APT désigne la méthode dans la littérature). Cet instrument, peu connu du grand public, permet de produire une image 3D de la répartition de la matière dans un petit élément de volume ($100 \times 100 \times 100 \text{ nm}^3$) et de mesurer de manière quantitative la composition chimique dans une petite zone arbitraire du volume analysé, avec une résolution spatiale proche des dimensions de l'atome.

Le matériau d'intérêt est préalablement préparé sous la forme d'une aiguille extrêmement fine, ou nanopointe, par procédé électrochimique voire, plus couramment, en utilisant un faisceau d'ions focalisés (*focused ion beam, FIB*). La zone à analyser est contenue dans l'apex de l'échantillon, dont le diamètre fait moins de 100 nm. L'analyse en sonde atomique tomographique repose sur l'érosion contrôlée atome par atome de l'échantillon : chaque atome est arraché de la surface, ionisé, puis projeté vers un détecteur d'ions capable de mesurer précisément le temps de vol t_{vol} de l'ion et la position $P(X,Y)$ de l'impact (fig. 1, p. 4). Après analyse, ces données sont utilisées pour reconstruire une image 3D du petit volume de matière.

Le principe physique fondamental mis en jeu est l'évaporation par effet de champ. Un potentiel V_{DC} positif de plusieurs kilovolts est appliqué à l'échantillon. Par effet de pointe, le champ électrique E ($E \sim V_{\text{DC}}/R$, avec R le rayon de courbure de l'apex) généré peut atteindre à son extrémité plusieurs dizaines de milliards de volts par mètre (entre 10 et 100 V/nm). L'échantillon est placé dans une chambre à vide poussé ($\sim 10^{-8} \text{ Pa}$) pour limiter les risques de claquage électrique. À l'extrémité de l'échantillon, les charges de surface qui génèrent le champ électrique extérieur sont concentrées sur les protubérances locales : les atomes en extrême surface (fig. E1). Pour un champ électrique critique, la force électrostatique considérable (quelques 10^{-9} N pour un atome unique) localisée sur ces atomes est suffisante pour briser la force d'adhésion qui lie un atome à ses voisins : l'atome s'évapore par effet de champ. Pendant ce processus, l'atome emporte une ou plusieurs charges positives avec lui, il est ionisé. L'ion généré va être projeté violemment sous l'effet du champ électrostatique régnant entre sa position d'origine sur l'échantillon et l'impact final sur le détecteur. L'échantillon est maintenu à une température cryogénique ($T < 100 \text{ K}$), ce qui limite les vibrations thermiques. Les trajectoires ioniques sont complètement déterministes et calculables. À partir des positions des impacts et de quelques hypothèses simples, les positions d'origine des atomes sont déterminées.

Les ions sont accélérés en suivant sensiblement les lignes de champ vers le détecteur. L'énergie acquise est de la forme $E_c = n e V_{\text{DC}}$ (n est l'état de charge de l'ion et e la charge de l'électron). Elle est de plusieurs keV. Le temps de vol des ions (t_{vol}) va nous renseigner sur leur nature chimique : on parle de



E1. Répartition du champ électrique à la surface de la pointe de l'échantillon. Les ions A et B, chargés positivement, sont éjectés sous l'effet de ce champ.

spectrométrie de masse à temps de vol. Le rapport masse sur charge (m/n) est déduit de l'équation de conservation de l'énergie, de la mesure du temps de vol t_{vol} et de la distance L (la longueur de vol) entre l'échantillon et l'impact sur le détecteur : $m/n = 2 e V_{\text{DC}} (t_{\text{vol}}^2/L^2)$. Notons que pour mesurer le temps de vol, il faut déclencher l'évaporation par effet de champ, afin de connaître le moment du départ de l'ion de la surface.

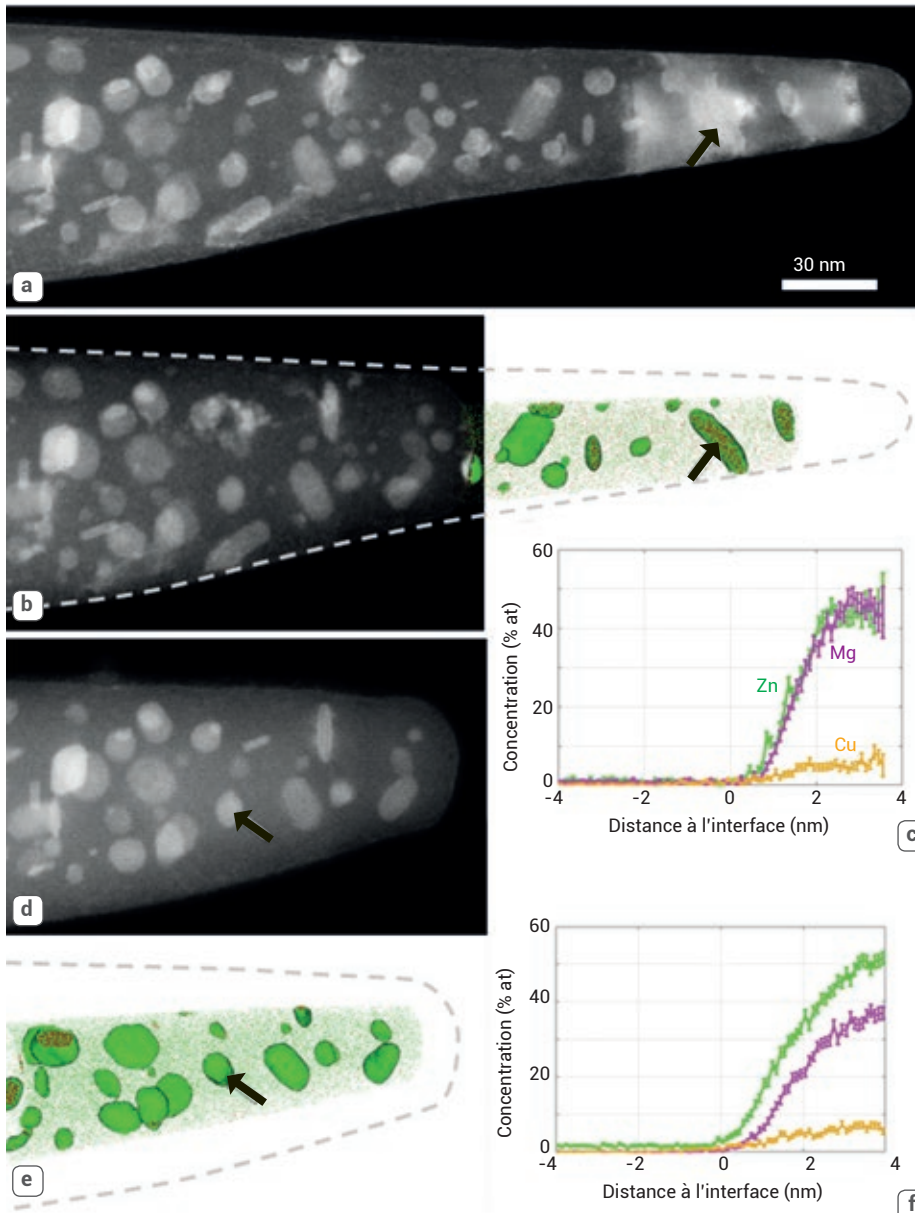
Ce déclenchement se fait de deux manières différentes. On peut soit augmenter brutalement l'intensité du champ électrique par l'application d'une impulsion de tension électrique (tension de quelques centaines de volts et de durée de l'ordre de la nanoseconde), soit augmenter brutalement la température de l'échantillon par une illumination laser (une impulsion laser de durée $< 10 \text{ ms}$ est focalisée à l'extrémité de l'échantillon et génère des impulsions thermiques de quelques centaines de kelvin de durée $\sim 1 \text{ ns}$ sur l'échantillon).

La microscopie corrélative

Un des développements récents concernant la sonde atomique tomographique est celui de la microscopie corrélative, consistant à analyser une même nanopointe par MET (microscopie électronique en transmission) ou STEM (microscopie électronique en transmission en mode balayage, *Scanning Transmission Electron Microscopy*) et ensuite par SAT. L'intérêt d'une approche de microscopie corrélative peut être justifié par différentes situations. Premièrement, il peut être pertinent de lier des informations précises sur la chimie locale d'un nano-objet (par SAT) avec sa structure cristalline (déterminée par MET/STEM). On peut également préciser la géométrie d'un échantillon par MET/STEM afin de disposer de données utiles aux reconstructions de SAT, ce qui est d'un grand intérêt pour l'analyse d'hétérostructures complexes. Une troisième possibilité, illustrée ici, est offerte par la microscopie *in situ*, qui rend possible l'étude de l'évolution, résolue en temps, d'un échantillon sous l'effet de sollicitations appliquées sous le faisceau électronique.

Considérons l'évolution d'une structure de précipitation dans un alliage d'aluminium de très haute résistance mécanique (alliage 7449, contenant 7,5 à 8,7 % de zinc, 1,8 à 2,7 % de magnésium et 1,4 à 2,1 % de cuivre, utilisé dans le domaine aéronautique), au cours d'un vieillissement thermique à 200°C. Dans le système Al-Zn-Mg(-Cu), la décomposition de la solution solide par traitement thermique génère la formation de précipités métastables durcissants, enrichis en éléments d'addition, dont la structure cristalline et la composition chimique évoluent à mesure que la décomposition avance. Si le traitement thermique est suffisamment long, il entraînera la précipitation de la phase d'équilibre ($MgZn_2$) dont résultera une chute des propriétés mécaniques de l'alliage. Un optimum est donc atteint pour une structure de précipitation fine, constituée de précipités métastables.

La figure 2 montre comment l'application d'un traitement thermique *in situ* dans le MET/STEM se traduit par une déstabilisation de la distribution des tailles des précipités de l'alliage étudié, les précipités les plus petits devenant sous-critiques. Cette information partielle sur l'évolution de la structure de précipitation est complétée par les analyses SAT menées avant et après



2. Analyse corrélative couplant vieillissement thermique *in situ* en STEM et analyses en sonde atomique tomographique. L'échantillon analysé est un alliage Al-Zn-Mg-Cu contenant des précipités métastables riches en Zn, Mg et Cu.

(a) Avant analyse en SAT, pointe observée en STEM dans un mode d'imagerie où les contrastes clairs sont associés à des zones enrichies en Zn, zones pour lesquelles le numéro atomique moyen est localement plus élevé.

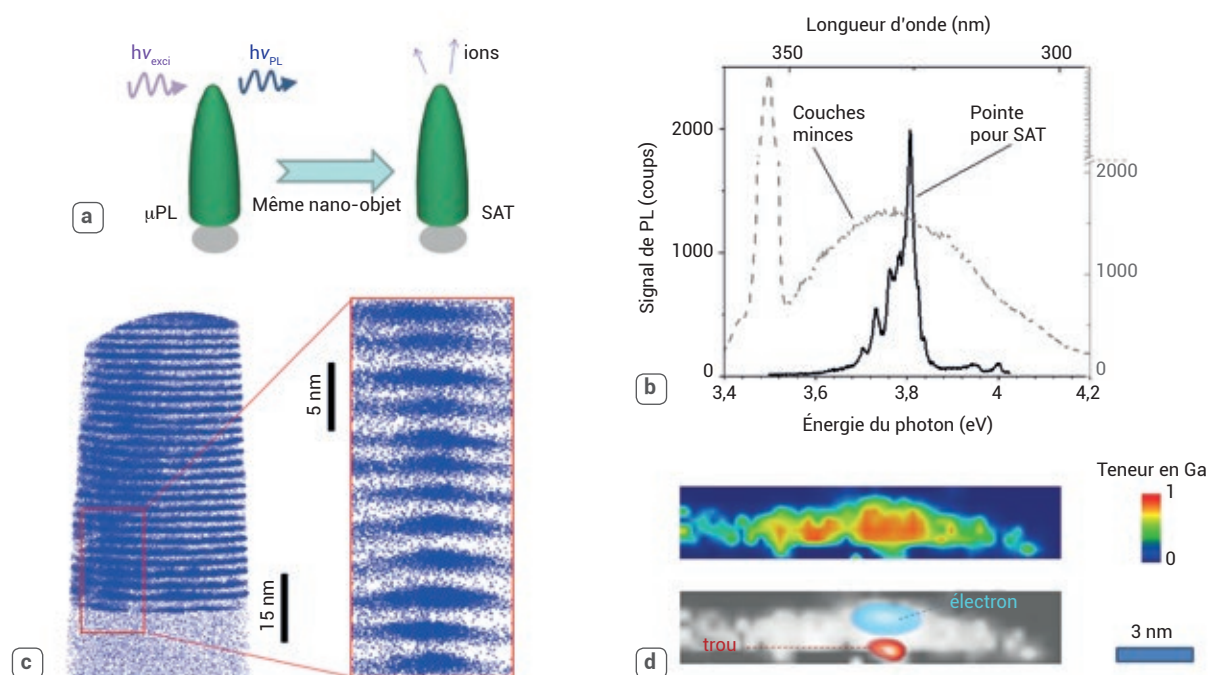
(b) Après analyse en SAT, montage combinant le même échantillon observé en STEM prolongé par la reconstruction SAT montrant la distribution des espèces Zn, Mg et Cu dans et à l'extérieur de précipités identifiés par des isosurfaces de concentration de 10% en Zn (vert).

(c) Profils de concentration au travers de l'interface du précipité indiqué par une flèche sur les figures (a) et (b).

(d) Même échantillon après vieillissement de 30 mn à 200°C *in situ* observé en STEM.

(e) Reconstitution par SAT de l'échantillon observé sur la figure (d). Les plus petits précipités de la figure (a) ne sont plus observés.

(f) Profils de concentration au travers de l'interface du précipité indiqué par une flèche sur les figures (d) et (e), montrant un enrichissement du précipité en zinc (courbe verte) et un appauvrissement en magnésium (courbe violette) par rapport à la figure (c).



3. Analyse d'une nanopointe semi-conductrice contenant des boîtes quantiques.

(a) Une nanopointe contenant des émetteurs quantiques est susceptible d'émettre un signal de photoluminescence ($h\nu_{PL}$) lorsqu'elle est éclairée par un laser ($h\nu_{exc}$). La même pointe peut ensuite être analysée en SAT.

(b) Spectre de microphotoluminescence d'une pointe contenant des boîtes quantiques de GaN dans de l'AlN, comparé au spectre d'un ensemble de boîtes sous la forme de couches minces.

(c) Reconstruction structurale de la pointe après analyse en SAT, où les positions des atomes de Ga (en bleu) permettent d'identifier les boîtes quantiques.

En (d), la carte de composition (image du haut) montre également la présence d'aspérités à l'interface inférieure d'une boîte. Dans l'image du bas, le calcul des états fondamentaux des électrons (en bleu) et des trous (en rouge) montre que ces derniers peuvent se localiser dans ces aspérités, avec une diminution de l'énergie de l'état de l'ordre de quelques dizaines de meV.

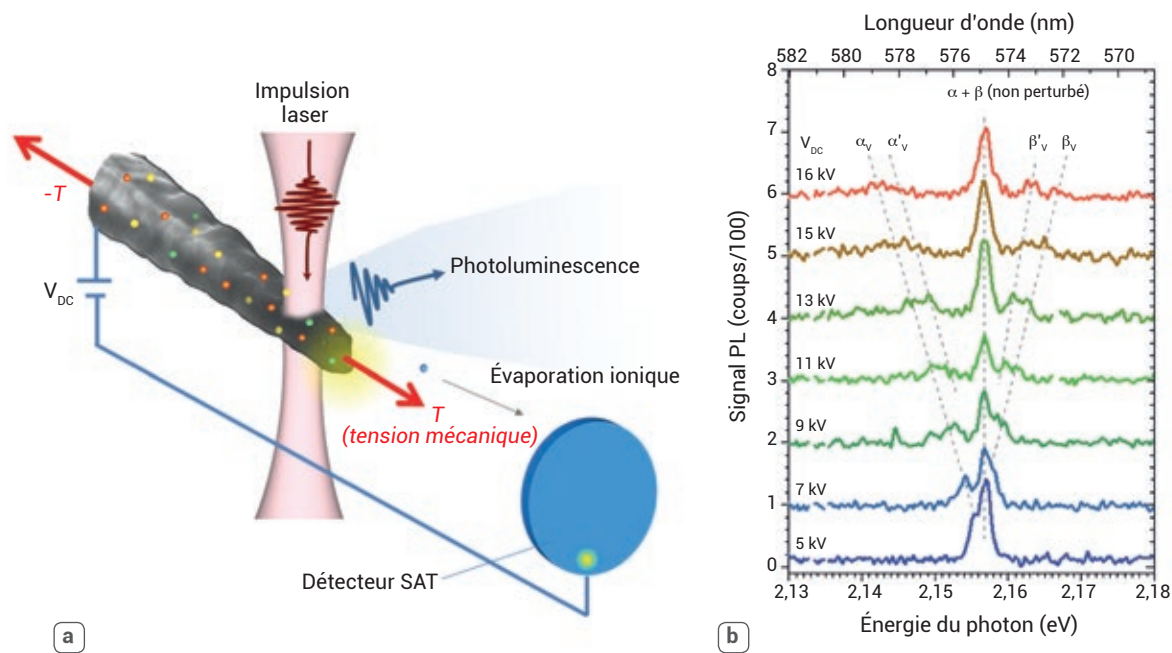
le recuit *in situ*. Ces dernières révèlent qu'en plus de la taille, la composition chimique des précipités évolue également. Ceux-ci s'enrichissent en effet en zinc, le magnésium étant partiellement relâché dans la matrice (fig. 2f), où la limite de solubilité de cet élément est plus élevée à 200°C qu'à 150°C. Cette expérience illustre par conséquent comment une approche par microscopie corrélative combinant MET/STEM et SAT peut permettre de suivre l'effet de sollicitation externe sur un même échantillon.

Des nanopointes luminescentes

La microscopie corrélative peut se mettre en place également en s'appuyant sur des techniques de spectroscopie optique. L'approche consiste ici à analyser un signal optique produit par une nanopointe, elle-

même étudiée successivement en MET/STEM et/ou en SAT, comme l'illustre la figure 3a. Nous avons récemment démontré qu'il est possible d'élaborer des nanopointes qui conservent la capacité de produire des transitions radiatives malgré l'endommagement surfacique produit par le faisceau d'ions focalisé. La condition pour que ces nano-objets émettent de la luminescence est que les états électroniques soient localisés à une distance suffisante de la surface latérale. Cette condition est satisfaite dans le cas des centres colorés, des boîtes quantiques, ou bien des puits quantiques où les porteurs se localisent dans des minima de potentiel locaux. Ces systèmes sont actuellement à l'étude dans le cadre de la sensorique (technique des capteurs), de la cryptographie quantique et de la technologie de l'information. On remarque que le spectre de microphotoluminescence (μ PL) issu d'une pointe nanométrique

(fig. 3b) est constitué de raies fines, émises par des boîtes quantiques uniques de nitrure de gallium (GaN) dans une matrice de nitrure d'aluminium (AlN), alors que le spectre issu de l'échantillon sous forme de couches minces est constitué d'une large bande moyennant une multitude d'émissions qu'on n'arrive pas à distinguer. L'information optique est donc mise en relation avec la reconstruction du volume analysé en SAT (fig. 3c, où l'on voit la distribution des atomes de gallium, ou fig. 3d, où l'on voit une carte de composition). L'analyse par SAT, qui peut être corrigée et complétée par des analyses par STEM ou MET, permet de définir les paramètres morphologiques des boîtes quantiques contenues dans le volume analysé. Ensuite, on calcule les énergies et les symétries des états électroniques confinés dans chaque boîte, comme dans l'exemple de la figure 3d, et on les corrèle avec le



4. Mesure par photoluminescence de la contrainte mécanique induite dans une pointe de diamant par une impulsion laser.

(a) Principe de la mesure de la photoluminescence *in situ* dans une SAT. L'impulsion laser excite simultanément l'évaporation ionique et l'émission lumineuse des émetteurs contenus dans une pointe (dans cette illustration, des centres colorés dans une nano-aiguille de diamant).

(b) La variation de la tension V_{DC} appliquée à la pointe provoque une tension mécanique T et la séparation des composantes spectrales α_V et β_V de la raie principale du centre coloré NV^0 . Le décalage spectral s'échelonne avec le carré de la tension appliquée, et rend possible la mesure de la contrainte qui perturbe l'émission du défaut. (Les raies α'_V et β'_V sont issues d'un deuxième centre coloré qui ressent une perturbation plus faible.)

spectre de μPL . Ici, nous avons déterminé l'importance des fluctuations des interfaces des boîtes quantiques. Ces fluctuations se traduisent en effet par des minima de potentiel locaux qui peuvent confiner les états des trous dans des régions de taille significativement plus faible que celle de la boîte elle-même, et avec une énergie inférieure (de quelques dizaines de meV) à celle qu'on attendrait en l'absence de ces fluctuations (absence assumée dans les modèles courants).

Vers une analyse simultanée d'ions et de photons

Ces résultats ont ouvert la possibilité d'exploiter l'impulsion laser qui déclenche l'évaporation ionique dans une SAT pour étudier la photoluminescence *in situ*, schématisée dans la figure 4a. Une première étude de μPL *in situ* a concerné la

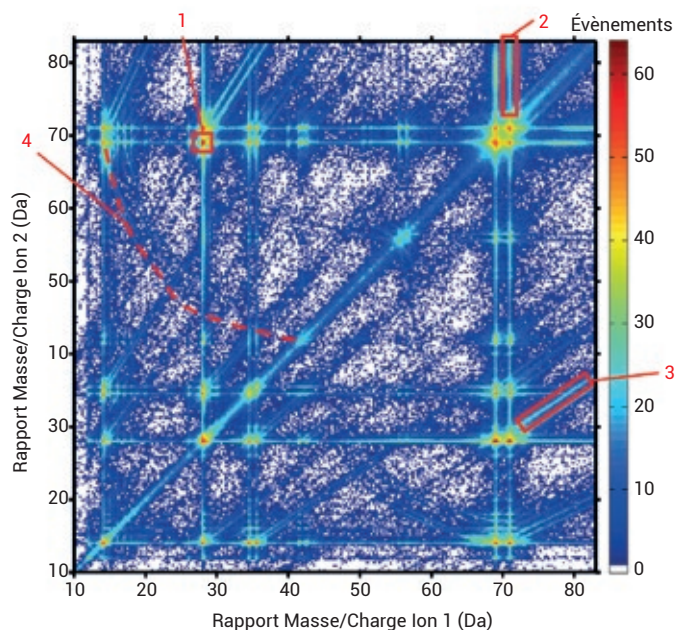
contrainte mécanique induite par le champ électrique. L'application d'une tension continue à une nanopointe génère un champ électrique de surface. Ce champ est écranté, comme expliqué dans la prochaine section, par une couche de charge surfacique. Il en résulte une force exercée par le champ sur l'échantillon. La tension mécanique et la contrainte s'échelonnent avec le carré du champ et du potentiel appliqués, de façon analogue à la force qui s'exerce sur les armatures d'un condensateur. La contrainte se transmet également vers la base de la pointe, et est approximativement égale à la tension mécanique totale exercée par le champ divisée par la section transversale de la pointe. La contrainte induite par le champ est un facteur limitant pour les analyses en SAT, car elle peut induire des fractures.

Mais, dans l'avenir, elle pourrait être exploitée pour manipuler des états électroniques. Récemment, nous avons étudié le décalage spectral des raies de photoluminescence de

centres colorés contenus dans des nanopointes de diamant. En particulier, nous avons analysé le complexe neutre (NV^0) constitué par une impureté d'azote (N) substitutionnelle et une lacune (V). Lors de l'analyse des nanopointes, le faisceau laser peut être placé sur le sommet de la pointe (on reconnaît cette position car c'est celle qui maximise l'évaporation ionique) ou bien en une autre position sur la pointe. La série de spectres acquis à des potentiels appliqués différents (fig. 4b) montre la séparation progressive de deux composantes, nommées α_V et β_V , dont le décalage spectral est proportionnel au carré du potentiel appliqué. Il est possible de remonter à la valeur de la contrainte à travers la relation contrainte-décalage spectral connue par la littérature. L'étude de ce décalage en fonction de la position de la tache laser d'excitation permet d'extrapoler les valeurs de la contrainte à l'apex même, qui sont proches du seuil de la relaxation plastique (~ 10 GPa).

L'évaporation moléculaire est un phénomène très fréquent pour les matériaux diélectriques. Dans les analyses de SAT, la dissociation des espèces moléculaires peut être étudiée à l'aide des diagrammes de corrélation, où l'on reporte dans un histogramme 2D les fréquences des événements de détection multiples issus de la même impulsion en fonction de leur rapport masse/charge. Un exemple de tel histogramme est reporté dans la figure E2. On y reconnaît quatre classes d'évènements : 1) les évaporations corrélées durant une impulsion (par exemple, la trace 1 sur la figure E2 représente l'évaporation corrélée d'un ion $^{69}\text{Ga}^+$ et d'une molécule ionisée N_2^+) ; 2) les évaporations corrélées où l'un des ions s'évapore sur l'impulsion, et l'autre durant le transitoire de relaxation thermique ; 3) les évaporations corrélées simultanées durant la relaxation thermique ; 4) les réactions de dissociation.

Un évènement de dissociation peut produire deux ou plusieurs fragments (molécules filles), susceptibles d'être détectés. L'ensemble de ces évènements produit une trace dans l'historgramme de corrélation. Dans l'exemple le plus simple d'une dissociation $\text{AB}^{2+} \rightarrow \text{A}^+ + \text{B}^+$: si la dissociation a lieu très près de la pointe, les fragments détectés A^+ et B^+ ont un rapport masse/charge proche de m_A et m_B , respectivement, tandis que si la dissociation a lieu loin de la pointe, les fragments détectés A^+ et B^+ ont tous les deux un rapport masse/charge proche de celui $m_{\text{AB}}/2$ de la molécule mère, au sein de laquelle ils ont été accélérés pendant une grande partie du vol. Pour les cas intermédiaires, les deux évènements ont un rapport masse/charge qui se trouve sur la courbe qui connecte le point (m_A, m_B) au point $(m_{\text{AB}}/2, m_{\text{AB}}/2)$. Pour la trace 4, $\text{A} = ^{69}\text{Ga}^+$ et $\text{B} = \text{N}^+$. Il est également possible de détecter les produits de réactions de dissociation plus complexes, impliquant la production de plus de deux fragments ou bien des fragments chargés et neutres. La SAT devient ainsi un « microscope de réaction », permettant d'estimer le temps de vie d'un ion moléculaire dans un champ, les canaux de dissociation, et l'énergie cinétique relâchée durant la réaction.



E2. Diagramme de corrélation 2D représentant le nombre de fragments évaporés d'une pointe de GaN contenant trois isotopes (^{14}N , ^{69}Ga et ^{71}Ga), issus d'une même impulsion, en fonction de leur rapport masse-sur-charge (exprimé en daltons). Remarquer que l'historgramme est symétrique par rapport à la diagonale.

dans certains matériaux (encadré 2). Ces résultats montrent notamment que les ions sont évaporés dans des états de plus haute énergie que l'état fondamental de la molécule ionisée.

Si le champ électrique intense améliore les propriétés d'absorption de surface des nanopointes, leur géométrie structure leur absorption en créant des points fortement absorbants et des points transparents tout au long de l'échantillon (fig. 5b). Ce façonnage de l'absorption a pu être mis en évidence en couplant les analyses de sonde atomique et de spectroscopie d'absorption de la lumière (spectroscopie modulée spatialement, SMS) sur le même échantillon. Le confinement de l'absorption sur des zones très localisées peut produire de forts échauffements au cœur de l'échantillon qui, dans le cas de la sonde atomique, sont néfastes (rupture de l'échantillon), mais qui peuvent être intéressants dans le cadre du façonnage en profondeur des matériaux semi-conducteurs par un faisceau laser.

Conclusion

Les derniers développements des études autour de la sonde atomique tomographique ont non seulement contribué à améliorer ses performances en microscopie et analyse chimique des systèmes à la nano-échelle, mais ont ouvert plusieurs lignes de recherche sur l'émission par effet de champ et l'interaction lumière-matière dans un champ électrique intense. Ce sont ces problématiques multiphysiques qui feront l'objet d'une attention particulière au cours des prochaines années. ■

En savoir plus

A. Menand, et D. Blavette, « Un voyage au cœur des matériaux à l'échelle atomique », *Reflets de la physique*, 4 (2007) 5-9.

D. Blavette, F. Vurpillot et B. Deconihout, « Sonde Atomique Tomographique SAT », *Techniques de l'Ingénieur*, P900-v2 (2013).

F. Vurpillot, W. Lefebvre et X. Sauvage, *Atom Probe Tomography: Put Theory Into Practice*, Academic Press (2016).

Vidéo : « Un instrument et des hommes, l'aventure de la sonde atomique à Rouen » http://videotheque.cnrs.fr/index.php?urlaction=doc&id_doc=4381

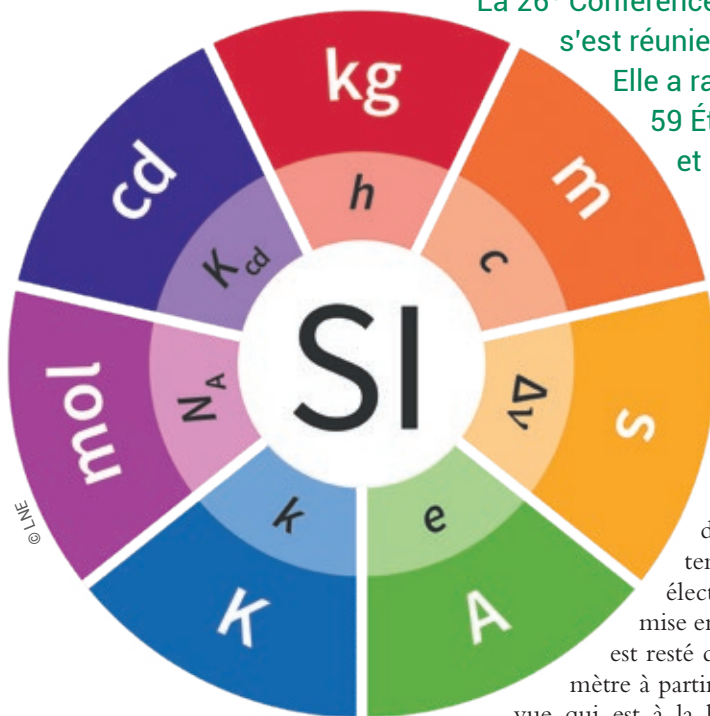
Dossier

Le nouveau Système international d'unités

Le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin redéfinis

La 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) s'est réunie à Versailles du 13 au 16 novembre 2018.

Elle a rassemblé les représentants de la plupart des 59 États membres du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et des 43 États associés.



Lors de sa séance publique solennelle du 16 novembre, la conférence a entériné la proposition faite par le Comité international des poids et mesures (CIPM) de redéfinir quatre des unités de base du système international (SI) : le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin [1]. Les nouvelles définitions de ces unités attribuent maintenant des valeurs numériques fixées à quatre constantes de la physique : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Le nouveau SI est entré en application le 20 mai 2019.

Il n'est pas besoin de rappeler l'intérêt de s'accorder sur la définition des unités afin d'avoir des références communes pour les mesures de temps, de masse, de longueur, de température, d'énergie, de tension électrique... La France depuis la Révolution a joué un tel rôle dans la mise en place d'un système international d'unités, le SI, que son acronyme est resté dans l'ordre de la langue française. Préfiguré par la redéfinition du mètre à partir de la seconde il y a trente-cinq ans, le renversement de point de vue qui est à la base de la redéfinition des quatre unités est radical. Les quatre constantes qu'il était un défi de mesurer le plus précisément possible ne le seront plus, et les expériences mises en œuvre pour leur détermination deviennent les outils de la réalisation des unités^(a).

Ce dossier s'ouvre par une présentation générale, dans laquelle Lucile Julien rappelle l'histoire de la mise en place du SI et la logique ayant porté la redéfinition de quatre de ses unités. En complément, François Nez présente le fonctionnement du Comité (international) de données pour la science et la technologie (CODATA). Suivent quatre articles décrivant des expériences françaises ayant contribué à la redéfinition des unités. Matthieu Thomas *et al.* illustrent le renversement de point de vue entre la mesure de la constante de Planck et la réalisation du kilogramme par une mesure de masse. Pierre Cladé et Saïda Guellati montrent comment l'effet de recul atomique permet une mesure ultra-précise de masse microscopique, puis comment sont articulées les mesures des masses microscopique et macroscopique sur des sphères de silicium. Sophie Djordjevic *et al.* expliquent comment la précision apportée par l'effet Josephson et l'effet Hall quantique a permis de réaliser de façon indépendante des étalons électriques qui sont maintenant intégrés dans le nouveau SI. Enfin, Laurent Pitre et Mohamed Sadli décrivent la mesure la plus précise de la constante de Boltzmann, effectuée par une méthode acoustique qui s'impose maintenant pour la mise en pratique de la nouvelle définition du kelvin.

Référence

1 • www.youtube.com/watch?v=gimwAPQbH0w&index=4&list=PL-vj-3_a7wTDeKEupZSX7Tw42yReNgJLI

(a) Pour les unités, le sens donné au mot « réalisation » diffère de l'usage courant. Par exemple, la réalisation du kilogramme est la façon concrète dont on traduit sa définition par un dispositif expérimental permettant d'effectuer une mesure de masse.

Le Système international d'unités redéfini

Lucile Julien (lucile.julien@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Le Système international d'unités (SI) est fondé sur sept unités de base qui sont le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd), respectivement unités de longueur, de masse, de temps, de courant électrique, de température, de quantité de matière et d'intensité lumineuse. Toutes les autres unités du SI sont des unités dérivées, qui se déduisent de ces unités de base.

Le choix et la définition des unités de base sont fixés par convention entre les États membres du BIPM. Ils font l'objet d'un accord écrit, qui s'accompagne ensuite de ce qu'on appelle des mises en pratique. La mise en pratique d'une définition est une série d'instructions, en général discutée par un comité consultatif avant d'être publiée par le BIPM, qui permet la réalisation concrète de cette définition, avec les meilleures qualités métrologiques possibles. Pour la dissémination des unités et l'étalement des appareils de mesure, on réalise des étalons : ce sont des artefacts matériels ou des dispositifs expérimentaux qui matérialisent l'unité d'une grandeur physique, avec une valeur connue et une exactitude qui peut être plus ou moins grande.

À l'occasion de la redéfinition de quatre d'entre elles, entrée en vigueur le 20 mai 2019, les sept unités de base du SI ont vu leur définition reformulée, comme nous allons le voir. Dans l'histoire des unités de mesures, ce n'est pas la première fois qu'une définition est modifiée, mais la refonte actuelle du SI est d'une ampleur particulièrement exceptionnelle. Nous donnons ci-dessous des exemples de définitions successives de certaines unités, ce qui est l'occasion de retracer brièvement l'histoire du SI et ses origines.

Du système métrique au système MKSA

Le système métrique décimal est né en France pendant la Révolution. À l'occasion des États généraux de 1789, le roi Louis XVI demande que des cahiers de doléances, ouverts dans toute la France, recueillent les vœux et suggestions de tous les habitants du royaume. Partout dans ces cahiers, on demande qu'il n'y ait plus « deux poids, deux mesures » : cette expression est restée dans le langage courant. En effet, non seulement chaque région possédait alors son propre système de mesures, différent pour chaque type de métier, mais la même unité pouvait avoir différentes variantes (toise de Charlemagne, toise du Châtelet, toise du Pérou...), ce qui était facilement source de tromperies dans les échanges commerciaux. En outre, la variété des subdivisions des différentes unités (par 20, par 12, par 8, par 6, par 3...) rendait les calculs extrêmement difficiles et inaccessibles à beaucoup de personnes.

Le 9 mars 1790, Talleyrand propose à l'Assemblée nationale un « Mémoire sur la nécessité de rendre uniformes dans tout le Royaume, toutes les mesures d'étendue et de pesanteur ». Il faut entendre par là les mesures de longueur et de poids, ce dernier n'étant alors pas distingué de la masse dans le langage commun. L'idée est de définir de nouvelles unités qui soient universelles, c'est-à-dire qui ne tiennent « à aucun climat, ni à aucune nation particulière ». Pour l'unité de longueur, le choix se porte sur le mètre, défini comme la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. L'unité de masse en est déduite, comme celle d'un décimètre cube d'eau distillée. La loi du 18 germinal de l'an III (7 avril 1795) institue le système métrique décimal.

Le Système international d'unités

Le Système international (SI) naît en 1960 à la 11^e CGPM, avec six unités de base (le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin et la candela). La septième unité de base est la mole qui n'est ajoutée qu'en 1971. Elle est définie comme « la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Elle est donc reliée à l'unité de masse.

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est, quant à lui, introduit dès 1954, même si la formulation de sa définition a été revue depuis. C'est « la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau ». On peut remarquer que cette définition ne fait appel à aucune autre grandeur physique et est donc déconnectée de celle des autres unités de base.

Ce n'est pas le cas de la candela (cd), qui fait appel à une puissance, tout en prenant en compte la sensibilité de l'œil humain à la lumière. Depuis 1979, la candela est par définition « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian ». Exprimée en termes strictement physiques, elle s'appuie sur la constante $K_{cd} = 683 \text{ cd sr W}^{-1}$, mais elle sert pour la photométrie dont l'objectif est de mesurer la lumière en rendant compte de la sensation visuelle d'un observateur humain. Elle utilise donc une fonction d'efficacité spectrale $V(\lambda)$, dont la valeur maximale est 1 pour la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$ (soit à 540 THz , dans le vert du spectre visible) où la sensibilité de l'œil est maximale. Cette fonction est définie par la Commission internationale de l'éclairage. L'unité de flux lumineux, le lumen, et celle d'éclairement lumineux, le lux, sont des unités dérivées de la candela ($1 \text{ lumen} = 1 \text{ cd sr}$; $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen m}^{-2}$).

Les atomes pour définir la seconde et le mètre

En 1960, la 11^e CGPM décide d'abandonner la définition de la seconde à partir de la durée du jour solaire moyen ; en effet la rotation de la Terre présente des irrégularités, nettement visibles avec les oscillateurs à quartz de plus en plus stables

dont on dispose alors. Elle choisit une nouvelle définition proposée par l'Union astronomique internationale : « la fraction $1/31\,556\,925,947$ de l'année tropique 1900 » (l'année tropique est définie comme l'intervalle de temps, sur Terre, pour que le Soleil retourne à la même position apparente dans le cycle des saisons). Mais cette définition, peu commode, sera rapidement abandonnée.

En 1967, la 13^e CGPM constate que cette définition de la seconde « ne suffit pas aux besoins actuels de la métrologie », et que « le moment est venu de remplacer la définition actuellement en vigueur de l'unité de temps du Système international d'unités par une définition atomique » ; elle décide donc de redéfinir la seconde (s) comme « la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». La fréquence (dans le domaine des micro-ondes) de la transition hyperfine de l'atome de césium prend donc une valeur fixée. Cette définition est toujours en vigueur et permet actuellement de réaliser la seconde avec un niveau d'exactitude d'environ 2×10^{-16} avec des fontaines à atomes froids. Remarquons que l'idéal d'universalité recherché par les révolutionnaires français est bien présent dans cette définition. En effet, tous les atomes du même isotope d'un même élément chimique ont les mêmes propriétés, qui sont universelles.

Avant la seconde, le mètre a été redéfini en 1960 non plus comme la longueur du prototype international de 1889, mais à partir d'une longueur d'onde atomique. La 11^e CGPM a en effet décidé que le mètre était « la longueur égale à $1\,650\,763,73$ longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86 ». La longueur d'onde de la raie orangée du krypton 86 se trouve ainsi fixée. En pratique, elle est fournie par une lampe à décharge et cette raie possède une certaine largeur.

Il se trouve que l'année 1960 est aussi celle de fonctionnement du premier laser et que les lasers, qui vont se développer rapidement dans les années qui suivent, ont une largeur spectrale bien plus étroite que celle des lampes. Les lasers vont devenir des références de longueurs d'onde et de fréquences, qu'on saura mesurer de plus en plus précisément. Pour une radiation

donnée se propageant dans le vide, le produit de la longueur d'onde par la fréquence donne la vitesse de la lumière c . Des déterminations de cette vitesse vont ainsi être réalisées, mais dont l'incertitude de quelques 10^{-9} est limitée non par les dispositifs de mesure (interférométrie et chaînes de fréquences) mais par l'étalon de longueur lui-même, la lampe à krypton. Une fois encore, quand l'étalon est le facteur limitant d'une mesure, c'est qu'il est temps d'en changer.

En 1983, la 17^e CGPM attribue une valeur exacte à la vitesse de la lumière c , en redéfinissant le mètre comme : « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ seconde ». Le mètre se trouve ainsi raccordé à la seconde et il n'y a plus qu'un seul étalon, l'horloge à césium, pour les longueurs et les temps (ou fréquences). La réalisation pratique du mètre peut être obtenue avec un laser et une horloge : on utilise par exemple des lasers continus de fréquence connue pour mesurer des petites distances par interférométrie ; ou bien des lasers en impulsions pour déduire une distance macroscopique du temps mis par la lumière pour la parcourir.

Les unités qui ne changent pas

Parmi les sept unités de base du système international, la seconde, le mètre et la candela ne sont pas modifiés en 2019, même si leurs définitions sont reformulées. Comme nous l'avons vu plus haut, elles font intervenir des valeurs numériques fixées pour :

- la fréquence de la transition hyperfine du césium 133, $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$, qui intervient dans la définition de la seconde ;
- la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$, qui intervient dans la définition du mètre ;
- la constante $K_{cd} = 683 \text{ lumen W}^{-1}$, qui intervient dans la définition de la candela.

Cependant, leurs définitions sont réécrites avec une nouvelle formulation dite « à constante explicite ». Par exemple, la définition du mètre est maintenant la suivante : « Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à $299\,792\,458$ lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde

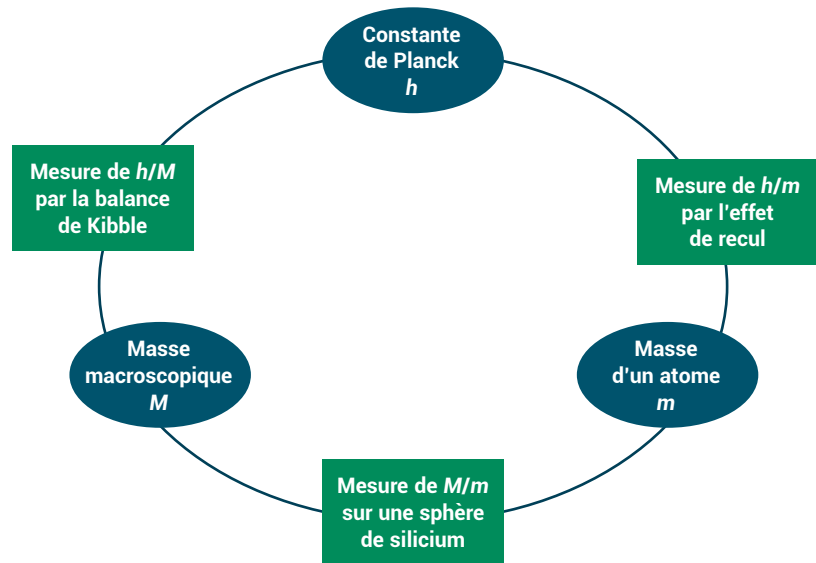
étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.» Les définitions de chacune des sept unités de base sont maintenant formulées selon ce même modèle.

Les unités qu'il fallait changer

Ces dernières années, le prototype international du kilogramme (IPK, noté avec la lettre \mathcal{K}) était le seul artefact matériel encore utilisé pour définir une unité de base du SI. Conservé au BIPM depuis 1889, il a été depuis cette date comparé trois fois à ses six copies témoins officielles. La dernière comparaison, réalisée en 2014, a confirmé une différence de $35 \mu\text{g}$ (soit $3,5 \cdot 10^{-8}$ en valeur relative) entre IPK et la moyenne de ces copies, ce qui laisse penser que la quantité de matière qu'il contient a sans doute changé depuis sa fabrication, même si sa masse restait 1 kg par définition. La référence à un prototype international unique pour les masses a de nombreux inconvénients, explicités dans l'article de M. Thomas *et al.* (p. 18), parmi lesquels le risque de détérioration ou de destruction accidentelle. De l'avis de tous, il était temps de changer la définition du kilogramme. Une possibilité aurait été de rattacher celui-ci à une masse microscopique, le carbone 12 par exemple, en fixant la valeur de la constante d'Avogadro N_A . Un autre choix a été fait, qui est de fixer la valeur de la constante de Planck h .

Cependant, à l'occasion de la refonte du SI, et comme il est maintenant possible de mieux relier les masses macroscopiques aux masses microscopiques, il a été décidé de redéfinir également la mole en fixant la valeur de N_A .

La définition de l'ampère nécessitait elle aussi d'être revisitée. La réalisation pratique de cette unité ne pouvant se faire directement avec les « deux fils infinis » intervenant dans sa définition, on utilisait des dispositifs mécaniques pour réaliser d'une part le volt et d'autre part l'ohm, et à partir d'eux l'ampère. De tels dispositifs ne permettent pas d'obtenir une exactitude meilleure que quelques 10^{-7} . C'est pourquoi, depuis 1990, ce sont deux phénomènes quantiques macroscopiques qui servaient en pratique de références dans les laboratoires : l'effet Josephson pour les tensions et l'effet Hall quantique pour les résistances (voir l'article de S. Djordjevic *et al.*, p. 25). Une jonction



2. Deux types d'expériences donnent accès au rapport entre h et une masse : la balance de Kibble pour les masses macroscopiques, en passant par les unités électriques, et l'effet de recul d'un atome pour les masses microscopiques. Le comptage du nombre d'atomes dans une sphère de silicium permet de faire le lien entre une masse macroscopique et la masse d'un atome.

Josephson est un convertisseur fréquence-tension. La constante de proportionnalité est la constante de Josephson donnée par $K_J = 2e/h$, où e est la charge électrique élémentaire. L'effet Hall quantique, quant à lui, fournit des paliers de résistance donnés par les sous-multiples de $R_K = h/e^2$. La stabilité de ces deux types de dispositifs, meilleure que 10^{-9} , est telle qu'ils ont été choisis par la CGPM en 1987 pour servir de références pour les mesures de tension et de résistance en donnant des valeurs conventionnelles à K_J et R_K . Ces valeurs sont utilisées pour la métrologie électrique depuis 1990. Depuis cette date, les mesures électriques de haute précision n'utilisaient donc plus comme référence la définition de l'ampère : les unités électriques avaient repris leur indépendance par rapport au SI.

Enfin, la définition du kelvin, en faisant appel à une température particulière, celle du point triple de l'eau, posait la question de la mesure dans des gammes de température très éloignées de celle-ci. On utilisait en pratique des phénomènes variés dans lesquels une loi physique dépend de la température (pression dans un gaz, résistance de platine, rayonnement du corps noir, etc.), mais les erreurs d'étalonnage des thermomètres étaient d'autant plus importantes qu'on s'éloignait du point triple de l'eau.

Comment quatre unités ont été redéfinies

En 2011, la 24^e CGPM a pris acte, dans sa Résolution 1, du projet de redéfinir le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin en fixant les valeurs numériques de quatre constantes de la physique : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Elle a alors encouragé les chercheurs du monde entier à mesurer le plus précisément possible ces quatre constantes dans le cadre du SI en cours [1].

Pour la constante de Planck h , on peut utiliser la balance de Kibble qui permet de comparer une puissance électrique à une puissance mécanique (voir l'article de M. Thomas *et al.*, p. 18). En s'appuyant sur les relations donnant R_K et K_J , cette balance donne accès au rapport h/M entre la constante de Planck et une masse étalon avec une incertitude de quelques 10^{-8} . On a donc pu déterminer h avec cette balance en se référant à l'étalon du kg.

Pour la constante d'Avogadro N_A , la mesure a été réalisée par la collaboration internationale IAC (International Avogadro Constant) en comptant le nombre d'atomes dans une sphère de silicium 28 et en se référant à la masse molaire du silicium, précisément comparée à celle du carbone 12 (voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22).

En pratique, la valeur de la constante de Planck a été déterminée à partir de deux types de mesures : celles données par différentes balances de Kibble dans le monde, mais aussi celle déduite de l'étude de la sphère de silicium par la collaboration IAC, en s'appuyant sur les mesures de l'effet de recul sur des atomes froids (voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22). Cet effet de recul donne en effet accès au rapport h/m entre la constante de Planck et la masse m d'un atome, tandis que la sphère de silicium donne le rapport entre la masse macroscopique de la sphère et la masse d'un atome qui la compose. Les deux voies indépendantes pour obtenir h , dont l'une passe par les unités électriques et l'autre non, ont donné des résultats en bon accord et avec des incertitudes relatives comparables d'un peu plus de 10^{-8} . Le lien entre elles est illustré sur la figure 2.

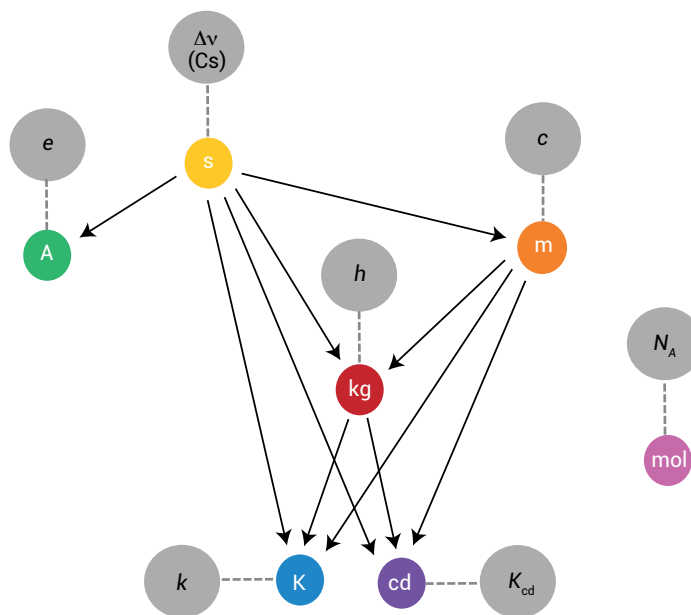
La valeur de la constante de Planck étant déterminée, on a pu en déduire celle de la charge élémentaire e à partir de l'expression de la constante de structure fine $\alpha = e^2/2\epsilon_0hc$ qui est connue expérimentalement avec une grande précision (voir P. Cladé et L. Julien, *Reflets de la physique*, 59 (2018) 4-9).

Enfin, trois types d'expériences ont contribué à la détermination de la constante de Boltzmann k . Elles consistaient à mesurer l'une ou l'autre des grandeurs suivantes, en se référant au point triple de l'eau : la constante diélectrique de l'hélium, l'amplitude du bruit thermique dans un conducteur (bruit Johnson), ou la vitesse du son dans un gaz parfait (thermométrie acoustique). C'est ce dernier type d'expérience qui a donné les résultats les plus précis. Il a été mis en œuvre au LNE-CNAM et est décrit dans l'article de L. Pitre *et al.* (p. 29).

À la suite de l'ajustement des constantes fondamentales réalisé par le CODATA en 2017 (voir l'article de F. Nez, p. 17) et de la proposition du CIPM réuni en octobre de cette même année, la 26^e CGPM a entériné le choix des valeurs numériques suivantes pour la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann :

- $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s
- $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
- $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J K⁻¹

Ce faisant, quatre autres constantes ont perdu leurs valeurs numériques exactes et seront susceptibles d'être remesurées à l'avenir :



3. Relations de dépendance entre les unités du nouveau SI et les constantes physiques fondamentales. Dans le nouveau SI, toutes les unités de base sauf la mole sont définies à partir de la seconde. Avec les valeurs numériques fixées de c et e , l'ampère et le mètre se déduisent de la seconde. Avec la valeur de h , le kilogramme se déduit de la seconde et du mètre, puis, en fixant les valeurs de k et K_{cd} , le kelvin et la candela se déduisent de la seconde, du mètre et du kilogramme. La mole, elle, est déconnectée des autres unités.

- la masse du prototype international \mathcal{K} , qui ne vaudra plus exactement 1 kg,
- la perméabilité du vide, qui ne vaudra plus exactement $4\pi \cdot 10^{-7}$ en unités SI,
- la masse molaire du carbone 12, qui ne vaudra plus exactement $12 \cdot 10^{-3}$ kg,
- la température du point triple de l'eau qui ne sera plus exactement 273,16 K.

De façon générale, les dispositifs qui ont servi à mesurer jusqu'ici les valeurs des constantes h , e , N_A et k en utilisant les anciens étalons pourront être utilisés à l'avenir pour la réalisation des unités redéfinies : par exemple la balance de Kibble, avec la valeur fixée de h , permettra de mesurer des masses macroscopiques, et la vitesse du son dans un gaz parfait, avec la valeur fixée de k , permettra de mesurer des températures.

Les quatre unités redéfinies par la 26^e CGPM, comme celles qui ne changent pas, ont des nouvelles définitions exprimées avec des formulations « à constante explicite » (www.bipm.org/fr/CGPM/db/26/1/), par exemple : « Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité équivalente au $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{Cs}$ ».

Avec leurs nouvelles définitions, le kilogramme, l'ampère et le kelvin, comme le mètre et la candela, sont définis à partir de la seconde : cette relation de dépendance est illustrée dans la figure 3. La mole se trouve déconnectée du kilogramme, comme elle l'était déjà des autres unités ; de son côté, le kelvin fait le chemin inverse en se raccordant aux unités mécaniques. Le kilogramme étalon de 1889 devient un objet de musée, comme l'a été avant lui le mètre étalon.

Dans quelques années, la seconde sera à nouveau redéfinie grâce aux progrès spectaculaires des horloges optiques. La fréquence d'une nouvelle transition atomique sera fixée, non plus dans le domaine micro-onde mais dans le domaine optique. Mais la nouvelle définition n'affectera pas celles des autres unités de base du SI, qui continueront à en découler de la même façon.

Le nouveau SI constitue un ensemble cohérent ; en s'appuyant sur des constantes de la nature, il répond encore mieux au vœu d'universalité qui avait inspiré la création du système métrique. ■

Référence

1 • P.J. Mohr *et al.*, "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* 55 (2018) 125-146.

Le CODATA (Comité de données pour la science et la technologie)

François Nez (francois.nez@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel, (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris
Membre du Task Group on Fundamental Constants du CODATA

Le CODATA (www.codata.org) est un comité du Conseil international pour la science^(a) (ICSU). Un sous-groupe de travail du CODATA est chargé des constantes fondamentales, le "Task Group on Fundamental Constants". Il se réunit chaque année et regroupe une quinzaine de scientifiques de différents pays, dont un membre français. Sa tâche consiste, à partir de toutes les mesures de grandeurs physiques reliées à ces constantes, publiées à un moment donné, de fournir la meilleure estimation possible des valeurs numériques des constantes fondamentales. Par « meilleure estimation », il faut entendre celle qui reproduit au mieux l'ensemble des résultats expérimentaux publiés.

Depuis 1998, un ajustement par moindres carrés de la valeur de ces constantes est réalisé tous les quatre ans à partir de l'ensemble des données mesurées, puis les conclusions sont publiées. On obtient ainsi un ensemble cohérent de valeurs numériques pour plus de 300 constantes physiques, telles que la masse de l'électron, la charge électrique élémentaire, la constante de Planck ou celle de la gravitation, entre autres. Pour l'ajustement, les données entrées sont *a priori* affectées d'un poids qui est inversement proportionnel au carré de l'incertitude de mesure, comme si les dispersions des résultats de mesures étaient d'origine statistique. Cependant, chaque publication est analysée en détail par le comité et un soin particulier est porté aux corrélations entre différentes mesures d'une même donnée, par exemple celles réalisées avec le même dispositif à des dates différentes. Dans des cas de désaccords inexplicables entre plusieurs mesures, il peut arriver que le comité soit amené à affecter aux mesures une incertitude supérieure à celle qui est publiée. La méthode suivie est expliquée en détail en annexe de la



Les participants à la réunion du Task Group on Fundamental Constants du CODATA, au BIPM (Pavillon de Breteuil, Sèvres, France), 3-4 novembre 2014.

publication des résultats de l'ajustement de 1998 [1].

Après celui effectué en 2014, un ajustement spécial a été réalisé en 2017 pour obtenir les meilleures valeurs à cette date des quatre constantes qui devaient servir à redéfinir le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin ; il s'agit des constantes h (constante de Planck), e (charge élémentaire), N_A (constante d'Avogadro) et k (constante de Boltzmann). Au vu des valeurs déduites de cet ajustement, entachée chacune d'une incertitude, le CIPM (Comité international des poids et mesures) a déterminé en octobre 2017 les valeurs numériques qu'il a proposé de fixer pour les quatre constantes dans le cadre de la redéfinition du SI [2]. Ces valeurs ont été entérinées par la CGPM (Conférence générale des poids et mesures) le 16 novembre dernier et sont intégrées dans les nouvelles définitions des unités

entrées en vigueur le 20 mai 2019. Un nouvel ajustement a depuis été réalisé dans lequel, comme la vitesse de la lumière c , ces constantes ont maintenant une valeur déterminée. ■

(a) Le Conseil international pour la science (ICSU) est un organisme fondé en 1931, dont l'objectif est de renforcer l'activité scientifique internationale au bénéfice de la société. Son siège est à Paris. Il réunit actuellement 31 unions scientifiques internationales (par exemple l'IUPAP, Union internationale de physique pure et appliquée) et 121 membres nationaux (dont l'Académie des sciences pour la France) couvrant 141 pays. L'ICSU est financée par les contributions de ses membres et par des contrats avec d'autres institutions comme l'UNESCO.

Références

- 1• P.J. Mohr et B.N. Taylor, *Rev. Mod. Phys.* **72** (2000) 351-495.
- 2• P.J. Mohr et al., *Metrologia* **55** (2018) 125-146.

La redéfinition du kilogramme et la balance de Kibble

Matthieu Thomas (Matthieu.Thomas@lne.fr), Patrick Espel, Djamel Ziane, Patrick Pinot et François Piquemal

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 rue Roger Hennequin, 78197 Trappes

Depuis le 20 mai 2019, l'étalonnage d'une masse macroscopique peut se faire avec une précision pouvant atteindre 10^{-8} à l'aide d'une balance de Kibble, à partir d'une valeur connue fixée de la constante de Planck h , en passant par des étalons électriques.

La définition précédente du kilogramme et ses faiblesses

Le prototype international du kilogramme, cylindre de platine iridié (alliage de 90 % de platine et 10 % d'iridium) de diamètre et de hauteur égaux à 39 mm, est l'artefact qui réalisait depuis 1889 la définition de l'unité de masse dans le Système international (SI). Cet artefact, identifié par la lettre \mathcal{K} (connu comme « le grand K »), est toujours conservé dans l'air, sous trois cloches de verre au pavillon de Breteuil du BIPM, à Sèvres.

La masse de \mathcal{K} était par définition toujours égale à 1 kg exactement (avec par conséquent une incertitude nulle), même si la quantité de matière que contient l'artefact évoluait. Cette définition posait plusieurs problèmes :

- \mathcal{K} était le seul moyen de réalisation de l'unité SI de la masse, et il ne pouvait être remplacé par un autre prototype en cas de détérioration ou de destruction.
- La masse réalisée par \mathcal{K} était de 1 kilogramme : l'étalonnage des masses très éloignées de cette valeur ponctuelle, en particulier pour les faibles masses, était délicate.
- Les conditions de conservation de \mathcal{K} devaient être maîtrisées pour contrôler sa stabilité à long terme. Ceci impliquait de limiter au strict nécessaire son utilisation, mais aussi de lui appliquer une méthode spécifique de nettoyage-lavage.
- Sa disponibilité en un seul lieu rendait la vérification des quelques soixante prototypes nationaux possible seulement s'ils étaient tous rassemblés au BIPM pour une durée de deux ou trois années. Ces

vérifications n'ont donc eu lieu que tous les cinquante ans environ.

- Des vérifications impliquant la comparaison de \mathcal{K} et des six copies officielles conservées dans les mêmes conditions que le prototype montraient une dispersion de l'évolution temporelle de l'ordre de 50 μg sur un siècle. Ce résultat était un indice fort de l'évolution de la masse de \mathcal{K} par rapport à une référence stable, comme la masse d'un atome. Alors, avec cette définition de l'unité de masse, on arrivait à la conclusion que la masse de \mathcal{K} ne variait pas, tandis que celle d'un atome de carbone 12 par exemple dans le SI, pouvait varier au cours des décennies : cela était loin d'être satisfaisant.

Pour des raisons de disponibilité, de pérennité et d'universalité du kilogramme, il était donc indispensable d'en changer la définition.

Quelle constante fondamentale choisir pour définir le kilogramme ?

Les réflexions menées au sein de la communauté internationale depuis plus d'une décennie ont abouti à un consensus en faveur d'une définition du kilogramme à partir de la constante de Planck h au détriment de la définition alternative fondée sur la constante d'Avogadro N_A , selon laquelle le kilogramme serait constitué d'un nombre donné d'atomes.

Deux arguments principaux expliquent ce choix. Tout d'abord, h fait partie des « constantes dimensionnées les plus fondamentales » [1] de la physique, comme la vitesse de la lumière c , par exemple : h est

Science and Technology, États-Unis) et le LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais, France) avec des balances différentes, mais également le Consortium Avogadro et le NMIJ (National Metrology Institute of Japan), ces deux derniers au moyen de la méthode XRCD appliquée à des sphères de silicium, ont contribué à la fixation de la valeur « définitive » de la constante de Planck.

Balance de Kibble et détermination de la constante de Planck

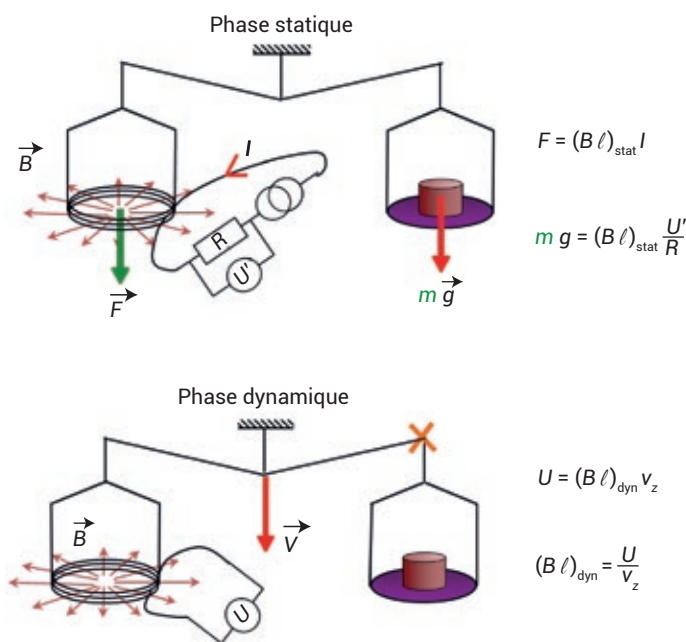
Le principe du dispositif expérimental proposé par Brian Kibble en 1976 consiste en une comparaison virtuelle de puissances électrique et mécanique mesurées au cours de deux phases, statique et dynamique (fig. 1).

Dans la phase statique, le poids mg d'une masse étalon m soumise à l'accélération de la pesanteur g est équilibré par la force (verticale) de Laplace F exercée sur un conducteur (une bobine horizontale) de longueur ℓ parcouru par un courant I lorsqu'il est immergé dans un champ radial, horizontal et homogène, d'induction magnétique B (c'est-à-dire dans l'entrefer d'un circuit magnétique de symétrie cylindrique). Pour un alignement parfait du système, cet équilibre est décrit par la relation $mg = (B\ell)_{\text{stat}} I$, où I peut être mesuré par la chute de potentiel U' qu'il produit aux bornes d'une résistance R .

Dans la phase dynamique, la même bobine est déplacée à une vitesse verticale v_z dans le même champ d'induction magnétique B . De nouveau, si le système est parfaitement aligné, la loi de Lenz conduit à une chute de tension U aux bornes de la bobine, donnée par la relation : $U = (B\ell)_{\text{dyn}} v_z$.

Si le flux magnétique, la longueur du conducteur et les positions relatives du conducteur et du flux magnétique dans les deux phases sont inchangés pendant le temps de mesure, alors $(B\ell)_{\text{stat}} = (B\ell)_{\text{dyn}}$, et la combinaison des deux relations peut être réexprimée comme l'égalité des puissances électrique et mécanique virtuelles (et donc notamment sans pertes par effet Joule) : $mgv_z = UI = UU'/R$.

Les tensions se mesurent par comparaison à l'effet Josephson ; on a donc $U = n_U f_U / K_J$ dans le cas dynamique (resp. $U' = n_U' f_U' / K_J$ dans le cas statique)



1. Principe de la balance de Kibble.

En phase statique, un courant I (environ 5 mA), générant une chute de tension U' (environ 1 V) aux bornes d'une résistance R (environ 200 Ω), équilibre une force de Laplace $F = (B\ell)_{\text{stat}} I$ appliquée à une bobine de longueur ℓ et le poids d'une masse étalon mg (environ 5 N). En réalité, les deux forces sont comparées à la même extrémité du fléau.

En phase dynamique, le fléau est bloqué en position horizontale (croix rouge) et déplacé avec sa suspension à la vitesse v_z (environ 2 mm s^{-1}) verticale sur une longueur de 40 mm dans l'entrefer du circuit magnétique. Une tension $U = (B\ell)_{\text{dyn}} v_z$ (environ 1 volt) est alors générée à ses bornes. Si $(B\ell)_{\text{stat}} = (B\ell)_{\text{dyn}}$ (environ 500 N A^{-1}), la combinaison des deux relations peut être réexprimée : $mgv_z = UI$ (environ 5 mW). Il s'agit d'un équilibre de puissance, d'où le nom initial « balance du watt » (à présent balance de Kibble).

avec d'une part n_U (n_U') le numéro d'ordre de la marche de Shapiro utilisée et d'autre part f_U (f_U') la fréquence d'irradiation de la jonction Josephson par une onde électromagnétique. Les résistances se mesurent par comparaison à un étalon de résistance à effet Hall quantique ; on a donc $R = R_K/i$, avec i l'indice du plateau utilisé (voir l'article de S. Djordjevic *et al.*, p. 25).

On peut alors exprimer h en fonction de m , mais également la masse m en fonction de h : $h = (4gv_z / A) m$, $m = (A / 4gv_z) h$, où $A = n_U n_U' i f_U f_U'$. La charge élémentaire e est éliminée dans le produit $K_J^2 R_K = 4/h$. Ainsi, la mesure des tensions et courants par comparaison à des étalons quantiques réalise une relation linéaire entre la masse macroscopique et la constante de Planck.

Avant la révision du SI, une balance de Kibble permettait de déterminer la valeur de h dans le SI en partant d'une valeur connue de masse (*i.e.* étalonnée par rapport

à \mathcal{K}). Depuis le 20 mai 2019, une balance de Kibble permet de déterminer une valeur de masse dans le SI à partir d'une valeur connue (fixée) de h .

Des solutions techniques variées sont employées pour réaliser une balance de Kibble. Celle du LNE, en France, présente par exemple comme caractéristiques (fig. 2) sa phase dynamique où le comparateur de force (fléau de la balance et sa suspension) de la phase statique est déplacé dans son ensemble afin d'éviter l'utilisation du fléau comme générateur de mouvement.

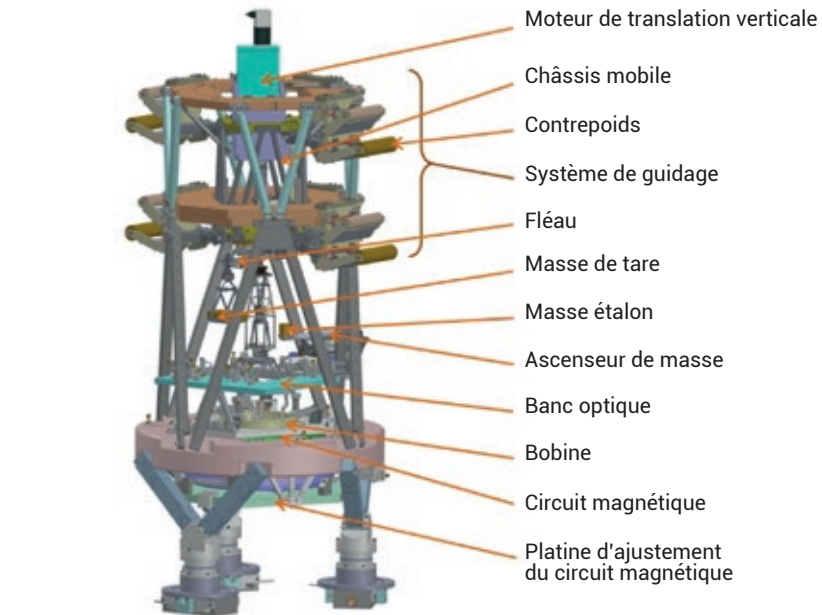
Lors de la phase statique, la comparaison de forces est assurée par un fléau (longueur 20 cm) à lames bicirculaires taillées dans la masse (épaisseur au col 40 μm). Le fléau compare en réalité des moments et, de manière à s'affranchir de la connaissance du rapport des longueurs des deux bras, on compare la force de Laplace au poids du

même bras : un capteur assure la connaissance de la position angulaire de l'extrémité du fléau à mieux que $10 \mu\text{rad}$. Typiquement, la succession de 5 doubles pesées (avec et sans masse étalon de 500 g, la mesure de g étant assurée en temps réel par un gravimètre à atomes froids situé à proximité) prend une heure : les courants nécessaires pour assurer les asservissements sont de l'ordre de 5 mA (soit 1 V mesuré aux bornes d'une résistance de 200Ω). Les tensions sont mesurées par comparaison à un étalon Josephson, la résistance est une résistance de transfert raccordée à un étalon à effet Hall quantique.

Lors de la phase dynamique, la bobine est déplacée verticalement, au moyen d'un système de guidage à lames flexibles pincées à la vitesse de 2 mm s^{-1} sur une distance de 40 mm : une centaine de montées et descentes est réalisée en une heure, les vitesses étant mesurées par la fréquence Doppler générée à la sortie d'interféromètres mesurant la position verticale de la bobine. Chaque interféromètre est irradié par un laser dont la fréquence est asservie sur une raie de la structure hyperfine du diode I_2 , raie faisant partie des mises pratiques recommandées du mètre. Le déplacement de la bobine dans le champ magnétique de 1 T génère une tension de 1 V : la vitesse de la bobine est mesurée de manière synchrone (avec une précision meilleure que la microseconde) aux durées d'intégration des voltmètres.

Mise en pratique de la nouvelle définition du kilogramme

La nouvelle définition du kilogramme peut être réalisée par n'importe quel laboratoire ou groupement de laboratoires qui peuvent alors disséminer l'unité de kilogramme de leurs étalons de masse primaires (artefacts étalonnés par une méthode primaire : méthode XRCD ou expérience de balance de Kibble, qui présente l'avantage de pouvoir réaliser en principe une valeur de masse quelconque) vers n'importe quel autre laboratoire ou, plus généralement, vers les utilisateurs au travers d'étalons de masse secondaires. Néanmoins, ils seront tenus à participer périodiquement à une comparaison internationale de leurs étalons de masse primaires sous l'égide du BIPM pour assurer la véri-



2. Les différentes composantes de la balance de Kibble du LNE (cuve à vide non représentée).

Le *moteur de translation verticale* déplace le châssis mobile qui soutient le *fléau*. Grâce aux *contrepoids*, il n'a besoin que de générer une force de l'ordre de 10 N. Le *système de guidage* à lames flexibles assure un déplacement vertical et rectiligne de l'ensemble *fléau / suspension / bobine* verticalement dans l'entrefer du *circuit magnétique*. Ce déplacement à vitesse constante (mesurée par des interféromètres et un système optique situé sur le *banc optique*) génère une tension aux bornes de la bobine (phase dynamique).

Le *fléau* assure la comparaison de forces entre le poids de la *masse étalon* et la force de Laplace générée par le courant circulant dans la *bobine* plongée dans le *circuit magnétique*. Ces deux forces s'appliquent à l'extrémité du fléau grâce à une *suspension* double, coaxiale et articulée. Une *tare* compense la masse morte suspendue au fléau (phase statique).

La *platine d'ajustement du circuit magnétique* permet d'assurer l'horizontalité du *circuit magnétique*.

fication de la cohérence des différentes réalisations de l'unité de masse au moyen d'un ensemble de masses de référence.

En France, le nouveau système de dissémination comprendra, dans le même esprit qu'au BIPM, un ensemble d'étalons de masse de 1 kg permettant de disposer à tout instant d'une valeur nationale du kilogramme. Cette valeur sera calculée à partir de la valeur moyenne pondérée des étalons constituant cet ensemble, ces derniers étant étalonnés périodiquement par la balance de Kibble du LNE.

Le jour de la mise en application de la nouvelle définition du kilogramme, le 20 mai 2019, la masse $m(\mathcal{K})$ du prototype international est restée 1 kg (mais avec une incertitude-type relative de $1 \cdot 10^{-8}$) et toutes

les valeurs de masse traçables à \mathcal{K} ont été inchangées. Mais désormais, l'étalonnage d'une masse devra se réaliser au moyen d'une balance de Kibble (ou d'une sphère de silicium) : chaque pays, comme la France, disposant d'une telle méthode primaire peut réaliser de manière indépendante l'unité SI de la masse, le kilogramme. ■

Références

- 1• J.P. Uzan et R. Lehoucq, *Les constantes fondamentales*, Belin (2005).
- 2• P.J. Mohr *et al.*, "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* **55** (2018) 125-146.

Mesurer une masse grâce à l'impulsion d'un photon

Pierre Cladé (pierre.clade@lkb.upmc.fr) et Saïda Guellati-Khélifa (saida.guellati@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

La mesure par effet Doppler du recul d'un atome par absorption d'un photon permet de mesurer la masse de cet atome avec une très haute précision ($\sim 10^{-10}$). Le lien entre masse macroscopique et masse atomique est obtenu par comptage du nombre d'atomes d'une sphère monocristalline de silicium.

La physique quantique pour mesurer les masses

La 26^e Conférence générale des poids et mesures a décidé de définir l'unité de masse en fixant la valeur de la constante de Planck h . Cette définition fait donc reposer la réalisation de toutes les unités qui dépendent du kilogramme sur des phénomènes quantiques. C'est le cas, par exemple, des grandeurs électriques dont les mesures s'appuient sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. La constante de Planck sert avant tout à mesurer les énergies à l'échelle quantique : elle a été introduite comme constante permettant de lier la fréquence d'un photon à son énergie. Dans la balance de Kibble, on compare l'énergie (ou la puissance) électrique (mesurée par rapport à h) à l'énergie potentielle de pesantier d'une masse (voir l'article de M. Thomas *et al.*, p. 18). En fait, en fixant h , c'est l'unité d'énergie, plus que celle de masse, que l'on a fixée. D'ailleurs, le texte de la résolution l'indique explicitement, puisque la valeur numérique de h y est exprimée en J s.

Cependant, il est possible de relier la constante de Planck à une masse par une autre méthode, qui utilise la conservation de l'impulsion. Cette méthode, décrite ci-dessous, repose sur le recul d'un atome qui absorbe un photon et donne accès à une masse atomique. Utilisée conjointement avec la mesure du nombre d'atomes dans une sphère monocristalline de silicium, elle constitue une alternative à la balance de Kibble (voir la figure 2 de l'article de L. Julien, p. 15).

Dans un faisceau lumineux monochromatique de fréquence ν , chaque photon possède une énergie égale exactement à $h\nu$ et une impulsion qui vaut $hk = h\nu/c$ (si ce faisceau constitue une onde plane). Lorsqu'un photon est absorbé par un objet massif (par exemple un atome de masse m), il va transférer sa quantité de mouvement à cet objet, lequel va reculer avec une vitesse inversement proportionnelle à sa masse. Cette vitesse, que l'on appelle vitesse de recul, vaut $v_r = h\nu/mc$. Dans le nouveau SI, où h et c sont fixées, la mesure de cette vitesse, associée à celle de la fréquence du photon, permet donc de déterminer directement la masse de l'objet.

Mesure du recul atomique

L'expérience permettant de mesurer précisément cette vitesse de recul (fig. 1) a été décrite dans le numéro 59 de *Reflets de la physique* (p. 8). Nous en rappelons ici brièvement le principe.

L'effet Doppler est utilisé pour connaître précisément le changement de vitesse des atomes. En comparant la fréquence d'une transition avant et après l'absorption d'un photon, il est possible de déterminer ce changement de vitesse. Pour transférer la vitesse de recul aux atomes, on peut utiliser non seulement l'absorption, mais aussi l'émission stimulée d'un photon : dans ce cas, l'atome émet un photon dans la même direction que celle du faisceau laser incident. Si ce faisceau laser va dans la direction opposée à celle du faisceau utilisé pour l'absorption, alors les deux impulsions de



2. Sphère presque parfaite de silicium et les différentes étapes ayant mené à sa réalisation.

cyclotron de deux espèces placées dans le même champ magnétique permet de déterminer leur rapport de masse. Des précisions meilleures que 10^{-10} sont atteintes. À partir du recul atomique effectué sur le rubidium ou le césium, il est donc possible de mesurer avec une précision comparable la masse de la plupart des atomes.

Enfin, une masse macroscopique peut être reliée à une masse atomique grâce à la méthode dite XRCD (X-Ray Crystal Density method). Cette expérience est conceptuellement très simple : il s'agit d'élaborer un cristal pur de silicium et d'en compter le nombre d'atomes. Pour cela, une sphère monocristalline quasiment parfaite est réalisée (fig. 2). En mesurant le volume de cette sphère et en le comparant au volume d'une maille du cristal, on déduit le nombre d'atomes et donc la masse de la sphère. En pratique, ce projet est un véritable défi expérimental. Il est réalisé au sein d'une collaboration internationale : l'International Avogadro Coordination (IAC). Dans l'idéal, il faudrait disposer d'un cristal parfait, c'est-à-dire isotopiquement et chimiquement pur, ainsi que sans défaut cristallin. Il s'agit là de la principale limitation de la précision. Pour réduire l'incertitude liée à la composition isotopique, du silicium enrichi à plus de 99,99% en isotope ^{28}Si est préparé. Un monocristal de plusieurs kilogrammes est ensuite fabriqué. À partir de ce cristal, deux sphères semblables sont taillées.

D'autres échantillons sont aussi prélevés pour mesurer la concentration isotopique à l'aide d'un spectromètre de masse et pour étudier la structure du cristal. Ce dernier n'étant pas parfaitement homogène, des mesures sur plusieurs échantillons sont nécessaires afin d'interpoler les résultats au niveau de chaque sphère.

La structure du cristal est étudiée en combinant un interféromètre à rayons X et un interféromètre optique. Lorsque l'on déplace un élément de l'interféromètre à rayons X, le signal varie avec une période spatiale correspondant à la taille de la maille cristalline. En mesurant ce déplacement à l'aide d'un interféromètre optique, on est donc capable de déduire la taille de chaque maille. Un autre interféromètre optique est aussi utilisé pour mesurer le diamètre de la sphère et, plus précisément, les corrections qui existent par rapport à la sphère parfaite. En 2017, les chercheurs de la collaboration IAC ont pu mesurer le rapport entre la masse d'une sphère et celle de l'atome de silicium avec une précision de $1,2 \times 10^{-8}$. Cette incertitude provient principalement de celle sur la mesure du diamètre de la sphère, ainsi que de la contamination chimique de sa surface.

Le recul comme mesure d'une masse

Dans le nouveau SI, la balance de Kibble permet la réalisation pratique du kilogramme, grâce à la mesure de masses macroscopiques à partir de leur poids et en passant par des étalons électriques. Le recul atomique, que l'on a présenté dans cet article, donne accès directement à la mesure d'une masse atomique avec une précision meilleure que 10^{-9} , ce qui dans le nouveau SI en fait la plus précise des mesures de masses.

En outre, nous pensons que cette méthode consistant à mesurer la vitesse de recul d'un atome qui absorbe un photon, constitue un moyen relativement simple de comprendre le lien entre la constante de Planck h et les masses dont elle définit l'unité : fixer la valeur de h à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$, revient finalement à dire que le kilogramme est 10^{25} fois la masse d'un atome initialement au repos, qui, en absorbant un photon de longueur d'onde $1 \mu\text{m}$ se propageant dans une direction donnée, acquerrait^(b) une vitesse de recul de $6,626\,070\,15 \text{ mm/s}$. ■

(a) Un piège de Penning est un dispositif de symétrie cylindrique permettant de confiner des particules chargées pendant une durée suffisamment longue, en utilisant un champ magnétique statique uniforme appliqué selon l'axe z et un champ électrique quadripolaire qui évite que les particules sortent du piège lorsqu'elles suivent les lignes de champ magnétique.

(b) Nous employons le conditionnel, cette définition restant fictive, car un tel atome n'existe pas.

Les étalons électriques quantiques

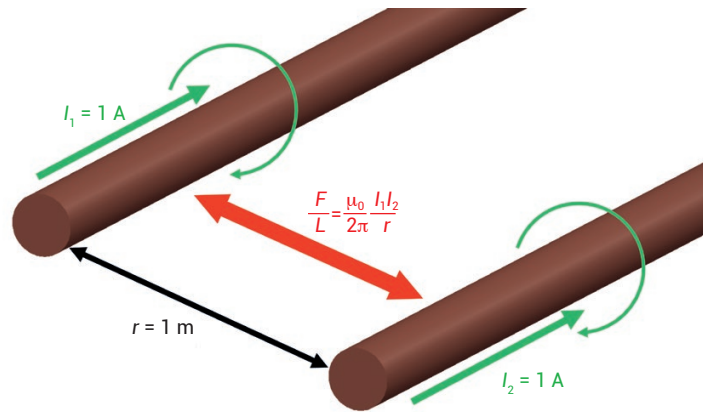
Sophie Djordjevic (sophie.djordjevic@lne.fr), Wilfrid Poirier, Félicien Schopfer et Olivier Thévenot
Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 avenue Hennequin, 78197 Trappes Cedex

Les découvertes successives de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique ont permis de réaliser des étalons de tension et de résistance électrique incomparablement plus stables que les étalons matériels classiques.

L'ancienne définition de l'ampère et la hiérarchie des unités électriques

De 1948 au 20 mai 2019, la définition de l'unité d'intensité du courant électrique (voir l'article de L. Julien, p. 12) s'appuyait sur la théorie de Maxwell et sur une expérience de pensée mettant en jeu deux fils, infiniment longs et infiniment fins, parcourus par un courant électrique. Ces fils subissent alors la force de Laplace sous l'effet du champ magnétique qu'ils créent autour d'eux (fig. 1). En imposant, dans la définition, la distance entre les fils et la valeur de la force exercée par unité de longueur, la perméabilité du vide μ_0 a été fixée implicitement à $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ exactement. Cette définition, la première à reposer sur une constante de la physique, fut une avancée importante dans l'uniformisation des unités électriques. Cependant, sa mise en œuvre expérimentale restait difficile. Jusque dans les années 1960, elle reposait sur différentes versions de la *balance de l'ampère*, où la force électromagnétique qui s'exerce entre deux bobines parcourues par un courant est comparée à la force gravitationnelle d'une masse connue. Les incertitudes de ces réalisations, liées en grande partie à la géométrie des bobines, sont restées limitées à quelques 10^{-6} .

De manière à réduire cette incertitude, il a fallu emprunter une autre voie, qui s'appuie sur la réalisation du farad à partir du mètre. A. Thompson et D. Lampard [1] ont en effet démontré que la valeur des capacités croisées par unité de longueur dans un système de quatre électrodes cylindriques, chacune de longueur infinie,

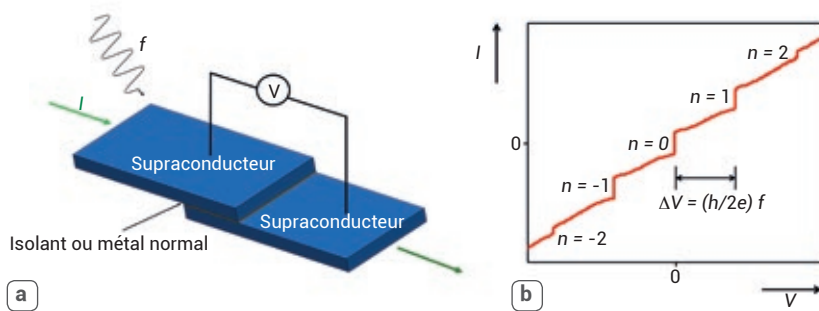


1. Illustration de l'ancienne définition de l'ampère. Le fil conducteur parcouru par le courant I_1 dans le champ magnétique B_2 créé par le courant I_2 , subit une force de Laplace perpendiculaire à I_1 et B_2 , et réciproquement : les deux fils s'attirent par la force F . L'ancienne définition fixait la force à $2 \times 10^{-7} \text{ N m}^{-1}$ pour des fils de longueur infinie, de section circulaire négligeable, distants de 1 m dans le vide et parcourus par un courant de 1 ampère. La nouvelle définition de l'ampère est liée à la charge élémentaire, e , fixée à $1,602176634 \times 10^{-19} \text{ A s}$.

n'était reliée qu'à la permittivité du vide ϵ_0 , cette dernière étant exacte depuis que la vitesse de la lumière c a été fixée en 1983 : $\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$. Grâce au condensateur calculable de Thompson-Lampard, réaliser le farad revient donc à mesurer une longueur de manière précise, permettant d'atteindre une incertitude de quelques 10^{-8} . À partir du farad et de la seconde, il est possible de réaliser l'ohm en comparant une résistance à l'impédance de la capacité calculable. Le volt, lui, peut être déterminé à partir de la balance du volt, dans laquelle le poids d'une masse contrebalance la force électrostatique s'exerçant sur l'électrode mobile d'un condensateur soumis à une tension. De cette manière, des incertitudes de l'ordre de quelques 10^{-7} ont été atteintes. La réalisation de l'unité de base, l'ampère, est finalement obtenue de

manière indirecte avec une incertitude de quelques 10^{-7} , à partir de la combinaison de différentes réalisations des unités dérivées, parmi lesquelles l'ohm, le volt et le watt déterminé par la balance de Kibble (voir l'article de M. Thomas, p. 18).

De manière générale, les incertitudes des réalisations des unités électriques étaient limitées par le lien entre l'ampère et les unités mécaniques, *via* la définition de 1948. Pour aller au-delà, le changement de définition voté le 16 novembre 2018, qui permet de relier l'ampère au flux de charges élémentaires par unité de temps, était indispensable. Mais il n'a pu être envisagé qu'en se basant sur une représentation microscopique du transport électronique et grâce aux phénomènes quantiques utilisés en métrologie électrique.



E1. (a) Jonction Josephson soumise à un courant continu I et irradiée par une fréquence externe f .

(b) Caractéristique tension-courant d'une jonction Josephson SNS (supraconducteur-métal normal-supraconducteur) soumise à un rayonnement micro-onde de fréquence f et faisant apparaître les premières marches de tension constante correspondant à $n = 0, \pm 1, \pm 2$. Les marches sont séparées par une tension ΔV égale à $(h/2e)f$.

L'effet Josephson a été prédit par Brian Josephson en 1962 [2]. Cet effet, sur lequel reposent les étalons quantiques de tension, apparaît dans des microstructures, appelées jonctions Josephson (fig. E1a), où deux supraconducteurs sont séparés par une couche mince de matériau non supraconducteur (isolant ou métal). Dans une telle structure, un courant supraconducteur peut circuler sans tension appliquée entre les bornes supraconductrices (effet Josephson continu). Mais, dès lors qu'il existe une tension continue V à ses bornes, le courant supraconducteur dans la jonction oscille à la fréquence Josephson, $f_J = 2eV/h$ (effet Josephson alternatif). La jonction Josephson apparaît donc comme un convertisseur fréquence-tension de précision fondamentale, car ces deux grandeurs ne sont reliées que par la charge élémentaire e et la constante de Planck h .

De manière à utiliser cet effet pour un étalon de tension, la jonction est soumise simultanément à un courant continu et à une onde électromagnétique de fréquence f (fig. E1a). Dans ce cas, une tension dépendant du temps se superpose à la tension continue aux bornes de la jonction. La fréquence du courant supraconducteur est modulée et le courant oscille de façon complexe. Lorsque la fréquence Josephson f_J (correspondant à la tension moyenne V) est égale à un multiple entier n de la fréquence de l'onde électromagnétique, le courant supraconducteur possède une composante continue non nulle, ce qui se révèle dans la caractéristique courant-tension de la jonction par des marches de tension constante, appelées marches de Shapiro, apparaissant à $V_n = n (h/2e) f$ (fig. E1b). La largeur et la position de ces marches de tension sur l'axe des courants dépendent des caractéristiques physiques de la jonction et de la puissance micro-onde ; cependant, la valeur de la tension ne dépend que de la fréquence externe et de constantes fondamentales, au travers de la constante de Josephson K_J , théoriquement égale à $2e/h$. La fréquence pouvant être générée avec grande exactitude grâce aux horloges atomiques, les jonctions Josephson sont utilisées comme les références de tension pour la conservation du volt.

La révolution quantique vers le nouveau SI

Les découvertes successives de deux effets quantiques, l'effet Josephson en 1962 [2] et l'effet Hall quantique en 1980 [3] (voir les encadrés 1 et 2), ont très rapidement été exploitées pour réaliser des étalons de tension et de résistance qui se sont révélés incomparablement plus stables que l'ensemble des étalons matériels qui servaient pour la conservation du volt et de l'ohm, telles que les piles Weston et les résistances bobinées.

Dans ces deux effets quantiques, sous certaines conditions, la tension et la résistance acquièrent des valeurs quantifiées (voir les encadrés). Dans le cas de l'effet Josephson, les tensions quantifiées sont directement proportionnelles à la fréquence d'une onde électromagnétique par l'intermédiaire de la constante de Josephson K_J . Dans le cas de l'effet Hall quantique, les plateaux de résistance correspondent à des sous-multiples de la constante de von Klitzing, R_K . L'universalité et la reproductibilité des constantes phénoménologiques K_J et R_K ont été démontrées en comparant différents matériaux avec des incertitudes extrêmement faibles ($< 10^{-10}$). Plusieurs travaux théoriques (voir les références dans l'article de revue de W. Poirier *et al.* [4]) ont justifié leur lien aux constantes e et h et leur caractère universel.

Depuis 1990, les deux effets quantiques sont utilisés dans les laboratoires de métrologie pour la conservation du volt et de l'ohm avec des valeurs sans incertitude K_{J-90} et R_{K-90} adoptées par convention, l'indice 90 se référant à l'année de mise en œuvre. Ces valeurs ont été introduites pour résoudre le dilemme entre la supériorité des phénomènes quantiques en terme de reproductibilité et les incertitudes élevées de 4×10^{-7} et de 1×10^{-7} attribuées à K_J et R_K dans le SI à cette époque-là. La mise en place de cette solution, qui découple assez largement les unités électriques du SI des expériences de mécanique, a eu un impact très positif sur la traçabilité des mesures électriques. D'un point de vue pratique, l'inconvénient le plus notable était l'obligation de réassigner leurs incertitudes à ces valeurs lors d'expériences impliquant des grandeurs au-delà du domaine électrique. La situation des unités électriques était avant tout inconfortable du point de vue de la cohérence d'ensemble du SI. C'est pourquoi d'énormes efforts

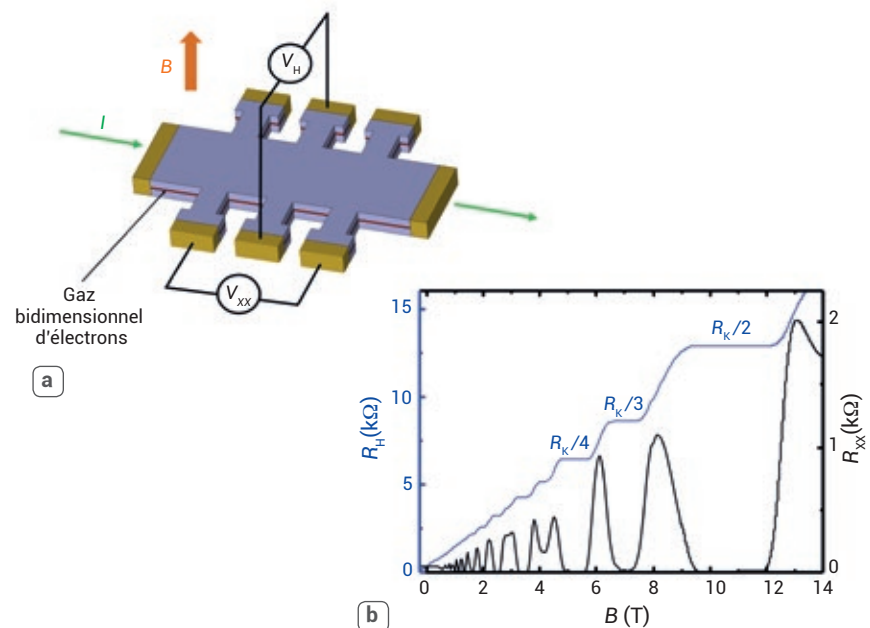
expérimentaux ont été fournis pendant vingt ans pour déterminer R_K et K_J avec les incertitudes les plus faibles possibles. Cela a permis d'écarter l'hypothèse d'éventuelles corrections à l'expression des constantes K_J et R_K en fonction de e et de h , $K_J = 2e/h$ et $R_K = h/e^2$, avec un niveau d'incertitude acceptable. De ce fait, depuis le 20 mai 2019, ces relations sont considérées comme exactes. D'autre part, les valeurs numériques sont déduites de valeurs fixées de e et de h . L'effet Josephson et l'effet Hall quantique sont donc devenus des réalisations SI du volt et de l'ohm, et l'incohérence du système est résolue. Les nouvelles valeurs des constantes $K_J = 483597,848416984$ GHz/V et $R_K = 25812,8074593045$ Ω s'écartent respectivement en valeurs relatives de -1×10^{-7} et de $+1,8 \times 10^{-8}$ des valeurs conventionnelles fixées en 1990. Bien que ces écarts soient significatifs par rapport aux incertitudes des mises en œuvre de ces étalons quantiques, ces changements sont à peine visibles dans les étalonnages réalisés dans les laboratoires nationaux de métrologie lorsqu'on tient compte de la stabilité des étalons secondaires.

La définition de l'ampère liée à la charge élémentaire permet également de nouvelles mises en pratique, comme l'application directe de la loi d'Ohm à partir des étalons quantiques de tension et de résistance. Une telle mise en œuvre, impliquant un amplificateur supraconducteur de très grande exactitude, permet aujourd'hui d'atteindre des incertitudes de l'ordre de 10^{-8} , soit un ordre de grandeur plus faible qu'avec l'ancienne définition [5]. Il est par ailleurs possible d'envisager le développement d'un étalon quantique de courant basé sur des dispositifs mono-électroniques qui permettent de synchroniser, à une fréquence externe, le passage des électrons un par un dans des dispositifs de taille nanométrique à très basse température. Cependant, ces étalons ne peuvent fournir pour le moment que des courants de l'ordre de la centaine de picoampères, limitant les incertitudes à quelques 10^{-7} .

Plus généralement, les étalons quantiques serviront pour les mises en pratique de nombreuses unités comme le farad et le kilogramme (*via* la balance de Kibble), avec des incertitudes de l'ordre de 10^{-8} . Au-delà du domaine électrique, la nouvelle définition du kelvin fondée sur la constante

L'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique a été découvert en 1980 par Klaus von Klitzing [3], qui envisagea aussitôt son application à la métrologie. Dans une barre de Hall, fabriquée à partir d'un gaz d'électrons bidimensionnel, comme celui formé dans le graphène ou à l'interface d'une hétérostructure semi-conductrice GaAs/AlGaAs (fig. E2a), l'effet Hall quantique se signale à très basse température et à très fort champ magnétique par la quantification de la résistance transverse ou résistance de Hall, $R_H = R_K/i$, à des sous-multiples entiers i de la constante de Klitzing R_K , théoriquement égale à h/e^2 . Simultanément, la résistance longitudinale R_{xx} s'annule, révélant l'absence de dissipation dans le gaz bidimensionnel (fig. E2b). Cet effet quantique macroscopique repose sur la quantification du mouvement cyclotron des électrons et de la densité d'états en niveaux discrets sous champ magnétique. Le transport électronique est lié à un nombre entier d'états unidimensionnels non dissipatifs.



E2. (a) Représentation schématique d'une barre de Hall réalisée dans un gaz d'électrons bidimensionnel obtenu dans GaAs/AlGaAs. Lorsqu'un courant I est imposé dans la barre selon la grande longueur, la résistance longitudinale R_{xx} est définie comme le rapport de la chute de tension V_{xx} au courant, et la résistance de Hall R_H comme le rapport de la tension V_H au courant. L'effet Hall quantique se manifeste lorsque le gaz d'électrons est soumis à un champ magnétique perpendiculaire B .

(b) Courbes de magnétorésistance typiques mesurées dans une barre de Hall en GaAs/AlGaAs, à basse température et jusqu'à fort champ magnétique. R_H est la résistance de Hall et R_{xx} est la résistance longitudinale (par carré). Les plateaux formés par R_H et la faible valeur de R_{xx} aux mêmes champs magnétiques B que ces plateaux sont les manifestations de l'effet Hall quantique

de Boltzmann k peut également être mise en œuvre en exploitant les fluctuations de tension dans un conducteur, dues à l'agitation thermique des électrons (bruit Johnson-Nyquist d'une résistance relié à k). La mesure de l'amplitude de ces fluctuations avec un étalon à effet Josephson permet de déterminer la température à partir de e , de h et de k .

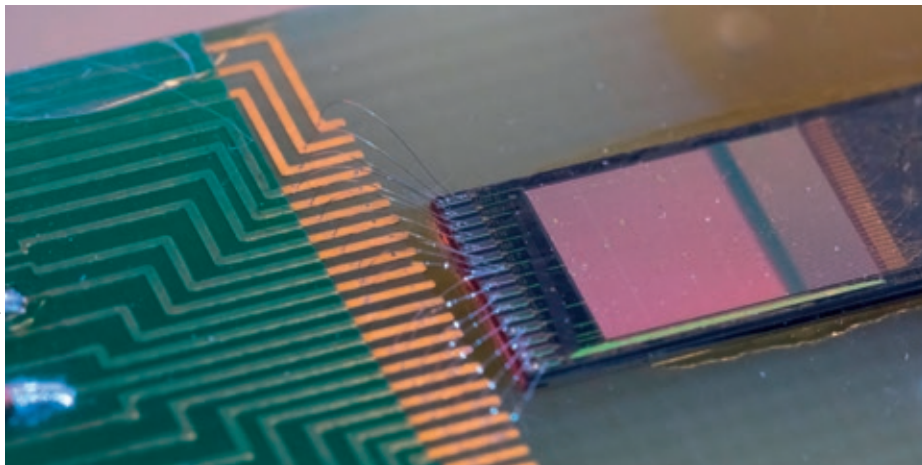
Étalons quantiques et perspectives

Les étalons quantiques utilisés actuellement pour la conservation des unités électriques sont issus de grands progrès technologiques et sont des dispositifs assez éloignés des systèmes utilisés pour les premières démonstrations expérimentales des effets.

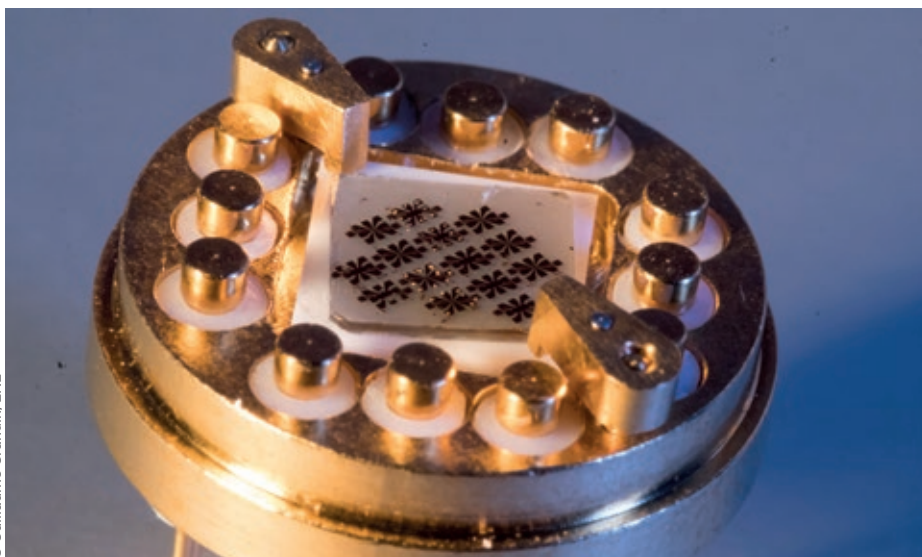
Les étalons de tension Josephson consistent ainsi en la mise en série de centaines de milliers de jonctions Josephson (fig. 2). Ce nombre élevé est nécessaire pour atteindre des tensions de plus de 10 volts, d'intérêt pour les utilisateurs, car une seule jonction fonctionnant à 10 GHz ne génère que 20 μV . Ces étalons s'appuient sur des circuits supraconducteurs complexes, superposant tensions continues et micro-ondes et nécessitant une grande homogénéité des paramètres des jonctions Josephson. Les étalons de tension Josephson programmables sont des réseaux divisés en segments, chacun d'eux étant commandé par une source de polarisation en courant indépendante. Ils se comportent comme des convertisseurs numériques-analogiques. Ils permettent d'automatiser les applications en tension continue et de générer des tensions alternatives dans la gamme du kilohertz. D'autres réseaux, pilotés par des impulsions de courte durée (inférieure à la nanoseconde), permettent de générer des tensions alternatives jusqu'au mégahertz. Il existe, d'ores et déjà, des systèmes commerciaux qui autorisent une plus large diffusion vers les utilisateurs.

Les étalons de résistance, quant à eux, ont connu un renouveau ces dernières années avec un nouveau matériau, le graphène (fig. 3). Cette monocouche d'atomes de carbone organisés en réseau hexagonal de type nid d'abeille se révèle être très intéressante, car l'effet Hall quantique y est très robuste ; il a été notamment observé jusqu'à température ambiante. Avec ce matériau, il est possible de développer un étalon quantique de résistance quantifié aux meilleures exactitudes à plus faible champ magnétique, et avec des températures et des courants de mesure plus élevés que dans le cas du GaAs [6]. Les conditions de mise en œuvre sont alors beaucoup plus simples, ce qui facilite la dissémination de l'unité de résistance. Par ailleurs, des découvertes récentes, comme l'effet Hall quantique anormal dans des isolants topologiques, permettent d'envisager l'effet Hall quantique à champ nul à long terme.

Toutes ces avancées ouvrent la perspective de réaliser l'ensemble des grandeurs électriques sur de larges gammes de valeurs et de fréquences, dans des conditions expérimentales se simplifiant, et ce, directement à partir des étalons quantiques reliés à e et h . ■



2. Photographie d'un étalon de tension Josephson programmable 1 V contenant 8192 jonctions Josephson, fabriqué par le laboratoire national de métrologie allemand PTB. Le circuit supraconducteur où se trouvent les jonctions Josephson est à droite de l'image. Il est connecté à un circuit imprimé (à gauche de l'image) par des fils de soudure.



3. Quelques barres de Hall à base de graphène sur SiC, avec des contacts en Ti/Au. La plaquette est montée sur un porte-échantillon dédié aux mesures électriques.

Références

- 1• A.M. Thompson et D.G. Lampard, "A new theorem in electrostatics with applications to calculable standards of capacitance", *Nature* **177** (1956) 888-890.
- 2• B.D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", *Phys. Rev. Lett.* **1** (1962) 251-253.
- 3• K. von Klitzing, G. Dorda et M. Pepper, "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance", *Phys. Rev. Lett.* **45** (1980) 494.
- 4• W. Poirier *et al.*, "The ampere and the electrical units in the quantum era", *Comptes Rendus Physique* **20** (2019), <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.02.003>.
- 5• J. Brun-Picard *et al.*, "Practical quantum realization of the ampere from the elementary charge", *Phys. Rev. X* **8** (2016) 041051.
- 6• R. Ribeiro-Palau *et al.*, "Quantum Hall resistance standard in graphene devices under relaxed experimental conditions", *Nat. Nanotechnol.* **10** (2015) 965-971.

Le kelvin révisé et la constante de Boltzmann

Laurent Pitre (laurent.pitre@cnam.fr) et Mohamed Sadli (mohamed.sadli@cnam.fr)
Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam, 61 rue du Landy, 93210 Saint-Denis

Depuis le 20 mai 2019, l'unité de température thermodynamique, le kelvin, ne repose plus sur une valeur exacte de la température du point triple de l'eau, mais sur une valeur fixe de la constante de Boltzmann.

En 2018, le système international d'unités, ou Système international (SI), connaissait sa plus grande révolution depuis la mise en place du système de mètres-kilogrammes-secondes (MKS) avec la Convention du mètre de 1875. Désormais, les définitions de cinq des sept unités de base – le mètre, la seconde, le kilogramme, l'ampère et le kelvin – sont formulées à partir des constantes fondamentales dont les valeurs sont fixées, indéfiniment (sauf si un grand bouleversement dans les lois de la physique intervient). En particulier, l'unité de température thermodynamique, le kelvin, ne repose plus sur une valeur exacte de la température du point triple de l'eau (273,16 K) mais plutôt sur une valeur fixe de la constante de Boltzmann k ($1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$). Redéfinir le kelvin à partir de la constante de Boltzmann k , reliant la température thermodynamique au quantum d'énergie d'agitation thermique, va avoir comme principal avantage de ne favoriser aucune température ni aucune méthode pour sa mesure, alors qu'avec la précédente définition, il était toujours nécessaire de référer toute mesure de température (des très basses températures en dessous de 20 K à la pyrométrie au-dessus de 1000 °C) à la température du point triple de l'eau, 273,16 K.

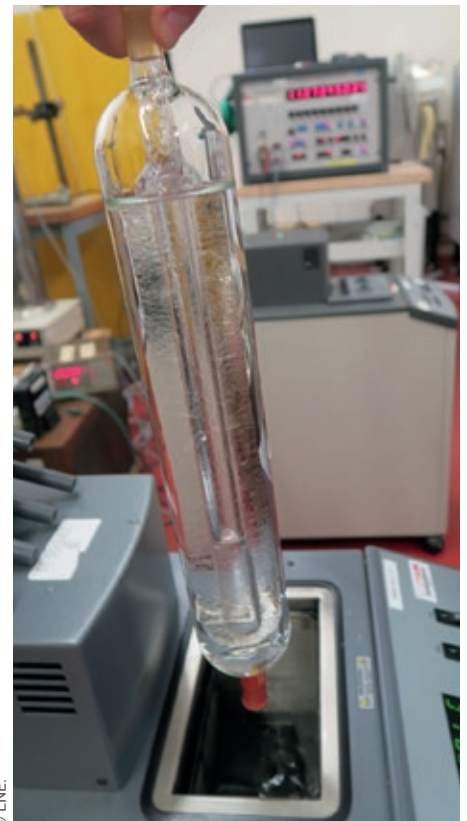
Un peu d'histoire

Historiquement, la température a été l'une des premières grandeurs physiques qu'on a cherché à mesurer pendant la Renaissance, à la fin du XVI^e siècle. Les

premiers thermomètres traçables et interchangeable ont été des thermomètres à dilatation d'alcool liés par construction au point de glace (aujourd'hui 0 °C). Ces thermomètres, très en avance sur leur temps, ont été développés par Torricelli et le duc Ferdinand II de Médicis [1] en 1650 (un siècle avant Celsius), suite au besoin de créer les premières stations météorologiques, établies aux alentours de la ville de Florence entre 1650 et 1665.

Alors que le besoin de connaître la température s'est exprimé si tôt et que la nature intensive de cette grandeur a dicté la nécessité d'une échelle constituée de repères répétables et pratiques, ce n'est que deux siècles plus tard que William Thomson (anobli ensuite et devenu Lord Kelvin) va concevoir une échelle qui permettra de décrire correctement la température dans les relations de la physique. En effet, les relations de la thermodynamique et de la physique statistique n'ont de sens que si la température est nulle lorsque les atomes et les molécules sont au repos absolu. En son honneur, l'unité de température va avoir comme nom le kelvin.

Ce n'est qu'au début du XX^e siècle que la communauté scientifique a commencé à travailler sur une échelle internationale de température définissant des repères de température sur tout le domaine, ainsi que sur des instruments (thermomètres) permettant d'interpoler entre ou d'extrapoler au-delà de ces repères, appelés points fixes. La température dans l'échelle devait être



1. Cellule point triple de l'eau, ancienne matérialisation de l'unité de température, désormais un point fixe comme les autres.

aussi proche que possible de la température thermodynamique, et c'est cette quête d'équivalence, voire d'égalité, qui a motivé les actualisations de l'échelle de température. Celles-ci se sont succédé jusqu'en 1990, à une cadence moyenne d'une vingtaine d'années et avec toujours le souci de garantir autant que possible une continuité de l'unité et des mesures.

Ainsi, pour redéfinir l'unité de température tout en assurant une transition douce, la mesure de la constante de Boltzmann, k , devait se faire au point triple de l'eau [2] (fig. 1).

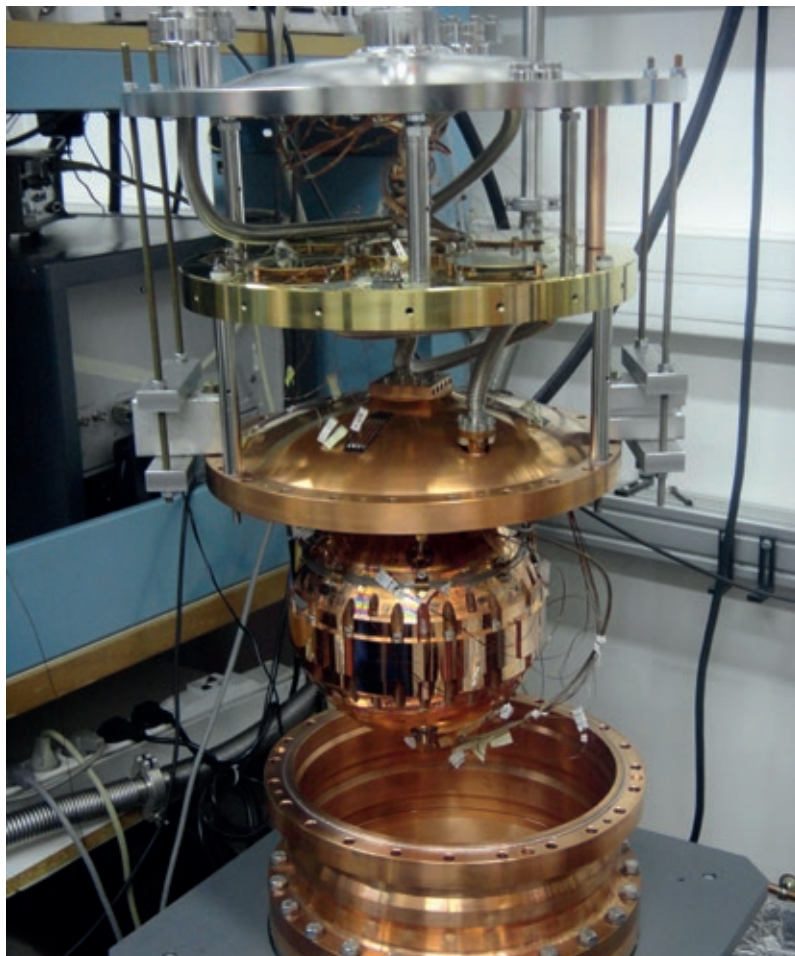
Détermination expérimentale de la constante de Boltzmann

La détermination expérimentale de k avec l'incertitude requise pour que la redéfinition n'altère pas notablement l'exactitude de la connaissance de la température, soit typiquement de l'ordre de 0,273 mK ou 10^{-6} en valeur relative, n'est pas chose aisée.

Des chercheurs du monde entier se sont attelés à cette tâche durant les dix dernières années en exploitant des lois de la physique dans lesquelles intervient soit le produit kT , soit le produit RT où $R = kN_A$ est la constante molaire des gaz (constante des gaz parfaits) et N_A la constante d'Avogadro. Il est à noter que l'incertitude relative sur N_A en 2017 étant de $1,2 \times 10^{-8}$, elle était négligeable devant celle de k ; les précisions sur les déterminations expérimentales de k et R sont donc essentiellement équivalentes.

La thermométrie des gaz parfaits, basée sur l'équation d'état $pV = nRT$ où n est la concentration molaire en gaz par unité de volume, ne pouvait convenir pour cette mesure : en effet, il est impossible de mesurer n et le volume V au niveau d'exactitude requis. Il en était de même pour la loi d'Einstein sur le mouvement brownien et pour la loi de Curie décrivant l'aimantation d'un échantillon. La loi de Planck pour le rayonnement de corps noir ne pouvait pas non plus être utilisée pour mesurer k au niveau d'exactitude requis à la température du point triple de l'eau ; cette méthode, qui repose sur des mesures radiométriques absolues de la densité spectrale de luminance d'un corps noir, est bien mieux adaptée au domaine spectral visible et donc aux très hautes températures (au-delà de 1000 °C).

Plusieurs autres lois pouvaient être utilisées pour déterminer la valeur de k , telles que celles qui associent la température à la vitesse du son et à la masse molaire (thermométrie acoustique à gaz), à la constante diélectrique ou à l'indice de réfraction (thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique), à la puissance de bruit électrique dans une largeur de bande donnée (thermométrie à bruit de Johnson) ou à la largeur spectrale d'une résonance d'absorption optique (thermométrie par mesure de l'élargissement Doppler). Notons que seules les trois premières méthodes étaient assez précises pour contribuer à la valeur qui a été fixée pour k [3].



© Laurent Pitre

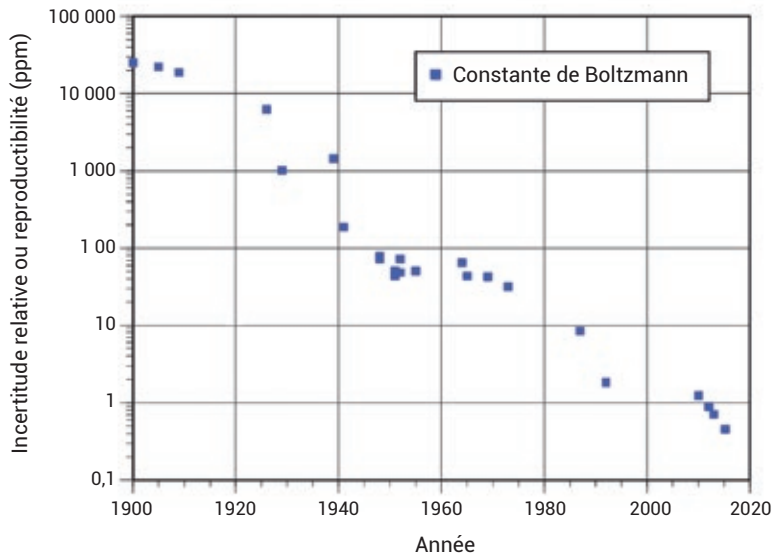
2. Résonateur sphérique utilisé par l'équipe du LNE-Cnam pour mesurer la constante de Boltzmann k par thermométrie acoustique. Le résonateur, dont le volume intérieur est de quelques litres, est rempli de gaz rare (hélium ou argon) et placé dans un cryostat. On mesure les fréquences acoustiques de ses modes d'oscillation radiale.

La mesure de k par thermométrie acoustique

La mesure de la constante de Boltzmann par voie acoustique, réalisée par notre équipe au LNE-Cnam, est basée sur le fait que la vitesse de propagation du son dans un gaz de composition connue (généralement un gaz rare tel que l'hélium ou l'argon) est fonction de la température et de la pression : c'est le principe de la thermométrie acoustique des gaz.

Atteindre la meilleure précision sur la mesure nécessite de prendre en compte les écarts par rapport au comportement du gaz idéal. Pour les gaz monoatomiques, où les capacités thermiques spécifiques à volume et pression constants sont indépendantes de la température, la vitesse acoustique u , extrapolée à pression nulle, est liée à la température thermodynamique T de manière simple : $u^2 = (5/3) RT / M$, où M est la masse molaire du gaz.

En pratique, la vitesse u est déduite des fréquences de résonance acoustiques du gaz dans un résonateur quasi sphérique dont le volume est de quelques litres. La figure 2 montre la photo d'un tel résonateur utilisé dans notre laboratoire, avant sa mise en place dans un cryostat. On mesure ces fréquences acoustiques pour des modes d'oscillation radiale, sous différentes pressions et à une température donnée. Les dimensions internes du résonateur sont mesurées par interférométrie optique, ce qui permet de relier les fréquences à la vitesse u . Cette vitesse est extrapolée à pression nulle ; on en déduit le produit RT et donc la constante de Boltzmann connaissant la température, la masse molaire du gaz, ainsi que la constante d'Avogadro. Toutes ces données sont suffisamment précises pour obtenir une incertitude globale sur k correspondant à l'objectif assigné, c'est-à-dire inférieure à 10^{-6} en valeur relative.



3. Évolution de l'incertitude relative de la mesure de la constante de Boltzmann au cours du temps. Le dernier point correspond à la mesure du LNE-Cnam : c'est la mesure la plus précise de cette constante, qui ne sera désormais plus mesurée.

Notre dernière mesure de k [4], avec une incertitude de $4,8 \times 10^{-7}$, a été la plus précise parmi celles prises en compte dans l'ajustement des constantes réalisé par le CODATA en 2017 [3]. Les principales composantes de l'incertitude étaient constituées de cinq éléments presque égaux. Cela signifie que la thermométrie acoustique des gaz a atteint une limite qui ne sera probablement pas dépassée avant de nombreuses années. En effet, pour

réduire encore cette incertitude, il faudrait travailler en parallèle pour réduire toutes les contributions de même niveau, ce qui est très difficile [5].

Cette mesure a joué un rôle important dans le choix de la valeur de la constante de Boltzmann qui a été fait pour redéfinir le kelvin. Elle a mis un point final à une longue série de mesures dont les premières datent des géants de la physique moderne (Planck, Einstein, Perrin), avec une incer-

Références

- 1• D. Camuffo et C. Bertolin, "The earliest temperature observations in the world: the Medici Network (1654–1670)", *Climatic Change* **111** (2012) 335–363.
- 2• L. Pitre, « Le kelvin, de l'artéfact à la constante de Boltzmann », conférence grand public dans le cadre des « jeudis de la mesure », 4 octobre 2018, LNE Paris. www.youtube.com/watch?v=OA1NMv2OCqQ
- 3• P.J. Mohr et al., "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* **55** (2018) 125–146.
- 4• L. Pitre et al., "New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas", *Metrologia* **54** (2017) 856–873.
- 5• L. Pitre et al., "Determinations of the Boltzmann constant", à paraître dans *C.R. Physique* (2019), DOI : 10.1016/j.crhy.2018.11.007.

titude de l'ordre de 10^{-1} qui n'a cessé de diminuer régulièrement jusqu'à aujourd'hui (fig. 3). D'un point de vue concret, les méthodes les plus à même de s'imposer pour mettre en pratique à l'avenir la nouvelle définition du kelvin seront les mesures de température thermodynamique par voie acoustique, telles que celle décrite ici, jusqu'à 500 °C, et par voie radiométrique, par des mesures reliées aux grandeurs électriques, au-dessus de 500 °C. ■

Quelques vidéos consacrées au nouveau Système international d'unités

De mai à novembre 2018, le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) a organisé à Paris un cycle de sept conférences dédiées à chacune des unités du Système international (SI).

Sur le thème « Évolution des unités de mesure : une révolution ? », ces conférences ont été l'occasion de présenter ces sept unités de mesure : leur histoire, leur nouvelle définition et les implications de ces redéfinitions.

Animées par les chercheurs du LNE et des laboratoires du Réseau national de la métrologie française, les vidéos de ces conférences (d'environ une heure chacune) peuvent être retrouvées sur la chaîne YouTube LNE : www.lne.fr/index.php/fr/actualites/videos-conferences-SI-unites-mesure

- « Le mètre, l'aventure continue... » - Marc Himbert
- « La candela, une touche d'humain dans les unités de mesure » - Gaël Obein
- « La mole : pourquoi une unité spécifique à la chimie ? » - Sophie Vaslin-Reimann
- « La seconde : vers une redéfinition » - Sébastien Bize
- « Le kelvin : de l'artéfact à la constante de Boltzmann » - Laurent Pitre
- « Le kilogramme : de l'artéfact à la constante de Planck » - Matthieu Thomas
- « L'ampère ou les unités électriques à l'ère quantique » - Wilfrid Poirier

On consultera également avec intérêt la vidéo de la séance publique du 16 novembre 2018 à Versailles, lors de la 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), qui s'est terminée par le vote unanime des représentants de 54 États en faveur du projet de résolution « Sur la révision du Système international d'unités (SI) » :

www.youtube.com/watch?v=qA67T7FPBME .

Cette séance comportait quatre conférences scientifiques :

- Klaus von Klitzing : "The quantum Hall effect and the revised SI"
- Jean-Philippe Uzan : "The role of the Planck constant in physics"
- Jun Ye : "Optical atomic clocks – opening new perspectives on the quantum world"
- Bill Phillips : "Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work"

Les instabilités hydrodynamiques dans les écoulements granulaires géophysiques

Sylvain Viroulet⁽¹⁾ (sylvain.viroulet@imft.fr), James L. Baker⁽²⁾, Andrew N. Edwards⁽³⁾ et J.M.N.T. Gray⁽³⁾

(1) Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 2 allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse

(2) School of Civil Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australie

(3) School of Mathematics and Manchester Centre for Nonlinear Dynamics, The University of Manchester, M13 9PL, Manchester, UK

De par le vaste champ d'applications qu'elle offre, l'étude des écoulements granulaires a connu une expansion considérable au cours de ces vingt dernières années, autant du point de vue industriel que géophysique. Ces écoulements granulaires ont une grande influence dans le monde qui nous entoure. Or, différentes instabilités hydrodynamiques peuvent naître en leur sein, entraînant alors des changements importants des propriétés mêmes de l'écoulement. Les instabilités dues à la ségrégation par taille de particules, le développement d'ondes de surface ou encore l'apparition de ressauts dans l'écoulement en sont des exemples marquants.

Le milieu granulaire

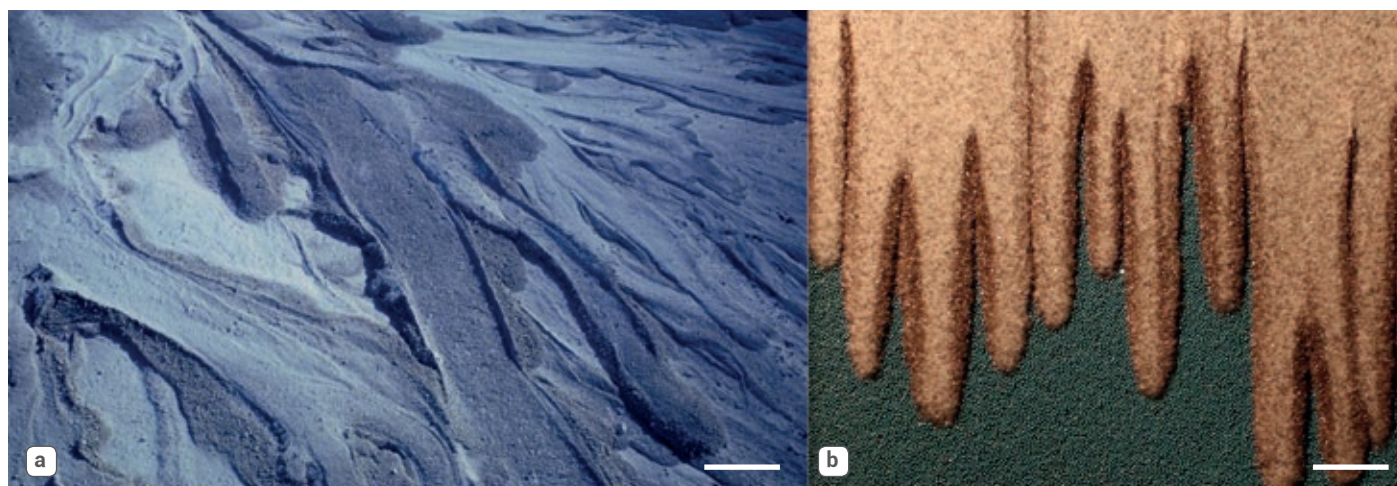
Un milieu granulaire peut être vu comme un ensemble de grains de tailles et formes différentes. Par souci de simplicité, nous considérerons ici uniquement des grains dont les tailles sont supérieures à 100 microns. En effet, pour des particules plus petites, les propriétés rhéologiques changent et on parle plus communément de poudres, voire de colloïdes pour des tailles inférieures au micron (voir Andreotti *et al.* [1] pour une présentation complète).

L'une des grandes particularités d'un milieu granulaire est qu'il peut exister sous plusieurs états en même temps au sein d'un écoulement. En effet, on parle d'état solide pour un tas de grains au repos, d'état gazeux lorsque les grains sont très agités et dilués et, entre ces deux cas extrêmes, se trouve l'état dit liquide décrivant des écoulements denses où les grains interagissent par collision et friction. C'est à cet état liquide que va être consacré cet article. En effet, apparenter un écoulement granulaire à un liquide va permettre de se rapprocher des études plus classiques de la mécanique des fluides et, en particulier, de celles portant sur les instabilités qui peuvent apparaître dans les écoulements à surface libre.

Les instabilités hydrodynamiques dans les écoulements granulaires

Les instabilités hydrodynamiques représentent un sujet varié et complexe de la mécanique des fluides, étant à l'origine d'un grand nombre de phénomènes se développant aussi bien à l'échelle planétaire que cellulaire. Ainsi, essayer de prédire leur formation et leur évolution a mobilisé l'attention de nombreux scientifiques depuis près de deux siècles. La majorité des instabilités hydrodynamiques peut être observée tous les jours et, si leur influence sur notre quotidien n'est pas toujours perceptible, elles peuvent néanmoins considérablement modifier le comportement des écoulements granulaires géophysiques.

Parmi elles, l'instabilité de « digitation », responsable de la formation de dépôts granulaires en forme de doigts est l'une des plus caractéristiques. Elle apparaît lorsque des grains de tailles et de propriétés différentes sont présents dans un écoulement. Ceci est particulièrement le cas dans des écoulements géophysiques, où la taille des particules peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Au cours de l'écoulement, les particules fines auront tendance à se



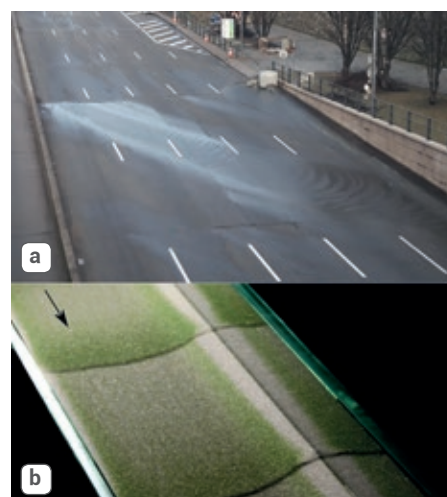
1. Instabilités de digitation. (a) Dépôts caractéristiques observés après l'éruption du mont Saint Helens en juin 1980 (photo Dan Miller et USGS). (b) Expérience de laboratoire montrant la déstabilisation du front d'un écoulement granulaire bidisperse le long d'un plan incliné. Les grosses particules (marron) migrent vers la surface puis vers le front de l'écoulement. Ayant une friction plus importante que les fines particules blanches, une instabilité de digitation apparaît (images tirées de Baker *et al.* [9]). La barre blanche représente une distance de 10 m sur la figure a) et 2,5 cm sur la figure b).

déplacer vers le fond en tombant dans les interstices entre les gros grains, tandis que les plus grosses vont migrer vers la surface. Ce phénomène est appelé « tamisage cinétique ». En raison de la friction au sol, les particules situées à la surface vont se déplacer plus vite que celles au fond. Ce cisaillement de vitesse, couplé au tamisage cinétique, va donner lieu à une accumulation des plus grosses particules au front de l'écoulement. Ce dernier, déstabilisé par les imperfections du sol, ne se propage pas de manière rectiligne dans sa direction transverse. Les grosses particules à la surface vont s'accumuler dans les creux de la déformation du front. Ayant des propriétés frictionnelles plus importantes que celles situées au fond de l'écoulement, ces particules vont ralentir la progression des creux et accentuer la déformation du front, formant ainsi des dépôts en forme de doigts : c'est l'*instabilité de digitation*. Celle-ci est illustrée sur la figure 1a, où l'on peut observer les formes caractéristiques des dépôts après l'éruption du mont Saint Helens aux USA en 1980. On remarque de longues et fines coulées en forme de doigts, avec des digues sur les côtés.

Une expérience de laboratoire est également présentée (fig. 1b), où un mélange granulaire de fines billes de verre sphériques et de particules de sable plus grosses s'écoule le long d'un plan incliné. La déstabilisation du front au cours de l'écoulement est clairement visible et l'on constate que les grosses particules (marron) sont localisées dans les creux du front et sur les bords des « doigts ». Ce phénomène

d'auto-endiguement des écoulements granulaires a une grande importance dans la prévention des risques. En effet, la formation de digues statiques parallèles à la direction de l'écoulement, principalement constituées de grosses particules, va contraindre l'écoulement en l'empêchant de s'étaler dans la direction transverse à celle de propagation, augmentant ainsi considérablement la distance sur laquelle il s'étend.

Une autre instabilité, semblable à celle se développant à la surface d'un film liquide sur un plan incliné, peut également exister dans les milieux granulaires. Les modifications de l'écoulement engendrées par cette instabilité peuvent avoir des conséquences importantes dans la prévention des risques naturels et la conception des infrastructures touchées. En effet, lorsqu'une couche granulaire s'écoule sur un lit rigide ou faiblement érodable, et si la pente est suffisamment forte, des ondes de surface peuvent se développer et se propager à des vitesses bien supérieures à celles de l'écoulement non perturbé. Le mécanisme d'apparition de ces ondes est le même, qu'il s'agisse d'un film liquide, d'une coulée de boue ou d'une avalanche (fig. 2). Il y a une compétition entre les effets dus à la gravité, qui auront tendance à stabiliser l'écoulement, et ceux dus à l'inertie du fluide qui amplifient les perturbations [2]. Si l'étude de cette instabilité date des travaux précurseurs de Kapitza et Kapitza [3], l'influence de la ségrégation par taille de particule sur les ondes se développant à la surface d'écoulements granulaires n'a



2. Ondes à la surface d'un liquide ou d'une couche granulaire s'écoulant sur un plan incliné. (a) Instabilité de type Kapitza se développant à partir d'une infiltration d'eau dans la route pendant la crue de la Seine (février 2018). (b) Expérience de laboratoire montrant l'apparition de vagues du même type dans un écoulement granulaire bidisperse constitué de billes de verre sphériques de diamètre 75-150 μm (blanc) et 200-250 μm (vert). La flèche représente le sens de l'écoulement (images tirées de Viroulet *et al.*, [4]).

que peu été étudiée. Une étude récente [4] a montré que les particules les plus grosses ont tendance à s'accumuler au front des vagues (fig. 2), augmentant d'autant plus leur potentiel destructeur. Cependant, si les propriétés des vagues engendrées dépendent de la concentration initiale de chaque espèce de particules, le critère d'apparition et le mécanisme de l'instabilité restent inchangés.

Enfin, lors d'écoulements géophysiques, les interactions avec la topographie du terrain sous-jacent vont avoir une influence déterminante sur la vitesse et la direction de l'écoulement. En effet, si dans les deux exemples précédents les écoulements étaient modifiés par des instabilités se développant en leur sein, ces instabilités sont très largement dominées par la topologie du terrain, un relief pouvant modifier brutalement la vitesse ou la direction de propagation de l'écoulement.

Une meilleure compréhension des interactions entre un écoulement granulaire sec et un fond solide présente également un grand intérêt, aussi bien dans la conception des protections contre les avalanches que dans les procédés industriels comme les tapis roulants transportant des matériaux. À l'instar des écoulements fluides, des chocs peuvent se créer dans les écoulements granulaires. Ces chocs ou ressauts hydrauliques sont très communs dans les écoulements à surface libre. Ils apparaissent lorsqu'un écoulement passe d'un régime où il est plus rapide que la propagation des ondes de surface, à plus lent. Cette transition s'accompagne d'une augmentation de la hauteur de l'écoulement afin de maintenir le débit.

Ces phénomènes peuvent être observés dans de nombreux endroits : près de piliers de ponts, dans les mascarets, ou plus simplement dans un évier lorsque le robi-

net est ouvert. Il a récemment été montré que des chocs stationnaires peuvent également être créés en amont d'une irrégularité topographique du sol, modifiant considérablement les propriétés de l'écoulement [5]. En l'absence de particules devant l'obstacle, l'écoulement décolle au niveau du sommet de ce dernier pour former un jet granulaire. Cependant, en ajoutant simplement une certaine masse de particules statiques devant le relief, il y a formation d'un choc stationnaire lorsque l'écoulement vient impacter cette masse de grains (fig. 3). Toutes les particules initialement présentes devant la bosse sont balayées lors de l'impact ; les propriétés du choc sont alors directement liées à la condition initiale en amont de l'écoulement.

Toutes ces instabilités vont donc drastiquement modifier les propriétés des écoulements géophysiques et plus particulièrement leur distance de propagation, cette dernière représentant le principal danger pour les populations et infrastructures. Des simulations numériques de cas extrêmes sont réalisées pour identifier des zones potentiellement dangereuses, afin de créer des cartes de risques. Il est donc primordial d'être capable de reproduire dans ces simulations les instabilités listées ci-dessus si nous voulons améliorer l'exactitude de ces cartes.

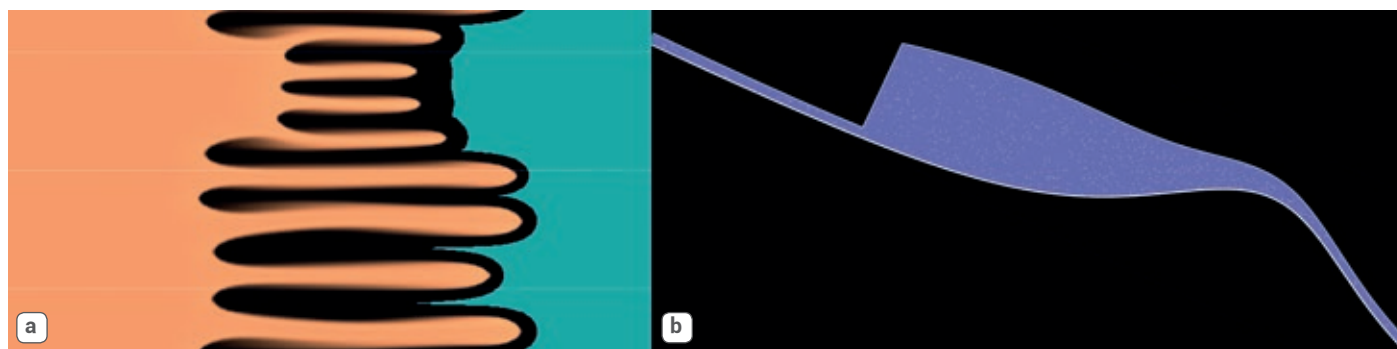
Résolution numérique : approche intégrée sur la profondeur

Les simulations numériques d'écoulements de fluides sont majoritairement basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes, équivalentes au principe fondamental de la dynamique de Newton appliqué à un fluide. À partir des années 2010, l'implémentation de la rhéologie dite « $\mu(I)$ » dans des codes résolvant les équations de Navier-Stokes a permis de reproduire de façon satisfaisante des expériences de laboratoire comme l'effondrement d'une colonne de grains [6]. Cette rhéologie reliant les contraintes normale et tangentielle au taux de cisaillement et à la pression au sein du milieu granulaire a été développée il y a une quinzaine d'années. Elle tire son nom d'un nombre sans dimension appelé nombre inertiel 'I', qui représente le rapport entre un temps microscopique de réarrangement et un temps macroscopique lié au cisaillement (voir Andreotti *et al.* [1] pour plus de détails). Cependant, résoudre ces équations avec une résolution suffisante sur des modèles de terrains est très coûteux en temps de calcul et demanderait des moyens colossaux pour appliquer cette méthode à des événements géophysiques.

Afin de simplifier les calculs numériques, des modèles ont été développés utilisant une approche où les paramètres de l'écoulement sont intégrés sur la profondeur de la couche granulaire. Ces modèles sont basés sur l'hypothèse selon laquelle l'épaisseur de l'écoulement est beaucoup plus faible que sa longueur caractéristique et que les vitesses verticales sont négligeables par rapport aux vitesses horizontales. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement peuvent donc être intégrées sur la profondeur, éliminant de ce fait une dimension et simplifiant drastiquement la résolution numérique. Cette approche, développée au 19^e siècle par A. J. C. Barré de Saint-Venant, a été très largement utilisée dans l'étude d'écoulements en eau peu profonde. Cependant, elle n'a été adaptée aux écoulements granulaires qu'au début des années 1990 [7] ; depuis, elle est massivement utilisée pour reproduire des événements géophysiques. Les premières simulations d'écoulements granulaires utilisaient un modèle de friction simplifié de type frottement sec ou de Coulomb, où l'on suppose que le coefficient de friction μ reliant les



3. Expérience de laboratoire illustrant la formation d'un choc stationnaire au sein d'un écoulement granulaire. Le choc est créé par l'ajout de particules en amont de la bosse, qui vont ralentir l'écoulement lors de l'impact. (D'après Viroulet *et al.* [4]).



4. Simulations numériques d'instabilités d'écoulements granulaires.

(a) Simulation numérique reproduisant l'instabilité de digitation observée en laboratoire (en noir les grosses particules, en beige les particules fines et en vert le fond rugueux), à comparer avec l'expérience de la figure 1b.

(b) Simulation numérique d'un choc stationnaire se développant en amont d'une anomalie topographique, comparable au résultat expérimental de la figure 3.

contraintes normales et tangentielles est constant. L'écoulement pouvait se propager à vitesse constante, accélérer ou ralentir si l'angle de la pente θ était respectivement égal, supérieur ou inférieur à un angle de friction valant $\tan(\mu)$. Malgré sa simplicité, cette approche permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans certaines conditions expérimentales, comme par exemple pour un écoulement sur pente lisse. Cependant, il est primordial de résoudre les équations dans un système de coordonnées représentant fidèlement la topographie. En effet, comme présenté précédemment, la topologie du terrain va grandement modifier l'écoulement. Le système d'équations obtenu est plus complexe, mais permet de mieux tenir compte des termes d'accélération dus à la topographie. Il a été montré récemment qu'une bonne prise en compte de celle-ci permet d'améliorer de manière significative la description de la dynamique du glissement et, notamment, de prédire l'existence de chocs dans l'écoulement en amont du relief [5].

L'approximation d'un coefficient de friction constant de type Coulomb n'est cependant plus valable lorsqu'il y a une forte friction à la base de l'écoulement. Dans ces conditions, il est nécessaire d'utiliser une loi rhéologique de type $\mu(I)$. Celle-ci fait apparaître, dans les équations intégrées sur la profondeur, un terme source supplémentaire semblable à un terme de type visqueux, dont la valeur est directement déduite des propriétés des matériaux impliqués dans le glissement [8]. Cette nouvelle prise en compte de la rhéologie $\mu(I)$ dans l'approche intégrée sur la profondeur a permis de prédire la fréquence de perturbation nécessaire à partir de laquelle les instabilités à la surface d'un

écoulement granulaire s'amplifient jusqu'à donner lieu à l'instabilité d'onde longue. De plus, l'ajout de ce terme visqueux dans la direction transverse à l'écoulement permet de modéliser la courbure du front entre deux parois et, de ce fait, d'améliorer la modélisation de l'instabilité de digitation [9]. Or, il semble paradoxal de modéliser les effets de ségrégation par taille de particules avec une approche qui néglige les vitesses verticales. C'est pourquoi une équation de transport incluant un terme de mélange des particules a été développée et introduite dans les équations intégrées sur la profondeur, permettant alors de reproduire les principaux mécanismes liés à la ségrégation par taille de particule [10]. La figure 4 représente différentes simulations numériques des instabilités présentées dans la partie précédente, en utilisant une approche intégrée sur la profondeur. On constate que les principales caractéristiques de chaque écoulement sont très bien reproduites par les simulations : en particulier, la déstabilisation d'un front en forme de doigts due à la ségrégation par taille de particules (fig. 4a) et la formation d'un choc stationnaire en amont d'une topographie en forme de bosse (fig. 4b).

Conclusion et perspectives

Au cours de ces vingt dernières années, l'intensification des études portant sur les matériaux granulaires a permis de mieux modéliser les écoulements géophysiques tels que les avalanches de neige ou les glissements de terrain. Dans la plupart de ces situations, les connaissances en mécanique des fluides « traditionnelle » ont servi de base à l'étude des écoulements

granulaires. Cependant, beaucoup reste à faire. De nombreux phénomènes présents au sein d'écoulements granulaires géophysiques sont encore mal compris à l'heure actuelle, et donc mal modélisés. Notons, par exemple, l'extrême mobilité des écoulements géophysiques. En effet, il est difficile d'obtenir numériquement les mêmes dépôts que ceux observés sur le terrain en utilisant des paramètres de friction déduits d'expériences en laboratoire. Ces paramètres de friction doivent être diminués de manière significative pour permettre aux simulations numériques d'atteindre les mêmes distances que celles observées sur le terrain.

Parmi les phénomènes potentiellement responsables de cette grande distance de propagation, on retrouve les échanges entre les quantités de matériaux érodés et déposés au cours de la propagation de l'écoulement. Ces échanges restent un facteur mal compris et cependant primordial à prendre en compte, comme l'ont montré des expériences en laboratoire. La transition entre les régimes statique et dynamique représentant les grains déposés/érodés dans les écoulements granulaires fait l'objet de nombreuses recherches à l'heure actuelle.

Une autre piste pouvant expliquer cette grande mobilité serait la dilatation ou la compression du milieu granulaire au cours de l'écoulement. En effet, tous les résultats présentés précédemment reposent sur l'hypothèse d'un écoulement granulaire incompressible. Or, c'est loin d'être le cas dans les écoulements géophysiques. Cette dilatation ou compression modifie de manière considérable la friction entre les grains et ainsi la rhéologie du milieu.

Les secousses géomagnétiques enfin reproduites et expliquées

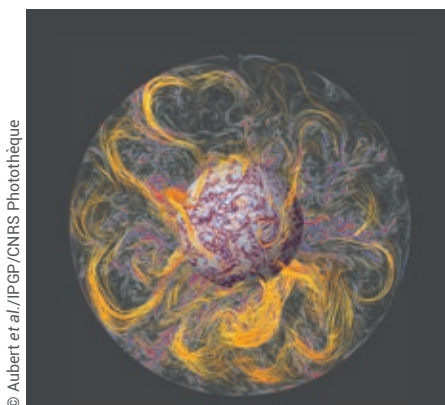
Extrait du communiqué de presse du CNRS (INSU) du 22 avril 2019

Enfin, dans la plupart des études portant sur les écoulements granulaires, l'influence d'un fluide environnant est négligée, bien que celui-ci puisse avoir des effets notables. Il a été montré à l'aide d'expériences et de mesures sur le terrain que le gaz présent dans les coulées pyroclastiques réduit drastiquement la friction entre les grains, permettant à l'écoulement de se propager sur des distances plus importantes. Aujourd'hui, une recherche active consiste à étudier les interactions entre un milieu granulaire et un liquide. À l'instar d'un gaz, la présence d'eau va complètement modifier la rhéologie du milieu en raison des forces de lubrification, de la formation de ponts capillaires ou encore de la viscosité du fluide. Une meilleure compréhension de ces écoulements en présence d'un liquide aura de nombreuses applications géophysiques sur les coulées de boues ou les effondrements de canyons sous-marins, par exemple.

Si la recherche sur les écoulements granulaires a connu un essor considérable ces dernières décennies, beaucoup reste encore à faire pour réussir à prédire avec précision le comportement de ces grains à l'échelle géophysique. ■

Références

- 1• B. Andreotti, Y. Forterre et O. Pouliquen, *Les milieux granulaires. Entre fluides et solides*, EDP Sciences (2011).
- 2• F. Charru, *Instabilités hydrodynamiques*, EDP Sciences (2007).
- 3• P. L. Kapitza et S. P. Kapitza, *Zh. Ekper. Teor. Fiz.* **19** (1949) 105. (Traduction en anglais dans *Collected Papers of P. L. Kapitza*, ed. D. Ter Haar (1965), pp. 690-709)
- 4• S. Viroulet et al., *J. Fluid Mech.* **848** (2018) 836-875.
- 5• S. Viroulet et al., *J. Fluid Mech.* **815** (2017) 77-116.
- 6• P.-Y. Lagrée, L. Staron et S. Popinet, *J. Fluid Mech.* **686** (2011) 378-408.
- 7• S. B. Savage et H. K. Hutter, *J. Fluid Mech.* **199** (1989) 177-215.
- 8• J. M. N. T. Gray et A. N. Edwards, *J. Fluid Mech.* **755** (2014) 503-534.
- 9• J. L. Baker, C. G. Johnson et J. M. N. T. Gray, *J. Fluid Mech.* **809** (2016) 168-212.
- 10• J. M. N. T. Gray, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **50** (2018) 407-433.



© Aubert et al./IPGP/CNRS Photothèque

1. Visualisation de l'intérieur du noyau terrestre, tel que modélisé dans une simulation numérique de la géodynamo (vue du plan équatorial et d'une surface sphérique près de la graine solide). Les ondes hydromagnétiques se propagent le long des lignes de force du champ magnétique (en orange), étirées par le cisaillement créé par la convection turbulente du noyau liquide (en bleu et rouge).

Initialement décrites en 1978, les secousses géomagnétiques sont des événements imprévisibles, rapides et intenses, qui accélèrent brutalement l'évolution du champ magnétique terrestre et faussent les prédictions de celui-ci à l'échelle de quelques années. Or, notre champ magnétique entre en jeu dans de nombreuses activités humaines, de la détermination du cap dans les téléphones mobiles au vol des satellites à basse altitude. Il est donc fondamental de pouvoir prédire son évolution avec précision.

Le champ magnétique de la Terre est produit par la circulation de la matière à l'intérieur de son noyau métallique liquide, à partir de l'énergie libérée lors du refroidissement du noyau. On connaît deux types de variations du champ magnétique : celles issues du mouvement lent de convection, que l'on peut relever à l'échelle d'un siècle, et celles issues des ondes hydromagnétiques « rapides », détectables à l'échelle de quelques années. On soupçonnait que ces dernières pouvaient jouer un rôle dans les secousses, mais leur mécanisme de propagation et d'amplification restait à élucider.

Pour résoudre ce mystère, Julien Aubert de l'Institut de physique du globe de Paris a développé avec Christopher Finlay de l'Université technique du Danemark une simulation informatique s'approchant au plus près des conditions physiques de notre noyau. Nécessitant l'équivalent de 4 millions d'heures de calcul, cette simulation a pu être réalisée grâce aux supercalculateurs du GENCI.

Les chercheurs ont ainsi pu reproduire la succession d'événements qui mène aux secousses géomagnétiques. Dans la simulation, celles-ci naissent à partir d'ondes hydromagnétiques émises en profondeur. Alors que ces ondes approchent de la surface du noyau, elles sont focalisées et amplifiées pour donner lieu à des perturbations magnétiques en tout point comparables aux secousses observées (fig. 1).

Voir la vidéo sur <https://webcast.in2p3.fr/player/5cb5b5a254e95?autostart=true>

[1] J. Aubert et C.C. Finlay, *Nature Geoscience*, **13** (2019) 393-398.

Contact

Julien Aubert, aubert@ipgp.fr

67^e CONGRÈS NATIONAL
DES PROFESSEURS DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

LA SCIENCE AU SOMMET

ENSEIGNEMENT
RECHERCHE
INDUSTRIE

GRENOBLE
28 ▶ 31
octobre
2019

Plus de renseignements : www.udppc.asso.fr/grenoble2019

UDPPC

JOURNÉES DE LA DIFFUSION
NEUTRONIQUE

JDN

MULTIDISCIPLINARY
SCIENCE WITH
NEUTRONS

ORGANIZERS:
Anne-Caroline Genix,
Julian Oberdisse
(U. Montpellier),
Yvan Sidis (LLB),
Guillaume Sudre (UCBL1)

DEADLINES :
June 1, 2019 >> Abstract
submission (oral or posters)
July 15, 2019 >> Registration

jdn2019@jdn-conference.net
www.jdn-conference.net

Domaine Le Hameau de
l'Etoile, Saint-Martin-de-
Londres

**SEPTEMBER
16-19**

Les Journées accélérateurs

Roscoff

2 - 4 octobre 2019

Thèmes
Présentations orales et posters

- Accélérateurs de hadrons
- Accélérateurs de leptons
- Accélération laser-plasma
- Technologie des accélérateurs
- Applications et aspects industriels

Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :
Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Rivol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Choi (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanhec (CEA/DAM),
Eric Giguet (ALSYM), Luc Perrot (IPNO)

<http://accélérateurs.sfpnet.fr/>

Evguenii Konstantinovitch Zavoïskii (1907-1976) et la découverte de la résonance paramagnétique électronique

Alexandre Semerok⁽¹⁾ (alexandre.semerok@cea.fr),
Edgar Soulié⁽²⁾ (edgar.soulie@cea.fr) et Natalia E. Zavoïskaya⁽³⁾

(1) SEARS, DEN, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

(2) Ancien ingénieur-chercheur au Département de physico-chimie du CEA/Saclay

(3) Historienne, fille de E.K. Zavoïskii

Evguenii Konstantinovitch Zavoïskii fut un éminent physicien expérimentateur russe.

En 1944, à Kazan en URSS, il réalisa l'expérience décisive de la découverte de la résonance paramagnétique électronique (RPE).

La RPE permet d'étudier la structure électronique de molécules paramagnétiques. Elle a un impact significatif en physique, chimie, minéralogie, biologie, médecine et physiologie.

Avec son talent original d'expérimentateur et sa profonde intuition physique, Zavoïskii a aussi mené des recherches brillantes sur la physique nucléaire, la fusion thermonucléaire contrôlée, l'électronique physique et les phénomènes rapides.

Sa jeunesse et les débuts de sa carrière scientifique

Evguenii Zavoïskii (fig. 1), né le 28 septembre 1907 dans la ville de Moghilev-Podolski (à l'époque dans l'Empire russe, actuellement en Ukraine, à 300 km au sud-ouest de Kiev), était le troisième des cinq enfants d'un médecin militaire et d'une enseignante d'école publique.

Lorsqu'il n'avait qu'un an, les activités professionnelles de son père incitèrent la famille à déménager à Kazan. Très jeune, Evguenii s'intéresse aux expériences de physique et de chimie. Ses parents (fig. 2) soutiennent et encouragent cet intérêt et cet enthousiasme. En 1919, son père Konstantin Zavoïskii meurt du paludisme à l'âge de 46 ans et, en 1921, à la fin de la guerre civile en Russie, la famille déménage à Slobodskoï (dans la région de Kirov) pour échapper à la famine qui sévit dans le pays ; elle y séjourne cinq ans.

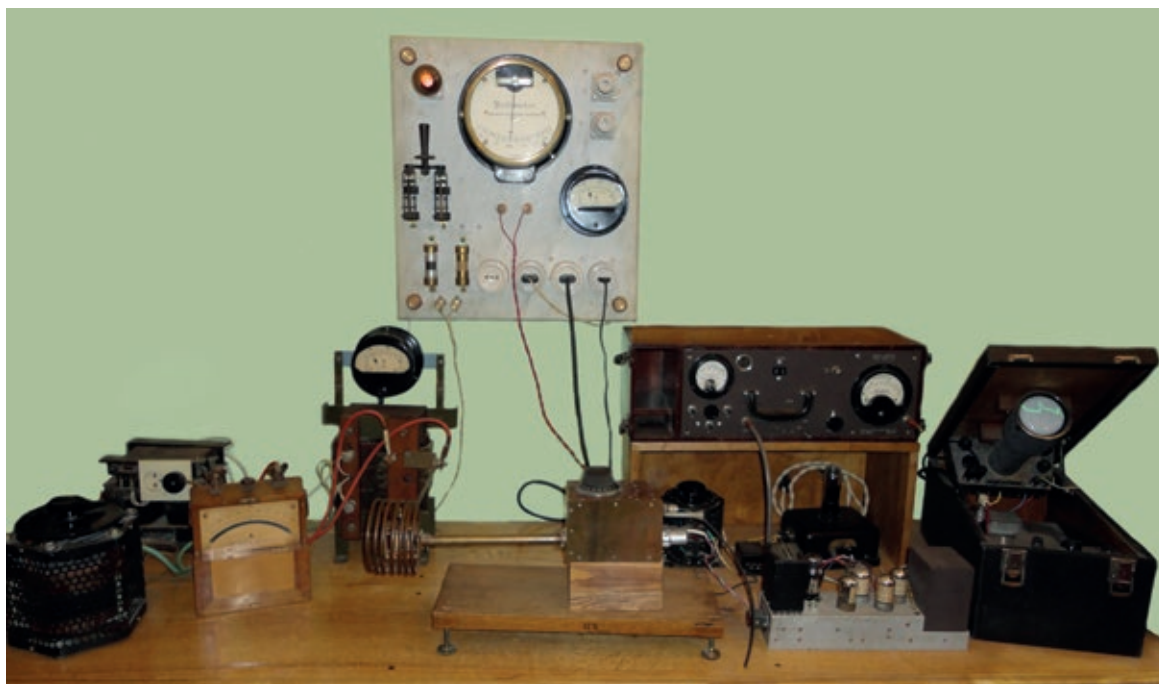
En 1926, après ses études à l'école secondaire, Evguenii passe l'examen d'entrée à l'Université de Kazan. Il participe activement aux associations physico-mathématiques de l'Université. À l'instigation du professeur V.A. Ul'yanin (1863-1931), il est envoyé à Leningrad, où il développe une nouvelle méthode de production d'ondes très courtes. En 1933,



1. Evguenii Konstantinovitch Zavoïskii en 1969.

il soutient sa thèse de doctorat et devient professeur associé et titulaire de la chaire de physique expérimentale de l'Université d'État de Kazan.

Dans les années 1933-1935, ses activités de recherche scientifique sont étroitement liées à la détection et à l'étude de l'interaction des rayonnements de radiofréquence élevée avec la matière. Zavoïskii fait de nombreuses expériences sur l'absorption résonnante de champs électromagnétiques



Reconstitution du spectromètre de RPE de Zavoïskii, effectuée par Igor I. Silkin, créateur et directeur du musée Zavoïskii à Kazan.



2. Famille de E. K. Zavoïskii en 1912.

De gauche à droite : Boris (1903-1937), Tatiana (1900-1978), Elizaveta Nikolaevna Zavoïskaya (née Egoroushkina-Kalashnikova, mère, 1880-1941), Evguenii (1907-1976) et Konstantin Ivanovitch Zavoïskii (père, 1873-1919). La quatrième enfant, Vera (1910-1979), est absent et le cinquième, Viatcheslav (1916-2001), n'est pas encore né.

radiofréquence par les liquides et les gaz et lance un programme d'études expérimentales sur les effets physiques et chimiques des radiofréquences ultracourtes (de longueur d'onde de l'ordre du mètre) sur la matière. Ses premières tentatives d'observation de la résonance électrique dans le domaine des radiofréquences échouent.

Premières études sur la résonance magnétique nucléaire (RMN)

En 1936, Zavoïskii suggère une méthode dite du « courant de grille » pour mesurer les potentiels d'excitation des atomes et des molécules [1]. Il présente les bases théoriques prouvant la possibilité d'exciter les molécules avec des électrons accélérés par des champs électriques à haute fréquence. Son modèle théorique a été validé par de nombreux résultats expérimentaux obtenus dans les gaz.

Zavoïskii et son collègue Boris M. Kozyrev confirment l'effet de l'absorption de rayonnement à haute fréquence (environ 56 MHz) dans les gaz, les liquides et les liquides gelés, et ils signalent l'augmentation du taux de chauffage lorsqu'on applique un champ magnétique constant [2]. Zavoïskii et Kozyrev ont prouvé

expérimentalement que cet effet peut témoigner de certains processus intermoléculaires et permet de révéler la structure moléculaire détaillée.

En 1940, Zavoïskii et ses collègues Semen A. Altshuler et Boris M. Kozyrev (fig. 3) montent une expérience destinée à mettre en évidence le phénomène de résonance magnétique des protons en phase condensée. Zavoïskii s'était inspiré des travaux du Néerlandais C.J. Gorter. Ce dernier avait tenté de déterminer le moment magnétique d'un noyau par la méthode calorimétrique, sans succès [3]. Zavoïskii et ses collègues utilisent la méthode dite du « courant de grille », beaucoup plus sensible que la méthode calorimétrique de Gorter. À la place de l'eau pure, ils utilisent des solutions de sels paramagnétiques et un système d'écoulement, afin de raccourcir le temps de relaxation du proton. En juin 1941, ils observent des signaux de résonance magnétique nucléaire (RMN). Les premières expériences ne sont pas reproductibles (en raison d'un défaut d'homogénéité du champ magnétique, non identifié à l'époque). Ils décident donc de ne pas publier leurs résultats.

Leurs recherches sont interrompues en 1941 à l'entrée en guerre de l'URSS. Les difficultés économiques, la pénurie de



3. De gauche à droite : Semen Altshuler, Evguenii Zavoïskii et Boris Kozyrev à Kazan en 1968. (Photo : Mikhail L. Blatt.)

certain matériaux nécessaires aux expériences et l'absence de soutien des membres de l'Académie des sciences de l'Union Soviétique, ont pour conséquence le démantèlement du dispositif expérimental construit par Zavoïskii. Cette décision est prise par l'Académie des sciences sous prétexte que le montage expérimental est trop simple pour permettre la confirmation de la découverte scientifique du phénomène fondamental de la RMN. Plus tard, Semen Altshuler et Boris Kozyrev écrivirent : « Si Zavoïskii avait eu deux à trois mois pour poursuivre ses expériences, il aurait identifié la raison de la mauvaise reproductibilité de ses résultats et l'existence de l'absorption par résonance magnétique des protons aurait été prouvée. » [4]

La découverte de la résonance paramagnétique électronique (RPE)

En 1943, Zavoïskii retourne à ses recherches expérimentales à l'Université de Kazan. Cette fois, il entreprend d'étudier la relaxation paramagnétique électronique de sels paramagnétiques de manganèse et de cuivre dans des champs magnétiques perpendiculaires (voir encadré, p. 42). Le dispositif expérimental artisanal construit pour les expériences de RMN était tout à

fait adapté à l'étude de la relaxation paramagnétique (voir la photo en haut de la page 39).

Zavoïskii conçoit et met en œuvre une méthode qui lui permet d'améliorer notablement la sensibilité de l'expérience. Il introduit une modulation du champ magnétique statique en ajoutant un champ magnétique alternatif parallèle au champ statique et ayant une fréquence beaucoup plus basse que celle du champ magnétique oscillant perpendiculaire au champ statique. En outre, le domaine des radiofréquences appliquées est étendu jusqu'à 100 MHz. Le 21 janvier 1944, Zavoïskii observe les pics d'absorption d'un champ d'ultra-haute fréquence dans des sels paramagnétiques soumis à un champ magnétique statique (fig. 4). Il découvre ainsi le phénomène de résonance paramagnétique électronique (RPE) en phase condensée et soumet un article pour publication le 12 juillet 1944, date officielle de la découverte de la RPE [5].

Cette découverte résultait d'une part de ses recherches antérieures sur la résonance magnétique nucléaire, d'autre part de son extraordinaire intuition et de son approche originale des problèmes scientifiques. Il n'est pas surprenant que ses collègues l'aient appelé « le génie de l'expérience ». Dans ses expériences de RPE, Zavoïskii utilisait des ondes dans la gamme des

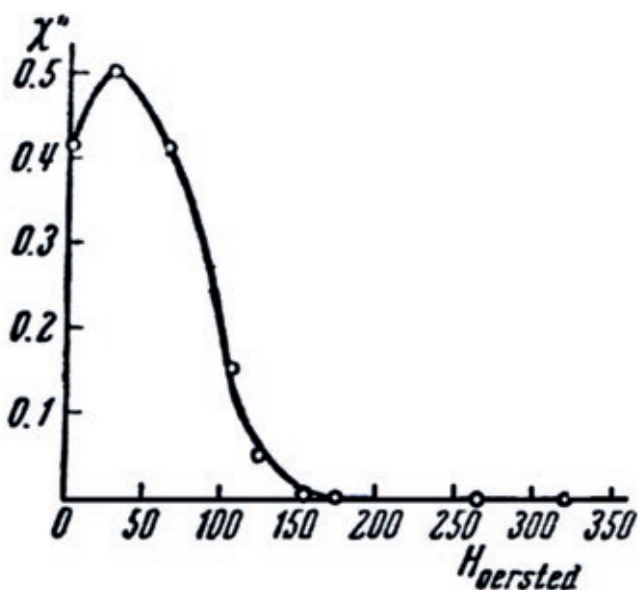
mégahertz. Après la Seconde Guerre mondiale, des générateurs de fréquences de l'ordre du gigahertz sont disponibles et permettent d'améliorer la sensibilité de la détection du signal de RPE.

Bien que le physicien britannique Brebis Bleaney ait parfois été crédité de la découverte de la résonance paramagnétique électronique, sa première publication sur la RPE [6] fut envoyée le 19 décembre 1947, plus de trois ans après celle de Zavoïskii.

De 1945 à 1947, les activités scientifiques extrêmement fructueuses de Zavoïskii sont à l'origine de nombreux projets reposant sur sa découverte de la RPE : il démontre expérimentalement les effets de l'antiferromagnétisme dans les phénomènes de résonance et découvre le phénomène de la résonance ferromagnétique. En 1948, il avait publié 18 articles sur la résonance et la relaxation paramagnétiques. Le livre de Boris Kochelaev et Youri Yablokov [7] offre une description très intéressante de l'histoire de l'Université de Kazan et des informations détaillées sur les premières recherches relatives à la résonance paramagnétique.

Plusieurs autres contributions scientifiques importantes

En 1947, Igor V. Kourtchatov invite Zavoïskii à le rejoindre à Moscou et à participer au projet atomique soviétique à Sarov (Arzamas 16 à l'époque de l'URSS) et aux recherches sur les processus très rapides de physique des rayonnements et de physique des plasmas [8]. Une méthode d'enregistrement de signaux lumineux extrêmement courts et faibles est développée selon les directives de Zavoïskii. À partir de cette époque, ses recherches et activités expérimentales ont porté sur un très vaste domaine : la détection des traces des particules ionisantes et ses applications ; la polarisation des faisceaux de particules et les cibles polarisées ; la fusion thermonucléaire contrôlée et la physique des plasmas ; le chauffage turbulent, etc. Des transducteurs électro-optiques multicas-cade pouvant mesurer une durée de signal comprise entre 10^{-14} et 10^{-12} seconde sont développés. Ces transducteurs furent ensuite appliqués en physique des plasmas, physique nucléaire, technologie laser, à l'astronomie et à la biologie.



4. Le premier spectre de RPE obtenu pour une solution de chlorure de manganèse tétrahydraté ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dans de l'alcool méthylique à la concentration de $0,175 \text{ g/cm}^3$, soumis à un champ magnétique statique H et à un champ magnétique oscillant perpendiculaire à H , de longueur d'onde 25 m à 300 K [5]. On observe un maximum de la puissance radiofréquence absorbée quand la fréquence correspondant à la différence d'énergie ΔE entre les niveaux de *spin* de l'ion de transition due à l'effet Zeeman est égale à celle du champ magnétique oscillant.

Zavoïskii développe une nouvelle méthode d'enregistrement des traces des particules ionisantes utilisant la chambre à traces de scintillation. Cette méthode est aussi le résultat du développement d'un dispositif original : un convertisseur à multichambre électro-optique sensible aux photons individuels. Cette technique extrêmement sensible d'enregistrement des images seuils ouvre de nouvelles possibilités pour les recherches en physique nucléaire, spectroscopie optique, astronomie, biologie, physique des plasmas et finalement en électronique quantique. En tant qu'authentique innovateur et grand enthousiaste des applications pratiques de ses résultats, Zavoïskii fait un grand travail de promotion de cette nouvelle technique auprès des physiciens, astronomes, biologistes et autres spécialistes. Il participe personnellement à la première utilisation expérimentale du convertisseur multichambre électro-optique sur un télescope à l'observatoire astrophysique de Crimée.

Zavoïskii conçoit une méthode de polarisation des faisceaux de particules chargées produites par des accélérateurs et participe à la conception de cibles polarisées pour des expériences de physique nucléaire.

À partir de 1958, Zavoïskii travaille sur le programme de la fusion thermonucléaire contrôlée. Dans ce cadre, il est le premier à utiliser la méthode électro-optique en spectrochronographie de plasmas. Avec ses collègues, il découvre le phénomène de la résonance magnéto-acoustique dans un plasma [9]. Il concentre ses efforts sur la recherche des mécanismes de dissipation de l'énergie dans le plasma, qui sont plus efficaces que les collisions de paires. Puis vient la découverte de la résistance anormalement élevée d'un plasma aux densités de courant élevées et le chauffage efficace de ce plasma, qui est à l'origine du développement rapide de recherches expérimentales et théoriques sur les interactions collectives et les processus non linéaires dans les plasmas [10,11]. Le phénomène du chauffage turbulent eut une importance significative dans le développement de la théorie des plasmas. Il est utilisé, en particulier, dans les méthodes de chauffage du plasma sans collision, qui sont largement appliquées dans les tokamaks modernes pour la fusion thermonucléaire.

Zavoïskii est le premier à indiquer la possibilité de chauffer un plasma dense jusqu'aux températures nécessaires à la fusion thermonucléaire avec des faisceaux d'électrons relativistes [12]. Cette sugges-

tion est à l'origine d'une conception radicalement nouvelle d'un réacteur de fusion thermonucléaire contrôlée. La mise en œuvre de cette idée est devenue l'une des pierres angulaires du programme de recherche sur la fusion en URSS et à l'étranger.

En 1972, bien que gravement malade, Zavoïskii poursuit ses études théoriques, cherchant inlassablement de nouvelles pistes de recherche scientifique. Il consacre beaucoup de temps et d'efforts à son travail pour l'Académie des sciences de l'URSS en tant que membre de différents conseils scientifiques.

Le 9 octobre 1976, E.K. Zavoïskii meurt d'une attaque cardiaque.

Une reconnaissance mondiale

Découverte par E.K. Zavoïskii, la résonance paramagnétique électronique (RPE) fait partie des découvertes scientifiques significatives du XX^e siècle. De 1959 à 1976, le nom de Zavoïskii a été proposé plusieurs fois pour le prix Nobel de physique et celui de chimie.

Les travaux scientifiques de E.K. Zavoïskii sont tenus en haute estime, et la reconnaissance de ses mérites par le gouvernement de l'Union Soviétique se manifeste par l'attribution de nombreux prix et médailles. En 1957, il reçoit le prix le plus prestigieux de l'URSS (prix Lénine) pour sa découverte de la RPE.

En 1969, une conférence scientifique internationale commémora le 25^e anniversaire de la découverte de la RPE à Kazan. Lors de cette conférence, le physicien français Alfred Kastler, lauréat du prix Nobel, déclare : « La Volga commence à partir d'un petit ruisseau, croît de plus en plus et se transforme finalement en un énorme fleuve, aussi plein que la mer. La même chose s'est produite avec la résonance paramagnétique. Elle a commencé avec une expérience modeste réalisée ici à l'Université de Kazan, il y a 25 ans. Dans les années qui ont suivi, elle s'est transformée en un énorme champ d'investigations et a entraîné des milliers d'expériences et de publications. »

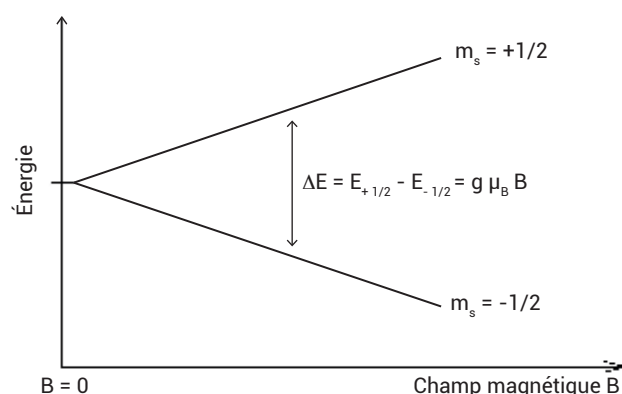
Les activités scientifiques pluridisciplinaires de E. Zavoïskii sont à l'origine d'une quantité de nouvelles informations et de données sur divers phénomènes physiques et sur les propriétés de la matière. Cependant, ce qui caractérise son travail

La résonance paramagnétique électronique

Pour comprendre le phénomène de résonance paramagnétique électronique, prenons le cas simple d'un ensemble de « radicaux libres », c'est-à-dire de molécules ayant chacune un électron « non apparié », dispersées dans un ensemble beaucoup plus grand de molécules diamagnétiques (non porteuses de moments magnétiques permanents). À chacun de ces radicaux libres est associé un moment magnétique, qui peut être considéré comme isolé des autres (grâce aux molécules diamagnétiques). L'ensemble de ces radicaux libres a un comportement **paramagnétique**.

L'électron non apparié a un *spin* $1/2$ et un moment magnétique associé $\mu = -g \mu_B \mathbf{S}$, où g désigne un facteur de décomposition des niveaux d'énergie électroniques appelé facteur de Landé, μ_B le magnéton de Bohr et \mathbf{S} le *spin* électronique, dont la projection m_s sur un axe peut valoir $+1/2$ ou $-1/2$. Pour un radical libre ou un électron, le facteur g a une valeur très proche de 2. L'échantillon est placé dans un champ magnétique homogène et statique d'intensité \mathbf{B} . Aux deux valeurs $+1/2$ et $-1/2$ du *spin* correspondent deux valeurs de l'énergie $+1/2 g \mu_B B$ et $-1/2 g \mu_B B$. Cette décomposition d'un niveau d'énergie sous l'effet du champ magnétique est appelée « effet Zeeman » (fig. E1). La différence d'énergie entre ces deux niveaux vaut $\Delta E = g \mu_B B$. La théorie statistique de Boltzmann s'applique à l'ensemble des *spins* et indique que ceux ayant l'énergie basse sont très légèrement plus nombreux que ceux ayant l'énergie haute. Le rapport du nombre de *spins* $+1/2$ au nombre de *spins* $-1/2$ vaut $\exp(-g \mu_B B / k_B T)$, où k_B désigne la constante de Boltzmann et T la température absolue. Si l'on soumet ce système à un second champ magnétique oscillant à la fréquence $\nu = \Delta E / h$ (où h désigne la constante de Planck) et **perpendiculaire** au champ magnétique statique \mathbf{B} , des radicaux libres dont le *spin* vaut $+1/2$ passent à l'état $-1/2$ et inversement. Du bilan énergétique non nul des changements d'état des *spins* électroniques, il résulte une absorption d'énergie par l'échantillon contenant ces *spins*.

À une fréquence de 9 gigahertz, correspond une différence d'énergie $\Delta E = 5,96 \cdot 10^{-24}$ joule ($3,7 \cdot 10^{-5}$ eV). Pour des électrons libres ou des radicaux libres (g très voisin de 2), le champ magnétique statique permettant la résonance magnétique vaut environ 0,3230 tesla, et le rapport entre les nombres des *spins* $+1/2$ et $-1/2$ vaut environ $\exp(-1,75 \cdot 10^{-3}) \approx 0,99825$ à la température ambiante (20°C). Ce nombre étant très proche de 1, la proportion des *spins* électroniques subissant un changement d'état est donc faible. Dans les spectromètres modernes, le changement d'état de certains *spins* électroniques induit une absorption des ondes hyperfréquence dans une cavité résonnante, qui est détectée grâce à un circuit électronique et produit un « signal de résonance ». Ce signal peut être enregistré en fonction de la valeur du champ statique \mathbf{B}



E1. Effet Zeeman et condition de résonance paramagnétique électronique.

appliqué. À son époque, Zavoïskii ne disposait pas des hyperfréquences (fréquences entre 1 et 100 gigahertz) et, pour améliorer la sensibilité de la détection de la résonance, il avait eu l'idée de moduler le champ magnétique statique \mathbf{B} à une fréquence beaucoup plus basse que la fréquence de résonance paramagnétique électronique et de détecter le signal à la fréquence de modulation. Ce procédé lui permit de réduire considérablement le « bruit électronique » affectant le signal détecté, et ainsi d'améliorer la sensibilité de la chaîne de détection du signal et de mettre en évidence la résonance paramagnétique électronique. Depuis cette époque, les spectromètres de RPE utilisent la modulation du champ statique à une fréquence pouvant être de 100 kilohertz et une détection synchrone.

L'application d'un champ magnétique oscillant à la fréquence $\nu = g \mu_B B / h$ à un échantillon contenant des radicaux libres a pour effet de tendre à égaliser les nombres de *spins* valant $+1/2$ et $-1/2$. À l'inverse, des processus de relaxation tendent à ramener ces nombres vers leurs valeurs à l'état d'équilibre de Boltzmann. Ces processus de relaxation sont non radiatifs et résultent du couplage entre les *spins* électroniques et les nombreux degrés de liberté des molécules impliquées. Pour que la résonance paramagnétique électronique soit détectée, il faut naturellement que les phénomènes de relaxation ne soient pas trop rapides. Pour des systèmes paramagnétiques tels que certains ions de métaux de transition ou de terres rares, le phénomène de résonance paramagnétique électronique ne peut être observé qu'à basse (voire très basse) température, lorsque les processus de relaxation sont suffisamment ralentis.

c'est non seulement son désir d'obtenir ces informations, mais aussi celui de développer de nouvelles méthodes physiques efficaces de recherche. Il n'est donc pas étonnant que Zavoïskii ait insisté sur le fait que la résonance paramagnétique n'est pas seulement un phénomène, mais surtout une nouvelle technique expérimentale utilisée en physique du solide, chimie, sciences de la vie et géologie. La RPE permet, par exemple, de caractériser les centres paramagnétiques comportant un élément de transition, une terre rare ou de l'uranium, ou encore des radicaux organiques dans de nombreux matériaux tels que les verres, oxydes, minéraux naturels, matériaux d'électrodes pour batteries, etc. Elle est également utilisée pour étudier la structure des protéines, la cinétique des réactions chimiques, le transfert d'électrons ou le transfert de *spin*. De nombreux laboratoires à travers le monde utilisent la RPE, et la référence [13] témoigne de l'extraordinaire diversité des applications de cette spectroscopie.

En 1977, la médaille et le prix de la Société Internationale de Résonance Magnétique (ISMAR) sont décernés à titre posthume à E.K. Zavoïskii, témoignant de son énorme contribution à la découverte de la résonance paramagnétique.

Le laboratoire mémoriel Zavoïskii est ouvert en 1997 à l'Université d'État de Kazan, où Zavoïskii fit la première observation de signaux de résonance magnétique de *spin*. Parmi les pièces exposées se trouve un appareil de résonance magnétique en état de marche (photo en haut de la p. 39), décrit par Zavoïskii dans ses notes de laboratoire.

E.K. Zavoïskii est considéré comme le fondateur de l'école de Kazan de la radio-spectroscopie magnétique. Ses idées et suggestions pour de futurs projets scientifiques furent extrêmement fructueuses. En 1984, son nom fut donné à l'Institut Physico-Technique de Kazan (KPhTI). ■

Les auteurs adressent leurs remerciements cordiaux à l'académicien Kev M. Salikhov et au professeur Alexey A. Kalachev (Institut Physico-Technique Zavoïskii) pour de fructueuses discussions, des commentaires et suggestions sur la découverte et les applications de la RPE. Ils remercient Igor I. Silkin, directeur du musée Zavoïskii à Kazan, pour son aide à l'organisation d'une visite du musée et pour la transmission de photographies faisant partie des archives du musée.

Références

(*) Pour la recherche des articles de E. K. Zavoïskii publiés (traduits) en anglais, il faut utiliser deux transcriptions de son nom, « Zavoïskii E. » ou « Zavoisky E. ».

- 1• E.K. Завойский, "Метод измерения потенциалов возбуждения атомов и молекул", *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики (ЖЭТФ)*, 6, n°1 (1936) 37-51. (« Méthode de mesure des potentiels d'excitation d'atomes et de molécules », *Journal de Physique Expérimentale et Théorique*, 1936).
- 2• E.K. Завойский, Б.М. Козырев, "О влиянии постоянного магнитного поля на нагревание водных растворов электролитов в поле высокой частоты", *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики (ЖЭТФ)*, 6, n°6, (1936) 612-614. (« Sur l'effet d'un champ magnétique constant sur le chauffage de solutions aqueuses d'électrolytes dans un champ haute fréquence », *Journal de Physique Expérimentale et Théorique*, 1936).
- 3• C.J. Gorter, "Negative result of an attempt to detect nuclear magnetic spins", *Physica III*, 9 (novembre 1936) 995-998.
- 4• С.А. Альтшулер, Б. М. Козырев, в книге *Чародей эксперимента: воспоминания об академике Е.К. Завойском*, Москва, Наука (1994), стр. 14, ISBN 5-02-00819-2. (*Le magicien de l'expérience : souvenirs sur l'académicien E.K. Zavoïskii*, Moscou, 1994, p. 14).
- 5• E.K. Zavoïskii, "Paramagnetic relaxation of liquid solutions for perpendicular fields", *J. Phys. Acad. Sci. URSS*, 9, n°3 (1945) 211-216.
- 6• B. Bleaney et B.P. Penrose, "Paramagnetic Resonance at Low Temperatures in Chromic Alum", *Proc. Phys. Soc.*, 60 (1948) 395-396.
- 7• B.I. Kochelaev et Y.V. Yablokov, *The beginning of paramagnetic resonance*, World Scientific Publishing Co., Singapour (1995).
- 8• Voir l'article de Yu. N. Smirnov, "Evgueny Konstantinovich Zavoisky – A Participant of the Soviet Atomic Project", dans *EPR Newsletter* 17, 4 (2008), p. 7.
- 9• A. P. Akhmatov et al., "Magnetoacoustic Resonance in a Plasma", *Soviet Physics JETP*, 12, n°3 (mars 1961) 376-381.
- 10• M.V. Babykin et al., "New Results in Turbulent Heating in a Plasma", *Soviet Physics JETP*, 19, n°2 (août 1964) 349-361.
- 11• E. K. Zavoïskii et L. I. Rudakov, "Turbulent Heating in a Plasma" (traduction de *Atomnaya Energiya*, 23, n°5 (novembre 1967) 417-431).
- 12• E.K. Zavoïsky, "Energetics in Fast Thermonuclear Processes", *Sov. Phys. Usp.*, 15 (1973) 841.
- 13• K. M. Salikhov, *The Treasures of Eureka*, Vol. 1. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoïskii Award", New Zealand, 2009, AXAS Publishing Ltd.

Le prix Zavoïskii

En 1991, un prix Zavoïskii (International Zavoïskii Award) a été créé par l'Institut Physico-Technique Zavoïskii de Kazan, l'Université fédérale de Kazan, le gouvernement de la république du Tatarstan et l'éditeur Springer Verlag. Ce prix, d'un montant de 5000 euros, récompense une application ou un développement majeur de la RPE, dans tout domaine scientifique. Il est reconnu par le Groupement AMPERE, la Société Internationale de RPE (EPR Society) et le présidium de l'Académie des sciences de Russie.

L'assemblée générale

du 19 janvier 2019

L'assemblée générale de la SFP s'est tenue le 19 janvier 2019 à l'École normale supérieure, 24 rue Lhomond, Paris, 5^e.

En début de séance, le secrétaire général, Jean-Paul Duraud, présente les résultats des élections (voir ci-contre). Les compositions du bureau et du Conseil d'administration 2019 sont données page 45.

Dans son rapport moral, Catherine Langlais remercie d'abord Michel Spiro, vice-président sortant, pour les nombreuses actions qu'il a initiées à la SFP depuis 2016, dans un esprit toujours constructif et bienveillant. Puis elle cite les principaux événements qui ont été organisés par la SFP en 2018 ou qui le seront en 2019 :

- les Olympiades de Physique France (avec l'UdPPC et l'UPS) ;
- le French Physicist's Tournament (avec l'Académie des sciences) ;
- les Rencontres Jeunes Physicien.ne.s (RJP) à Paris et Grenoble, qui se préparent également à Lyon ;
- les 16^{es} Journées de la Matière Condensée, qui se sont tenues en août 2018 à Grenoble ;
- la nuit de l'antimatière (en partenariat avec le CNRS et le CEA), organisée dans de nombreuses villes en France le 1^{er} avril 2019 (voir l'article, p. 46) ;
- et le Congrès général qui se tiendra en juillet 2019 à Nantes.

Puis la trésorière, Françoise Bourée, présente le bilan financier de l'année écoulée (compte de résultats analytique du 1/10/17 au 30/09/18) et le budget prévisionnel 2018-2019. Le compte de résultats présente un déficit réduit d'environ 30% par rapport à celui de l'exercice précédent. La présentation du budget prévisionnel (toujours en l'absence de dividendes d'EDP Sciences) anticipe un résultat final négatif, proche de celui de l'année écoulée. Il faut noter que l'augmentation de cotisation appliquée en 2017 n'a pas eu d'effet sur le nombre d'adhérents individuels SFP.

Par vote à main levée, l'AG approuve les rapports et le projet de budget.

L'assemblée générale se termine par l'allocution de Sylvie Rousset, vice-présidente entrante.

Elle est suivie d'un débat « Climat, énergie, environnement : où va-t-on ? ».

Résultats des élections

Approbation des membres du bureau (615 votants) : 580 oui, 11 non, 24 votes blancs.

Sont élus au Conseil d'administration pour trois ans (596 votants) :

Ducci Sara (469 voix)
Chauchat Anne-Sophie (450 voix)
Rezeau Laurence (447 voix)
Nones Claudia (446 voix)
Bracco Christian (385 voix)
Bergé Luc (342 voix)
Catoire Fabrice (317 voix)
Aubourg Philippe (311 voix)
Panizza Pascal (283 voix)

25^e Congrès général de la SFP

Cité des Congrès de Nantes,
du lundi 8 au vendredi 12 juillet 2019

Président du Conseil scientifique :
Jean Dalibard (Collège de France, Paris)

Président du Comité local d'organisation :
Jean-Luc Duvail (Institut des Matériaux
Jean Rouxel, Nantes)

Contact : congres2019@sfpnet.fr
Site internet : www.sfp2019.fr

Édition

Rapport d'activité 2018

Le Rapport d'activité 2018 de la SFP vient de paraître et peut être feuilleté ou téléchargé sur le site www.sfpnet.fr (onglet « LA SFP ») ou sur : <https://fr.calameo.com/read/00545614147b10bc43fc0>



Aux Conseils d'administration

des 11 avril, 15 juin, 3 octobre et 29 novembre 2018

Le CA du 29 novembre 2018 a approuvé la création d'une nouvelle commission de la SFP, « Histoire des sciences », placée sous la responsabilité de **Christian Bracco** (SYRTE, Observatoire de Paris). Il a ratifié la nomination de **Marios Petropoulos** (Centre de Physique Théorique de l'École polytechnique), nouveau président de la division de physique des champs et particules.

Lors de ses différentes réunions, le Conseil, après examen des propositions des jurys, a décerné les prix suivants :

- **Prix René Pellat 2018** : Anna Grassi (LULI, Palaiseau) ;
- **Prix Jeune chercheur Daniel Guinier 2017** : Vivian Poulin (Laboratoire de physique théorique d'Annecy-le-Vieux) (voir notice, p. 49) ;
- **Prix Jeune chercheur Saint-Gobain 2017** : Aurélie Hourlier-Fargette (Institut Jean Le Rond d'Alembert, Paris) (voir notice, p. 49) ;
- **Prix Friedel-Volterra 2018** : Francesco Sette (ESRF, Grenoble) ;
- **Prix Joliot-Curie 2018** : Stéphane Grévy (CEN de Bordeaux Gradignan) ;
- **Prix Louis Ancel 2018** : Anna Minguzzi (LPMCM, Grenoble) ;
- **Prix Jean Perrin 2018** : Azar Khalatbari (Sciences et Avenir).



Le bureau 2019



Catherine
LANGLAIS
Présidente



Sylvie
ROUSSET
Vice-présidente



Jean-Paul
DURAUD
Secrétaire général



Marc
LEONETTI
Trésorier



Olivier DULIEU
Secrétaire



Marc
STEHLE
Secrétaire



Titaina
GIBERT
Secrétaire




Alfonso
SAN MIGUEL
Secrétaire


Le conseil d'administration 2019




Philippe
AUBOURG




Luc
BERGÉ



Christian
BRACCO




Fabrice
CATOIRE




Caroline
CHAMPENOIS




Dominique
CHANDESRIS




Anne-Sophie
CHAUCHAT




Jérôme
COLIN




Sara
DUCCI




Jean-Luc
DUVAL




Stéphanie
ESCOFFIER




Jean-Michel
GÉRARD




Maxime
HARAZI



Pascale
LAUNOIS




Renaud
MATHEVET




Claudia
NONES




Pascal
PANIZZA



Laurence
REZEAU




Débora
SCUDERI



Louison
THORENS



Guy
WORMSER



Pauline
ZARROUK



La nuit de l'antimatière

Le 1^{er} avril 2019 a eu lieu la nuit de l'antimatière, une manifestation organisée conjointement par la Société Française de Physique, le CNRS et le CEA, en partenariat avec le magazine *Sciences et Avenir*. Cette soirée festive, qui s'est tenue dans treize villes de France, avait pour but d'informer le grand public et le public scolaire sur tous les aspects de l'antimatière, objet de nombreuses recherches et source de beaucoup d'applications. Cette opération s'est inscrite dans le cadre des 80 ans du CNRS et dans l'Année Internationale de la Chimie.

Elle a été précédée d'une mobilisation des scolaires autour du thème de l'antimatière *via* des concours à dominance artistique (nouvelles, bandes dessinées, photos-vidéos-images), ainsi que d'une séance de travaux pratiques (TP) itinérante en région Rhône-Alpes. Ce TP, qui permet de mesurer l'annihilation d'un positron issu d'une source radioactive de sodium 22 grâce à l'émission de deux photons de 511 keV, a connu un vif succès. Il sera à nouveau proposé l'année prochaine, et d'autres académies envisagent de le reproduire.

Le palmarès des concours a été rendu public lors de la soirée du 1^{er} avril par la présidente de la SFP, Mme Catherine Langlais, et a récompensé :

- deux élèves du lycée Roland-Garros dans l'île de La Réunion pour le concours « nouvelles », avec un texte intitulé « Il était une pomme d'antimatière » (voir l'encadré) ;
- un groupe de quatre élèves du lycée Champollion de Grenoble pour le concours de bandes dessinées, avec une BD intitulée « Tom l'astronaute » ;
- et une élève de l'École Boule à Paris pour le concours « images » (fig. 1).

Ces concours ont ainsi largement dépassé les limites de la métropole.

Les contacts noués en amont de la soirée ont permis de conclure un partenariat avec le journal *Sciences et Avenir*, qui a relayé l'information sur son site Internet et *via* ses réseaux sociaux. Ils ont également conduit à deux émissions radiophoniques à grande écoute sur France Inter (La Tête au carré) et France-Culture (Objectif Sciences) le 1^{er} avril.

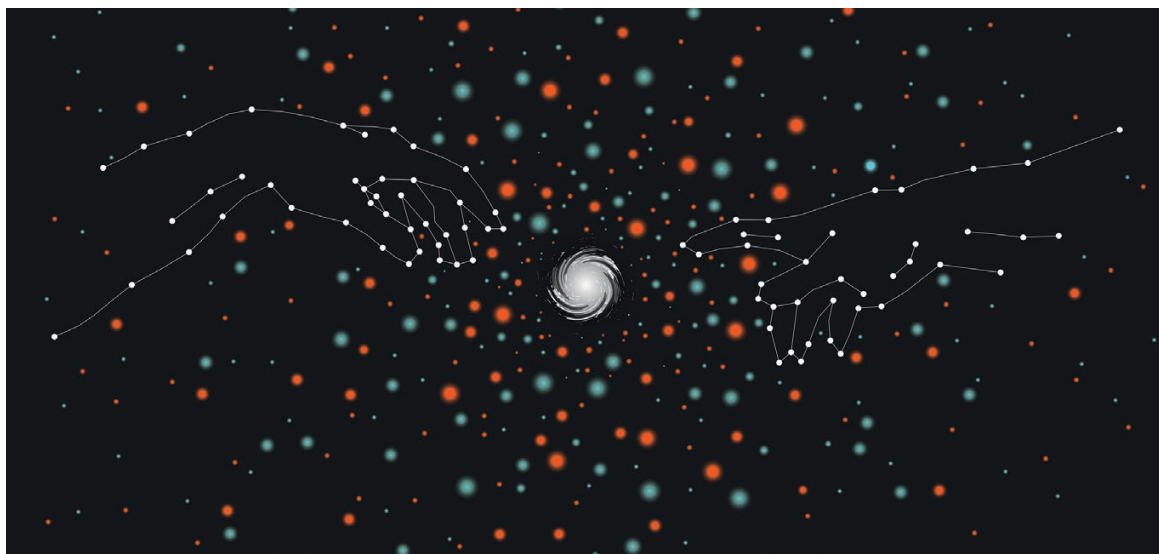
Notre collègue Johann Collot a, de son côté, été invité à la télévision grenobloise. Encore plus inattendu, la première page du journal gratuit *20 Minutes*, qui tire à 900 000 exemplaires et est diffusé dans de nombreuses villes en France, parle avec humour d'« antimatière à réflexion ».

Toutes les conditions étaient donc réunies pour assurer un très bon remplissage des salles dans les treize villes participantes : Annecy, Bordeaux, Caen, Clermont-Ferrand, Dijon, Dunkerque, Grenoble, Limoges, Lyon, Orléans, Paris, Poitiers, Strasbourg, soit au total environ 4000 personnes, dont 1600 à Paris (fig. 2) et 800 à Grenoble. Cette mobilisation nationale exceptionnelle a été obtenue grâce au dynamisme des responsables des sections locales de la SFP : qu'ils en soient remerciés ! La nuit de l'antimatière a été également très largement suivie sur les réseaux sociaux (16 000 spectateurs !), où de sympathiques volontaires ont répondu toute la soirée aux questions des auditeurs, ainsi que sur le *webcast* (500 spectateurs).

La soirée du 1^{er} avril a commencé à 18 h 30 par des conférences scientifiques dans chaque salle, qui ont expliqué les différents aspects de la recherche sur et avec l'antimatière. Les subtiles différences observées en laboratoire entre particules et antiparticules, si elles sont bien conformes aux prédictions du modèle standard, ne sont pas en mesure d'expliquer l'asymétrie évidente observée : depuis le monde qui nous entoure jusqu'aux confins de l'Univers, la matière a pris le pas sur l'antimatière !

Le programme de recherche sur les propriétés spectroscopiques et surtout gravitationnelles des anti-atomes d'hydrogène produits au CERN a également permis de faire rêver le public : et si jamais l'antimatière « antigraitait », c'est-à-dire était repoussée par la masse de la Terre (!), ou au moins se comportait différemment de la matière ordinaire ?

À 20 heures, tous les sites se sont interconnectés par vidéo. Cette deuxième partie de soirée a débuté par la visite en direct du complexe de production d'anti-atomes d'hydrogène du CERN (Genève). Les aléas du direct ont quelque peu perturbé cette visite, la qualité du son ayant laissé à désirer. La visite de la caméra à positrons TEP de l'hôpital d'Annecy et celle du laboratoire CEMHTI d'Orléans, où se pratique l'analyse de surfaces par positronium, ont montré comment l'antimatière pouvait être « domestiquée » pour rendre d'éminents services dans la vie de tous les jours.



1. Cette image, réalisée par Lucille Labuzan, élève en BTS Design d'espace à l'École Boulle (Paris), a reçu le premier prix du concours « photos-vidéos-images ». Inspirées de la peinture de Michel-Ange à la Chapelle Sixtine, les deux mains pointent vers l'énergie (spirale blanche) résultant de l'annihilation de la matière et de l'antimatière, représentées respectivement par les points de couleurs orange et cyan.



2. Le nombreux public de la salle de spectacle Le Grand Rex à Paris, attentif pendant la conférence scientifique à plusieurs voix animée par la journaliste Azar Khalatbari de *Sciences et Avenir* (prix Jean Perrin 2018 de la SFP), avec Marie-Hélène Schune (propriétés comparées des particules de matière et d'antimatière), Étienne Parizot (l'antimatière dans le cosmos) et Pauline Comini (mesure des propriétés gravitationnelles des anti-atomes d'hydrogène).

Le *quizz*, formé de dix questions avec chacune quatre possibilités de réponses, dont certaines loufoques et d'autres beaucoup plus sérieuses, a permis de balayer d'autres propriétés de l'antimatière dans une ambiance ludique très dynamique. C'est Orléans qui a emporté la compétition, en battant Clermont-Ferrand au poteau et en répondant juste à toutes les questions ! Du coup, l'heureux vainqueur de la tombola organisée là-bas a gagné un voyage au CERN !

Pour finir, une table ronde sur les liens entre science et science-fiction, notamment bien sûr autour de l'antimatière, a clôturé cette soirée. Animée par Raphaël Granier de Cassagnac, physicien des particules et auteur de science-fiction, elle réunissait Laurent Genefort (littérature), Marc-Antoine Mathieu (bandes dessinées) et Roland Lehoucq (astrophysique et cinéma). Les participants ont montré le rôle central de l'antimatière dans l'imaginaire de la science-fiction des années 1950 comme moyen de transport, arme ou source d'inspiration poétique et même philosophique.

Il était une pomme d'antimatière...

Léa-Maria Rabour et Tatiana Le Bellec, élèves de terminale S au lycée Roland-Garros de la commune du Tampon dans l'île de La Réunion, ont reçu le premier prix du concours « nouvelles » pour un texte intitulé « Il était une pomme d'antimatière... », dont les premières lignes sont données ci-dessous.

C'était une après-midi d'été. Je m'étais assise sous un pommier. Eliott et Théa, mon cadet et sa jumelle, me regardaient. Ma petite sœur somnolait. D'une petite voix timide, elle s'aventura :

« *Garance, tu pourrais nous raconter une histoire ?* »

Je n'avais pas d'idée mais je lui souris et hochai la tête. Et si je lui parlais de physique ?

« *Tu aimerais une histoire de particules, Théa ?* »

Elle eut l'air étonnée mais acquiesça. Alors, je commençai.

La suite sur le site : <http://lycee-roland-garros.ac-reunion.fr/2019/03/25/il-etait-une-pomme-dantimatiere/>

Les différentes présentations et le *press-book* de cette manifestation seront disponibles sur le site www.nuit-de-l-antimatiere.fr.

La vidéo de la soirée parisienne, qui s'est déroulée dans la salle de spectacle Le Grand Rex (fig. 2), est visible sur le site *YouTube* du CNRS.

Rendez-vous est bien sûr pris d'ici deux ans pour une nouvelle Nuit autour d'un thème encore inconnu, mais que l'actualité scientifique ne manquera de rendre brûlant !

Guy Wormser

Laboratoire de l'accélérateur linéaire, Université Paris-Saclay



Hommage à Yves Couder (1941 – 2019)

Yves Couder s'est éteint à 78 ans le 2 avril 2019, entouré de sa femme Lorna et de ses enfants Jeanne et Julien. Ses obsèques ont eu lieu le 8 avril, en présence de nombreux amis et collègues.

Docteur de l'Université de Paris, il a animé de 1965 à 2006 une équipe de recherche à l'École normale supérieure de la rue d'Ulm. Il était, depuis 1985, professeur à l'Université Denis Diderot. Depuis 2006, il avait rejoint cette université et y exerçait ses activités de recherche au sein du laboratoire *Matière et Systèmes Complexes*. Il joua un rôle majeur dans la création et l'installation de ce nouveau laboratoire.

C'est au travers d'expériences apparemment simples et d'une élégance stupéfiante qu'Yves Couder a pu réaliser des avancées scientifiques considérables, aussi bien en dynamique des fluides que dans des disciplines connexes, qui lui ont valu d'être reconnu très tôt comme un acteur majeur et un leader à l'échelle mondiale.

De nouvelles voies originales ont ainsi été ouvertes par son équipe dans l'étude de la turbulence : lui et ses collègues ont les premiers proposé d'utiliser les films de savon pour étudier les propriétés de la dynamique des tourbillons et de la turbulence en deux dimensions. Ils ont ainsi mis en évidence expérimentalement la cascade inverse d'énergie prédite théoriquement. Cette analogie très féconde a ensuite inspiré plusieurs groupes aux États-Unis et dans d'autres pays européens. Ils ont également été les premiers à détecter et caractériser, dans un écoulement turbulent tridimensionnel cette fois, la présence de filaments tourbillonnaires de grande intensité. Ils ont pu montrer que ces filaments étaient responsables des explosions (*bursts*) de basse pression communément observées et qu'ils étaient reliés à l'intermittence des écoulements turbulents. Keith Moffatt à Cambridge appelle ces filaments "*the sinews of turbulence*", les nervures de la turbulence. Le montage expérimental était connu aux États-Unis sous le nom de *French washing machine*, la machine à laver française ! Tout un symbole !

La digitation de Saffman-Taylor se réfère à la formation de doigts à l'interface entre deux fluides, lors du déplacement d'un fluide visqueux par un autre fluide moins visqueux. Yves Couder a pu montrer que l'application de perturbations dites singulières à la pointe du doigt est suffisante pour affecter le processus de sélection de la configuration du doigt. La morphogénèse et la croissance des plantes constituent également un domaine où son intuition créatrice s'est révélée remarquablement éclairante : l'organisation en spirales des plantes peut en effet s'expliquer à partir des suites de Fibonacci et du nombre d'or. Yves Couder a illustré le rôle joué par ces suites dans l'agencement des graines du cœur des fleurs de tournesol. Il a étudié par analogie la dynamique des textures produites par un assemblage de gouttes ferromagnétiques. Ceci a fourni une interprétation globale, là aussi très élégante, de l'organisation observée : le système tend vers une organisation en nombres irrationnels, car son évolution géométrique tend à lui faire éviter les nombres rationnels.

Au cours de ces dernières années, Yves Couder s'est intéressé à la dynamique de gouttes rebondissant sur une interface liquide animée de mouvements oscillatoires verticaux. Cette configuration a permis de mettre en évidence un couplage dynamique entre les mouvements de la goutte et le champ d'ondes de gravité qu'elle produit. Cette dualité ondes-particules en mécanique des fluides a conduit Yves à la découverte d'une magnifique analogie macroscopique de l'expérience du photon unique de G.I. Taylor et de l'expérience de diffraction d'un électron de de Broglie. Des régimes chaotiques ont également été identifiés. Ces recherches pionnières ont suscité toute une série de travaux dans leur sillage, à l'instar de John Bush au département de mathématiques du MIT.

La créativité, l'élégance, mais aussi la simplicité et la modestie ont permis à Yves de rassembler autour de lui des chercheurs brillants qui, en quelque sorte, constituent aujourd'hui une *École Couder de physique macroscopique*, profondément inspirée par son regard sur les hommes et les choses.

Yves Couder a reçu de nombreuses distinctions, dont le prix de Mécanique des fluides de l'*European Mechanics Society* en 2012. La citation associée à ce prix résume parfaitement ses recherches : *For experiments in fluid mechanics which are novel, elegant, deep and provocative*. C'est donc à plus d'un titre qu'il fut élu à l'Académie des sciences en 2013, dans la section des Sciences mécaniques et informatiques. Ses contributions aux travaux de l'Académie étaient fidèles à son approche, hors des sentiers balisés et allant toujours droit à l'essentiel.

Yves Couder laisse dans notre communauté un grand vide, mais aussi une lumineuse source d'inspiration...

Patrick Huerre

Académie des sciences et CNRS

Prix scientifiques

Prix Jeune chercheur **Saint-Gobain 2017** : Aurélie Hourlier-Fargette



Titre de la thèse : Dynamique de mouillage sur matière molle : du claquage élastocapillaire au dévalement de gouttes sur élastomères, préparée à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert sous la direction de Sébastien Neukirch et Arnaud Antkowiak, et soutenue le 12 juin 2017 à l'Université Paris 6.

Ce travail de thèse se situe à l'interface entre l'hydrodynamique et la mécanique physique. Aurélie Hourlier-Fargette s'est intéressée au claquage d'une lamelle comprimée axialement dans le cas où l'instabilité est induite par la présence d'une goutte. Elle s'est également consacrée à l'étude de la dynamique de descente d'une goutte d'eau sur un élastomère incliné, où elle a mis en évidence un phénomène surprenant, jamais observé jusqu'alors : la succession de deux régimes avec deux vitesses différentes.

Elle est arrivée, à la fin de son travail de thèse, à proposer une interprétation originale et très convaincante des phénomènes observés, qu'elle a validée par plusieurs mesures extrêmement astucieuses, démontrant une vraie démarche de chercheuse. Ce travail a fait la couverture d'un numéro de la revue *Soft Matter* en 2017.

La thèse d'Aurélie Hourlier-Fargette est un travail fondamental qui nécessite des connaissances dans les domaines de la physique des polymères et de la mécanique des fluides. Le thème traité est particulièrement intéressant en raison de son immense potentiel d'applications.

Aurélie Hourlier-Fargette a obtenu des résultats expérimentaux novateurs, qui ont été salués comme des informations scientifiques de premier plan.

C'est donc à l'unanimité que le jury des prix Jeunes chercheurs de la Société Française de Physique a décidé de lui attribuer le prix Saint-Gobain 2017.

Aurélie Hourlier-Fargette est actuellement postdoctorante au Center for Bio-Integrated Electronics, Northwestern University (Illinois, USA), sous la direction de John Rogers.

Prix Jeune chercheur **Daniel Guinier 2017** : Vivian Poulin



Titre de la thèse : Signatures gravitationnelles et électromagnétiques de particules massives en cosmologie, préparée au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique, sous la direction de Pasquale Serpico et Julien Lesgourgues, et soutenue le 3 juillet 2017.

Dans sa thèse, Vivian Poulin s'est intéressé aux empreintes gravitationnelles et électromagnétiques laissées par la désintégration ou l'annihilation de reliques massives du Big-Bang.

Parmi la profusion des études qu'il a menées, on peut noter en particulier :

- une solution possible au problème du lithium 7, en rapport avec la nucléosynthèse primordiale ;
- une analyse synoptique et fouillée portant sur les trous noirs primordiaux en tant que candidats à la matière noire ;
- une investigation du rôle des neutrinos dans l'Univers primordial ;
- un traitement en profondeur de l'effet des désintégrations des reliques primordiales sur le spectre des fluctuations de densité ;
- une prospective sur les futurs projets étudiant le fond diffus cosmologique et la raie d'émission de l'hydrogène à une longueur d'onde de 21 cm.

L'analyse des modèles qu'il a étudiés (et parfois corrigés) a permis à Vivian Poulin d'ouvrir de nouvelles voies de recherches pour la cosmologie, en particulier par la mise en place de nouvelles contraintes sur la décroissance de particules primordiales.

Au cours de sa thèse, Vivian Poulin est rapidement devenu un chercheur brillant, indépendant et mûr. Il a montré dans ses très nombreux travaux qu'il possédait de solides connaissances et qu'il maîtrisait parfaitement le champ disciplinaire étendu qu'est la cosmologie.

La Société Française de Physique est ainsi très fière de décerner à Vivian Poulin le prix Daniel Guinier 2017.

Après un stage postdoctoral à l'Université John Hopkins (Baltimore, USA), Vivian Poulin vient d'être recruté chargé de recherche du CNRS au Laboratoire Univers et Particules de Montpellier (LUPM).

Mentions Jeune chercheur

Le jury des prix Jeune chercheur de la Société Française de Physique a également attribué des mentions aux prix Daniel Guinier et Saint-Gobain 2017, pour féliciter et encourager deux jeunes physiciens ayant réalisé un remarquable travail de thèse :

• **Lou Barreau**, pour sa thèse : « Étude de dynamiques de photoionisation résonante à l'aide d'impulsions attosecondes », réalisée au laboratoire LIDyL du CEA/Université de Saclay sous la direction de Pascal Salières, et soutenue le 18 décembre 2017. Lou Barreau est actuellement en postdoctorat aux États-Unis, au département de chimie de l'Université de Californie (UCB, Berkeley).

• **Mohamad Tarhini**, pour sa thèse : « Mesure de la production du boson Z et du J/Ψ dans les collisions p-Pb et Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV avec ALICE », préparée à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay et au CERN, sous la direction de Bruno Espagnon, et soutenue le 27 juin 2017. Mohamad Tarhini est actuellement en postdoctorat au laboratoire Subatech à Nantes.

Peut-on faire mieux que le *peer review* ?

Une enquête menée auprès des physiciens et physiciennes en juin 2018, par la Commission des publications de la Société Française de Physique

Les publications scientifiques sont la carte de visite des chercheurs, elles traduisent leurs découvertes et avancées, font connaître leurs travaux et sont un moyen important de communiquer les progrès de leur recherche. Par ailleurs, elles sont aujourd'hui la base du processus d'évaluation, celle d'une personne, d'un projet ou d'une unité de recherche.

Contexte de l'enquête

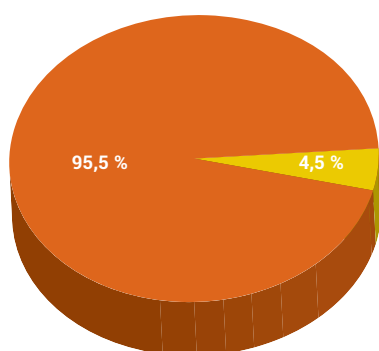
Ce n'est qu'une hypothèse, mais elle est considérée valide et juste par une grande majorité de physiciens : la publication d'un article scientifique (en physique) ne prend sa valeur complète que si elle passe par un processus d'évaluation. Aujourd'hui, dans la plupart des cas, ce processus est une relecture par des pairs (*peer review*), très souvent dans sa forme « simple – aveugle », c'est-à-dire que l'éditeur scientifique et les relecteurs (ou rapporteurs, *reviewers*) connaissent le nom de l'auteur, qui, lui, ne connaît que le nom de l'éditeur scientifique. Ce mécanisme est souvent critiqué : le relecteur peut avoir une lecture biaisée par inadvertance ou par mauvaise volonté, être trop subjectif, pas toujours expert ou trop lent. Il peut favoriser les équipes et chercheurs qui lui sont proches ou très connus ou, pire encore, freiner la publication de vraies découvertes venant de la concurrence. Chacun connaît une anecdote à ce sujet et, même sans ces « faits divers », on sait que parfois la publication originale et pertinente dont on était si fier ne passe que moyennant d'âpres luttes avec certains relecteurs, tandis qu'une pièce cousue un peu rapidement trouve grâce auprès du premier évaluateur. En revanche, devant le nombre croissant de publications, en particulier en provenance des pays du BRIC^(a), on constate aujourd'hui que les sollicitations à expertiser des articles se multiplient pour tous les chercheurs. Ceux d'entre nous qui sont impliqués en tant qu'éditeur scientifique se rendent compte qu'il est de plus en plus difficile de trouver de bons rapporteurs. Alors se pose la question : le *peer review* est-il devenu obsolète ? Est-il à bout de souffle ? Doit-on le réinventer ou l'abandonner ?

Afin de prendre le pouls de la communauté scientifique sur ce sujet, nous avons recueilli les avis des membres de la Société Française de Physique dans une enquête menée en juin 2018. Une vingtaine de questions dans un formulaire en ligne ont recueilli 155 réponses. Pour presque toutes les questions, nous avons laissé de la place pour des commentaires, possibilité largement saisie par les sondés, que l'on remercie vivement pour leur implication dans le débat. L'enquête a été complétée par un test comparant diverses approches du *peer review* sur un article scientifique (voir l'encadré, p. 53). En août 2018, lors des Journées de la Matière Condensée (JMC) à Grenoble, un débat a eu lieu pour conclure l'enquête.

.....
La majorité des sondés s'accorde pour penser que le peer review est une étape essentielle à maintenir dans la publication de nos articles, mais également qu'il nécessite quelques innovations pour s'adapter aux comportements des différentes communautés.

La reconnaissance de l'activité du rapporteur reste un problème majeur si l'on veut maintenir ce gage de qualité.

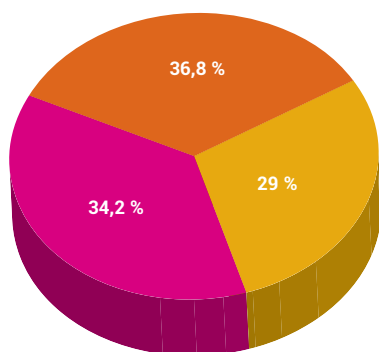
.....



Pensez-vous que l'évaluation de la qualité d'un article scientifique, quelle que soit sa forme, est importante avant sa publication ?

■ Oui : 95,5 % ■ Non : 4,5 %

1. La très grande majorité des sondés pense qu'un processus de *peer review* est important.



Le *peer review* peut être biaisé par la compétition entre équipes, une liste d'auteurs prestigieuse, ou d'autres facteurs. Pour éviter ces biais, il faudrait que le *peer review* :

- Soit fait en double aveugle (le relecteur ne voit pas le nom de l'auteur) : 36,8 %
- Soit fait en triple aveugle (ni le relecteur ni l'éditeur scientifique ne connaissent le nom de l'auteur) : 29 %
- Soit au contraire un processus transparent où les noms des relecteurs sont publiés : 34,2 %

2. Différentes pistes existent pour s'affranchir des biais du *peer review*. Aucun des trois processus ne convainc une majorité de physiciens.

Profil des personnes qui ont répondu

Il s'agissait pour deux-tiers d'enseignants-chercheurs et de chercheurs en activité, le tiers restant étant largement dominé par des collègues retraités ou émérites (15%) et des postdoctorants (10%). Il faut noter que seules 11% des réponses émanaient de femmes. Très peu ont indiqué qu'ils étaient doctorant, ingénieur ou physicien dans l'industrie. Le rapport du nombre de théoriciens au nombre d'expérimentateurs était de deux sur trois. Les questions sollicitaient l'avis de nos collègues auteurs et/ou relecteurs et, dans la plupart des cas, plusieurs réponses étaient possibles.

Valeur et intérêt du *peer review*

À notre première question « Pensez-vous que l'évaluation de la qualité d'un article scientifique (rigueur, méthode employée, accessibilité du texte, intérêt pour la communauté scientifique...), quelle que soit sa forme, est importante avant sa publication ? », un « oui » écrasant à plus de 95% est un indicateur fort (fig. 1). Les commentaires étaient nombreux et portaient majoritairement sur la vérification et la validation du contenu scientifique, sur la limitation nécessaire du nombre de (mauvais) articles, mais aussi sur l'enrichissement du contenu d'un article grâce à un regard extérieur.

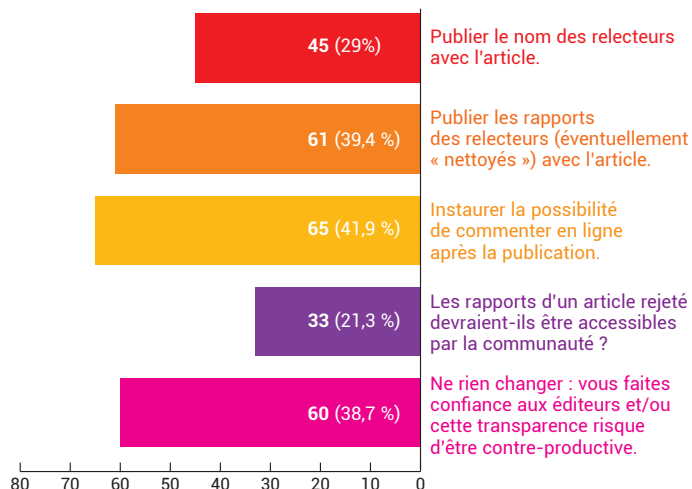
Dans le contexte contemporain de «likes» et de «retweets» pour s'exprimer dans le monde numérique, nous voulions savoir si d'autres formes d'évaluation étaient plébiscitées. À notre grande surprise, très peu de personnes (< 10%) estiment que la certification de qualité peut se faire, soit par cooptation par une communauté soit par statistiques bibliométriques *a posteriori*.

Avis des relecteurs

Le processus actuel de *peer review* est lent : relire et comprendre un article prend beaucoup de temps. On notera que 60% des collègues ont indiqué qu'ils acceptaient de relire les articles dans d'autres thématiques que la leur, parce que cela leur permettait de vraiment se plonger dans un travail qu'ils n'auraient pas forcément lu. Seulement 7% des relecteurs ont eu l'impression d'avoir perdu leur temps devant le refus des auteurs ou de l'éditeur de prendre en compte leurs remarques.

Certaines expérimentations pour faire évoluer le *peer review* sont intéressantes, mais les communautés réagissent différemment. Cela explique sans doute pourquoi, à la question « triple aveugle, double aveugle, ou chacun connaît chacun ? », un équilibre se manifeste entre les trois options (fig. 2). S'il n'est certes pas utile de proposer des relectures en double aveugle dans une petite

communauté expérimentale, le processus de relecture pourrait être amélioré et devenir plus transparent. La figure 3 montre les réponses à la question sur l'amélioration de la transparence du *peer review*. Plusieurs pistes sont envisagées ; leur mise en œuvre dépendra certainement de la taille et des réactions de la communauté, voire de la revue concernée.



3. Quelques solutions envisagées pour rendre le processus de *peer review* plus transparent. Les réponses ne sont pas unanimes ; elles reflètent entre autres l'hétérogénéité des sous-disciplines (plusieurs réponses étaient possibles).

Reconnaitre le travail d'évaluateur

Pour 60,6 % des collègues, la mission du relecteur est de donner un avis sur le contenu scientifique, alors que 36,8 % estiment qu'un avis sur le format technique est aussi souhaitable. L'intérêt de l'article pour la communauté au sens large a visiblement peu d'importance ! Les relecteurs ont une perception très positive de leur travail. Pas moins de 87% d'entre eux trouvent que le manuscrit a été amélioré après leurs commentaires. Cet avis est d'ailleurs partagé par une grande majorité des auteurs.

Se pose alors la question de la reconnaissance et de la valorisation du travail des relecteurs (temps investi, valeur ajoutée...), travail invisible mais qui a un rôle crucial. Cette question est d'autant plus importante qu'avec le nombre croissant des articles soumis, la charge de relecture devient de plus en plus lourde. Presqu'un tiers des collègues sont sollicités deux fois par mois ou plus pour ces expertises. Il y a aujourd'hui des approches variées : certaines maisons d'édition décernent des titres ou des citations honorifiques aux *referees*, d'autres offrent des livres ou des réductions sur les frais de publications (à valoir pour une prochaine publication). Il est évident que le *peer review* fait partie de nos activités de chercheur, et qu'il doit être reconnu comme tel. À la question « Quelle pourrait être la meilleure reconnaissance du *referee* ? », presque deux tiers des réponses ont insisté sur « une inclusion du nombre de vos rapports et le nom des journaux dans votre CV et une reconnaissance de ce travail par les instances d'évaluation des chercheurs ». Vu la confidentialité du processus, la façon dont ceci peut être mis en œuvre n'est pas claire. Plusieurs initiatives ont vu le jour, mais elles sont l'apanage de grandes maisons d'édition, comme Publons [1] ou My Elsevier Reviews Profile [2].

Avis des auteurs

Une grande majorité de relecteurs et d'auteurs sont du même avis. C'est surtout la question de la valeur ajoutée du *peer review* qui est très largement partagée, puisque 89% des auteurs pensent que « la qualité de mon manuscrit s'est souvent trouvée améliorée après les rapports ». Un petit pourcentage d'auteurs constate que leur travail n'a pas été bien compris par les relecteurs, ce qui montre la limite du système, puisque pour des raisons d'éthique le rapporteur consulté par l'éditeur scientifique ne peut pas être trop proche de l'auteur. Cette réaction montre également que la mission du relecteur n'est pas seulement de valider ou non le contenu scientifique, mais aussi d'être le premier « cobaye » externe sur la qualité pédagogique et la clarté d'un article. Par ailleurs, quelques auteurs pointent la lenteur du processus de relecture, qui retarde la publication de leurs résultats. Nous ne pouvons qu'encourager ces collègues à partager leurs *preprints* dès la soumission dans une archive ouverte comme HAL ou arXiv afin de faire connaître leurs travaux au plus tôt, et de rajouter la référence bibliographique une fois l'article validé et publié dans sa version définitive.

Presque tous les auteurs sont d'avis que le *peer review* doit être organisé par la revue, soit par un scientifique engagé comme éditeur (72,9%), ce qui est effectivement le cas pour la plupart des revues des sociétés savantes (*EPL* et *EPJ* pour la SFP), soit par un éditeur scientifique professionnel (21,3%) comme c'est le cas par exemple pour l'American Physical Society ou Nature, mais que ce n'est pas le rôle d'un serveur de *preprint* comme ArXiv. Pour compléter le débat, il y a des réflexions sur la « portabilité » du rapport de relecture permettant à l'auteur, en cas de rejet par un journal, de resoumettre son manuscrit accompagné du premier rapport à une autre revue, ce qui peut accélérer le processus d'évaluation. Aujourd'hui, ceci est pratiqué au sein d'une même maison d'édition ou entre des revues voisines (comme *EPL*, *EPJ* et *J. Phys.*), mais un partage plus large pourrait être une solution à l'avenir.

Le débat avec la communauté des Journées de la Matière Condensée

Les résultats préliminaires de cette enquête ont été présentés et débattus en août 2018 aux JMC de Grenoble, avec une audience d'une centaine de participants. La communauté s'est montrée extrêmement intéressée par ces questions, qui touchent notre travail quotidien de chercheur. Malgré ses faiblesses, le *peer review* est perçu comme étant le meilleur processus de certification de la qualité d'un article avant sa publication. En tant que physicien, on ne fait confiance qu'à nos pairs pour juger la qualité de nos écrits. Mieux, de nombreux collègues ont dit que – sachant qu'il y aurait relecture par un pair – ils faisaient un effort de clarification et d'explication dès la rédaction du premier brouillon d'un article. En effet, le *peer review* est un filtre de qualité qui permet de stabiliser et de limiter la taille d'un texte et à chacun d'accorder une certaine confiance à la qualité des résultats publiés.

Conclusion

Les résultats de notre enquête et le débat qui a suivi, sans être exhaustif, nous démontrent que la communauté de la SFP se sent très impliquée dans le débat sur le *peer review* dans les journaux, et prend le rôle de rapporteur très au sérieux.

La majorité des sondés s'accorde sur le fait que le *peer review* est une étape essentielle à maintenir dans la publication de nos articles, mais également qu'il nécessite quelques innovations pour s'adapter aux comportements des différentes communautés. Il est évident que le *peer review* joue un rôle capital dans l'amélioration des manuscrits, et que le rapporteur doit se pencher en priorité sur la qualité scientifique d'un article, sans pour autant oublier son format technique.

La reconnaissance de l'activité du rapporteur reste un problème majeur si l'on veut maintenir ce gage de qualité ; il doit donc être mieux considéré par les instances d'évaluation des carrières.

Tout en gardant le meilleur de ce système précieux qu'est le *peer review*, mis en place dès la création des premières revues scientifiques au XVII^e siècle, le *peer review* du XXI^e siècle doit être plus transparent dans son processus et, surtout, trouver un moyen de valoriser correctement ce travail fondamental pour la science. ■

Martina Knoop⁽¹⁾ (martina.knoop@univ-amu.fr),
Agnès Henri⁽²⁾, **Jean Daillant**⁽³⁾ et **Bart van Tiggelen**⁽⁴⁾

(1) PIIM, CNRS/Aix-Marseille Université, 13013 Marseille

(2) EDP Sciences, 91944 Les Ulis

(3) Synchrotron SOLEIL, 91190 Saint-Aubin

(4) LPMMC, Université Grenoble Alpes/CNRS, 38042 Grenoble

(a) L'acronyme BRIC se réfère à quatre pays, le Brésil, la Russie, l'Inde et la Chine, qui sont en développement économique rapide depuis le début du 21^e siècle.

1 • <https://publons.com> . Publons permet à un chercheur de se créer un profil sur lequel il peut valoriser les travaux d'évaluation qu'il a fait. Publons, initiative indépendante au départ, a été récemment racheté par Clarivate, le propriétaire de *Web of Science*.

2 • www.reviewerrecognition.elsevier.com/#/ .

Un test en *live* sur le *peer review*

Pour aller plus loin, nous avons souhaité faire un test avec quelques volontaires recrutés au cours de l'enquête. Le panel était petit (7 personnes), bien que plus grand que le nombre de rapporteurs habituels (2), et venait de différentes sous-disciplines de la physique (matière condensée, physique statistique, matière molle, optique). L'objectif du test était de comparer les différentes approches du *peer review* pour voir leur impact sur les résultats et tester la validité de l'évaluation par les pairs.

Le manuscrit testé est la première version d'un article de l'un d'entre nous, portant sur un sujet principalement de matière molle, et qui a été publié, après d'importantes modifications, dans *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 228101.

Cet article a été soumis aux volontaires en leur demandant d'indiquer s'il était prêt pour publication dans le format proposé, de détailler ses points faibles et forts, et de se prononcer sur les futures citations du papier dans la littérature scientifique. La dernière question était : « Si cet article était soumis à *Nature* ou *Science*, votre jugement serait-il identique ? »

La réaction la plus forte a été la plus révélatrice. Nous avons envoyé le manuscrit seulement quelques jours avant la date limite à un panel initialement plus grand, et une bonne moitié des collègues ont (parfois de façon assez virulente) exprimé leur désaccord sur le délai imposé. Ils étaient unanimes à dire qu'une relecture sérieuse demande du temps. Qu'ils soient rassurés, nous sommes évidemment d'accord !

Il est intéressant de voir par la suite que la différence d'expertise sur le sujet n'avait presque pas d'influence sur les commentaires des relecteurs. La plupart d'entre eux se sont prononcés contre la publication en l'état du texte, en indiquant comme principale faiblesse une présentation trop spécialisée et une argumentation inaccessible à une large audience de physiciens. Sans surprise, les experts plus proches du sujet ont commenté certains détails des travaux, qui n'étaient pas forcément la première cause de la révision demandée. Quant aux forces du manuscrit, tous les relecteurs ont émis un avis positif sur cette présentation de la validation expérimentale d'une prédiction théorique. Ils étaient également unanimes à dire que les citations futures proviendraient surtout des experts du domaine. Enfin, la moitié des rapporteurs auraient rejeté le manuscrit dans le cadre d'une évaluation pour *Nature* ou *Science*, avec l'argument d'un manque d'intérêt pour une communauté plus large.

Il est intéressant de noter que tous les points mentionnés par notre panel ont été soulevés par les rapporteurs initiaux lors de la soumission dans la revue. Aussi, l'avis du panel très hétérogène sur le contenu du manuscrit, ses forces et ses faiblesses, était très similaire aux réactions des rapporteurs de la revue. Nous sommes donc tentés de conclure qu'il existe une certaine cohérence dans l'évaluation, malgré l'hétérogénéité des rapporteurs. Par ailleurs, nous fûmes surpris de constater que le *peer review* pour des journaux de prestige comme *Nature* et *Science* ne suit pas exactement les critères habituels. Ceci est d'autant plus étonnant que les chercheurs reprochent souvent à ces journaux leur ligne éditoriale, avec un processus de *peer review* trop souvent biaisé, voire absent. Est-ce qu'un rapporteur devrait s'exprimer sur le niveau de « prestige » d'un article X pour être compatible avec la « réputation prestigieuse » de la revue Y ? Une belle question pour un futur débat !

Le plan S ne sera pas le dernier mot de l'ouverture des publications scientifiques

Faisant suite à la très riche discussion amorcée dans le numéro 61 de *Reflets de la physique* avec la tribune libre « Le Plan S – késako ? » [1], nous proposons ici une discussion qui complète les informations et les analyses données par la Commission des publications de la SFP.

Rappelons que le plan S prévoit l'accès immédiat et gratuit pour tous lors de la publication des résultats d'une recherche menée sur fonds publics. Il se situe à un niveau européen et se présente dans un contexte de l'édition scientifique en plein bouleversement.

Affirmons d'emblée notre plein accord avec le principe d'ouverture des publications de recherche pour tous les publics, rendue largement possible par Internet. La transparence est en effet une valeur fortement éthique, n'ayant que des limites liées à la sécurité ou à la protection des données personnelles. Elle ne peut que faciliter la lutte constante pour l'intégrité scientifique, d'autant plus que dans de nombreux domaines les données de recherche sont demandées en même temps que les résultats.

L'article de *Reflets* sur le plan S analyse le coût de la publication d'un article : ce coût ne saurait être réduit à zéro, sauf à faire faire tout le travail des professionnels par les chercheurs eux-mêmes (mais alors le coût est pris sur leurs salaires). Les physiciens croient être quittes de leur devoir d'ouverture en déposant leur manuscrit sur des archives ouvertes le jour de la soumission à une revue : ils oublient que dans le cas général il y a quelqu'un qui paie (leur bibliothèque à travers les abonnements) pour le travail de l'éditeur, indispensable car il organise la certification à travers la relecture par les pairs, la mise en forme, l'indexation et l'archivage durable, sans oublier l'impression pour les revues papier.

Le plan S s'apparente au modèle d'édition dit « doré », avec paiement par l'auteur des coûts de traitement (*Article processing charges*, APC), si possible réduits à des charges « raisonnables », c'est-à-dire correspondant au coût incompressible du travail de l'édition. Limiter ainsi les profits commerciaux exorbitants des grands éditeurs est un projet vertueux (gageons que ceux-ci trouveront une solution pour ne pas y perdre...). Toutefois, il reste que les auteurs auront à payer pour chacun de leurs articles : les chercheurs qui, aujourd'hui, publient sans payer en auront-ils tous les moyens ? On sait que le CNRS ne sera pas le financeur des publications de ses chercheurs, même s'il facilitera la gratuité dans certaines revues hybrides, par exemple celles d'EDP Sciences. Pour les chercheurs qui ont des contrats nationaux ou européens, la publication des résultats est maintenant prévue dans le financement accordé : ils bénéficieront de la limitation des coûts des APC. En revanche, qu'en sera-t-il pour tous ceux, les plus nombreux, qui n'ont pas de contrats et travaillent avec des crédits de base ? Rappelons la compétition exacerbée en France pour l'attribution

des financements trop contraints par les agences de moyens. Tous les sujets ne se prêtent pas à des appels à projets. Certains domaines sortent des sentiers battus et peuvent se révéler soudain d'une importance inattendue. Il est à craindre que le modèle du plan S enclenche un processus du type « *le gagnant emporte tout* » : ceux qui ont des contrats ont plus de chance de publier, donc d'obtenir plus de contrats, selon un processus autocatalytique. Mais ceux qui sont entrés plus tardivement dans le système, ou qui ne bénéficient pas des bons réseaux, risquent de constituer une classe de chercheurs moins favorisée. Notons aussi le processus dissuasif de paiement des APC pour les chercheurs des pays pauvres ou autrement défavorisés, en dépit d'arrangements pas toujours connus avec certains éditeurs. Or, peut-on accepter l'argument un peu cynique souvent répété, selon lequel on limiterait ainsi l'accroissement excessif du nombre des articles publiés ? Et faut-il rappeler ici que la compétition ainsi stimulée encourage la fraude scientifique, qui peut parfois permettre une entrée en force dans « la cour des grands » ?

Un souci corrélé au précédent apparaît avec la généralisation du modèle du plan S : la multiplication attendue des revues en accès ouvert à coût réduit, où le travail de relecture par les pairs est souvent sommaire. Elles sont parfois nommées « prédatrices », ce qui est un raccourci approximatif car la seule recherche du profit justifie aussi l'existence de toutes les grandes revues prestigieuses qui font payer très cher. Les revues à bas tarif d'APC ne sont pas toutes mauvaises : il y a tout un continuum entre les bonnes et les exécrables. Certaines ont des chercheurs de valeur dans leur comité éditorial et publient occasionnellement de bons articles, mêlés à d'autres plus médiocres. Il est d'ores et déjà impossible, même aux sociétés savantes au plus près des chercheurs, d'en établir un répertoire classé en fonction de leur qualité scientifique. Et la situation risque d'empirer. Les procédures d'évaluation de la recherche (des chercheurs, des projets, des articles) vont devenir d'autant plus difficiles qu'elles reposent largement sur les publications, même si elles tentent de s'élever au-dessus du simple usage de la bibliométrie. Plus généralement, on peut être préoccupé de la diffusion d'une science au rabais par un effacement progressif d'un contrôle efficace effectué par les pairs.

Il faut pourtant avancer dans ce paysage changeant de l'édition. Il y a un travail de formation et d'éducation au choix des périodiques où publier qui devra être fait pour tous les chercheurs, les jeunes et aussi les plus aguerris. Le plan S, avec ses avantages et



Source : www.coalition-s.org/feedback/

ses limites, n'est pas le dernier mot de la science ouverte. Reprenons les termes de l'appel dit de Jussieu [2] : « L'accès ouvert doit s'accompagner d'un soutien à la diversité des acteurs de la publication scientifique, la *bibliodiversité*, qui mette fin à la domination par un petit nombre d'entre eux. » Le développement de modèles innovants de publication scientifique doit être une priorité, avec la création de nouveaux outils de source ouverte qu'il faudra coordonner pour ne pas aboutir à un paysage trop émietté de la publication scientifique. On peut rappeler le fonctionnement des *épi-journaux* [3], très utilisés dans certains domaines pour l'instant limités. Citons aussi le système prometteur développé par l'éditeur Copernicus, qui pratique des processus de relecture et publication à étapes multiples, combinés avec une discussion interactive faisant appel aux lecteurs : la qualité scientifique semble nettement améliorée et le coût des APC fortement réduit [4].

On ne peut que conclure comme l'appel de Jussieu : « Priorité doit être donnée aux modèles économiques de publication qui n'impliquent le paiement ni par les auteurs pour publier ni par les lecteurs pour accéder aux textes. » Réfléchissons-y tous ensemble, pour les sciences physiques et aussi les autres disciplines, avec nos organismes, nos partenaires européens qui ont fait d'autres choix que la France, avec la SFP et aussi sa filiale EDP Sciences. Le futur de la science ouverte concerne d'abord le lien entre les communautés de chercheurs. Il y va aussi de l'indispensable confiance que la société porte à la science.

Michèle Leduc

Laboratoire Kastler Brossel à l'ENS,
membre du comité d'éthique du CNRS

François Graner

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes
à l'Université Paris Diderot

Références

- 1* B. van Tiggelen *et al.*, *Reflets de la physique* **61** (2019) 48-51.
- 2* *L'appel de Jussieu pour la Science ouverte et la bibliodiversité* (<https://jussieucall.org/>) a été lancé en octobre 2017 par un collectif de chercheurs et de professionnels de l'édition scientifique.
- 3* Voir www.episciences.org/.
- 4* L'étape de relecture ouverte interactive sur Internet permet de bien améliorer les manuscrits. Le vrai travail de l'éditeur est réduit : il se situe lors de la traditionnelle revue par les pairs. Les manuscrits ont alors plus de chances d'être acceptés. Voir, par exemple, www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2012.00033/full.

Franchir le point de Curie

Pierre Curie et la mesure du magnétisme



Film réalisé avec le soutien du Fonds ESPCI Paris, de la Société Française de Physique, de la Société des Amis de l'ESPCI et du Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux (LPEM). (Réalisation O.H.N.K.)

En 1895, Pierre Curie, alors jeune professeur à l'ESPCI, met au point une expérience de mesure du magnétisme.

Par une étude systématique de l'aimantation des corps en fonction de la température, il démontrera les liens entre ferromagnétisme et paramagnétisme et le caractère fondamentalement différent du diamagnétisme. Il mesurera pour la première fois la fameuse loi de Curie dans l'oxygène gazeux et mettra en évidence l'existence du **point de Curie**, aujourd'hui appelé température de Curie.

En 2019, cette expérience vient d'être remise en état de fonctionnement par Bernard Pigelet et André-Pierre Legrand, dans le cadre des actions de la Commission Patrimoine de l'ESPCI.

Au-delà de l'instrumentation, cette expérience nous montre à quel point Pierre Curie était un physicien exceptionnel, capable de décrire de manière théorique des phénomènes connus, mais aussi de mesurer sans aucun *a priori* et de manière très quantitative des propriétés dont la nature microscopique ne sera révélée que bien plus tard.

Ce film, de durée 11:36 minutes,
est visible sur YouTube

www.youtube.com/watch?v=kq--MPqlqwY

Contact :
Brigitte Leridon
(brigitte.leridon@espci.fr)



Enseignement

- ▶ Olympiades de Physique France : XXV^e concours national
Le Comité national des ODPF, **59**, p. 42.

Culture scientifique

- ▶ *MAGNETICA*, une expo attirante
Fischer H., **57**, p. 32.
- ▶ Comment lutter contre la désinformation scientifique ?
Journée Sciences et Médias 2018
Farhi R., **58**, p. 33.
- ▶ Conférences expérimentales à l'Espace Pierre-Gilles de Gennes
Bico J., Guyon É., Lehoucq R., **59**, p. 36.

Coopération internationale

- ▶ Le concours « Challenge Physique Expérimentale en Afrique »
Fokapu O., Hennequin D., Lollman D., Piuze F.,
Suzor-Weiner A., Wofo P., **58**, p. 38.

Colloques, journées scientifiques

- ▶ La Gravitation – Journée de la division Champs et Particules de la SFP
Petropoulos M., **56**, p. 38.
- ▶ Physique des plasmas : 9^e Festival de Théorie à Aix-en-Provence
Sarazin Y., **56**, p. 40.
- ▶ L'assemblée générale 2018 de la SFP
57, p. 36.
- ▶ Jeunes Physicien.ne.s Rhône à la Geek Touch : ils ont mis le feu !
Thorens L., **59**, p. 44.

Biographie

- ▶ Maxime Dahan, acteur majeur de la recherche
à l'interface physique-biologie-médecine, vient de nous quitter
Bassereau P., Leduc M., **59**, p. 45.

Portrait

- ▶ Amélie Juhin tient théorie et expérience dans une seule main
Grousson M., **57**, p. 39.

Prix scientifiques de la SFP

- ▶ Prix Jean-Louis Laclare 2017 (physique des accélérateurs) : Clément Évain
56, p. 39.
- ▶ Prix Jeune Chercheur Saint-Gobain 2016 : Laure Bruhat
57, p. 38.
- ▶ Prix Jeune Chercheur Daniel Guinier 2016 : Guillaume Duclos
57, p. 38.
- ▶ Prix Lagarrigue 2016 (physique des particules) : Bernard Degrange
58, p. 42.
- ▶ Prix Charpak-Ritz 2017 (conjoint avec la Société Suisse de Physique) :
Roland Horisberger
58, p. 42.
- ▶ Prix Jean Perrin 2016 (popularisation de la science) : David Louapre
58, p. 43.
- ▶ Prix Jean Perrin 2017 (popularisation de la science) : Yaël Nazé
58, p. 43.
- ▶ Grand Prix Jean Ricard 2017 : Anne-Marie Lagrange
59, p. 41.
- ▶ Prix Holweck 2018 (conjoint avec l'Institute of Physics) : Marina Galand
59, p. 41.

Innovation

- ▶ L'impact des concepts de Pierre-Gilles de Gennes sur l'innovation en France
dans le domaine des matériaux
de Novion C., Toulhoat H., **56**, p. 10.
- ▶ Pierre-Gilles de Gennes :
un découvreur et un inventeur passionné par l'innovation
Roux D., **56**, p. 11.
- ▶ 1987-2007 : vingt ans de collaboration avec Pierre-Gilles de Gennes
Maestro P., **56**, p. 12.
- ▶ Des polymères sur les interfaces aux shampooings dans les cosmétiques
Luengo G.S., Leonforte F., Baghdadli N., **56**, p. 13.
- ▶ De la physico-chimie des polymères aux membranes
pour la séparation des gaz
Pullumbi P., **56**, p. 15.
- ▶ Apports de Pierre-Gilles de Gennes
à la compréhension physique du pneumatique
Vacherand J.-M., **56**, p. 16.
- ▶ L'impact des concepts développés
par Pierre-Gilles de Gennes sur la recherche à l'IPFEN
Peysson Y., Herzhaft B., **56**, p. 18.
- ▶ Pierre-Gilles de Gennes, bilan d'une vie tournée vers l'innovation
Guyon É., Brochard-Wyart F., Veyssié M., **56**, p. 19.
- ▶ Witmonki : des capteurs portatifs pour détecter les problèmes cardiaques
Brève, **58**, p. 25.

Prise de position

- ▶ Pour une rationalisation du *mix* énergétique français
Chambaud G., Spiro M., **56**, p. 35.

Tribunes libres

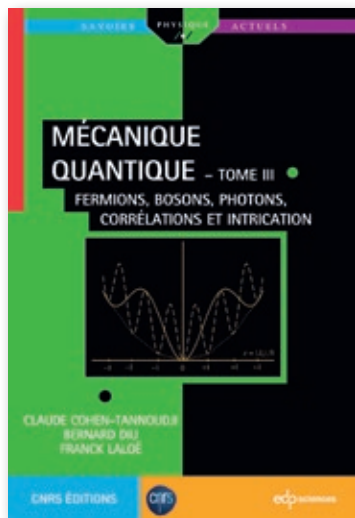
- ▶ Simulation et théorie : des rapports ambigus
Malrieu J.-P., **56**, p. 42.
- ▶ Le métier de chercheur.e en physique aujourd'hui
Institut de physique du CNRS, **57**, p. 40.
- ▶ Alerte aux conférences prédatrices !
Bloch D., **58**, p. 44.

Courriers des lecteurs

- ▶ Au sujet du plagiat en recherche
Ouvry S., **56**, p. 45.
- ▶ Les universitaires turcs en procès
Brézin É., **57**, p. 47.

Livres : notes de lecture

- ▶ *L'extraordinaire Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique*,
textes choisis par F. Brochard-Wyart, D. Quéré et M. Veyssié
Toulhoat H., **56**, p. 46.
- ▶ *Pourquoi la Terre tremble*, par P. Bernard
Cébron D., **56**, p. 47.
- ▶ *Jupiter, la conquête d'une géante*, par J. Lequeux et T. Encrenaz
Le Padellec A., **56**, p. 47.
- ▶ *À l'orée du Cosmos – Un siècle de révolution dans l'astronomie*, par A. Omont
Combes F., **57**, p. 46.
- ▶ *Vertigineuses symétries – La recherche de la beauté
en physique contemporaine*, par A. Zee
Brézin É., **58**, p. 47.
- ▶ *Les ondes gravitationnelles*, par N. Deruelle et J.-P. Lasota
Vilain C., **59**, p. 46.
- ▶ *Du Sahara au cœur de la physique –
L'itinéraire d'un travailleur immigré*, par S. Senoussi
Le Padellec A., **59**, p. 47.



Mécanique quantique – Tomes I et II (nouvelle édition)

Mécanique quantique – Tome III : Fermions, bosons, photons, corrélations et intrication

Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu et Franck Lalöe

(EDP Sciences et CNRS éditions, collection Savoirs actuels, 2017)

Tome I : 960 p., 64 € (livre papier), 43,99 € (eBook)

Tome II : 704 p., 64 € (livre papier), 43,99 € (eBook)

Tome III : 850 p., 55 € (livre papier), 37,99 € (eBook)

Ouvrage publié grâce au mécénat du Centre national de la recherche scientifique, de l'Université Paris-Sciences-et-Lettres et du Collège de France.

Cet ouvrage en trois volumes, issu de nombreuses années d'enseignements universitaires à divers niveaux, a été conçu afin de faciliter le premier contact avec la physique quantique et d'aider ensuite le lecteur à progresser continuellement dans la compréhension de cette physique.

Les deux volumes de la *Mécanique Quantique* de C. Cohen-Tannoudji, B. Diu et F. Lalöe ont, depuis leur publication en 1973, guidé les premiers pas de générations d'étudiants dans le surprenant monde quantique. La rigueur, la clarté d'exposition n'ont pas pris une ride pendant ces 45 ans. Ils restent une composante indispensable de la bibliothèque de tout étudiant à partir de la fin de la Licence et, bien sûr, de tout chercheur et de tout enseignant s'intéressant à la physique quantique.

CNRS éditions et EDP Sciences nous proposent une nouvelle édition de cet ouvrage essentiel, en version papier brochée ou en version livre électronique. Au-delà d'une typographie très heureusement renouvelée, cette édition incorpore des corrections récentes. Elle est aussi augmentée, dans le volume II, d'une très utile discussion des perturbations aléatoires et de la relaxation.

Mais l'heureuse surprise va bien au-delà de cette réédition. Les lecteurs des deux premiers volumes ne pouvaient se départir du regret de voir le livre se clore sur un très, trop bref chapitre sur les particules identiques. Les thèmes si actuels des fluides quantiques, des atomes froids, de l'optique quantique et de l'intrication, si souvent enseignés dans les Masters, étaient, certes, couverts par d'autres textes de référence, mais bien peu atteignent le niveau de clarté et de rigueur du « Cohen ». Après une attente de près d'un demi-siècle, ce regret n'a plus lieu d'être, avec la publication du troisième volume de la *Mécanique Quantique*.

Ce volume tant attendu couvre tous les sujets essentiels des systèmes à grand nombre de particules (fermioniques ou bosoniques) : seconde quantification, opérateurs champs et théorème de Wick, états de paires et appariement BCS, fluides quantiques dégénérés, approximations de Hartree et de Gross-Pitaevskii, excitations de Bogoliubov, quantification du champ électromagnétique, formalisme de l'atome habillé, processus radiatifs essentiels... Il se clôt sur l'intrication et la non-localité quantique.

Il est une suite logique des deux premiers volumes, auxquels il s'intègre parfaitement en leur faisant de nombreuses références. Il conserve en particulier la célèbre organisation en chapitres et compléments (qui constituent, en pages, l'essentiel du texte), organisation qui permet plusieurs niveaux de lecture. Les débutants aborderont ce volume par les chapitres, qui contiennent toutes les idées physiques essentielles. Les étudiants plus avancés y reviendront pour les compléments, les physiciens confirmés y trouveront rapidement la réponse à une question précise. Ils pourront lui faire totalement confiance, la rigueur et la fiabilité étant tout aussi présentes que pour les deux premiers volumes. Il n'est pas proposé d'exercices ou de problèmes. Avec un texte s'adressant à des étudiants relativement avancés, c'est un choix assez logique. Ils trouveront largement matière à s'exercer en reprenant les (parfois complexes) calculs des chapitres et des compléments. Quant aux enseignants, ils trouveront de nombreux sujets possibles dans les compléments.

Ce troisième volume sera donc une référence essentielle pour les étudiants avancés (niveau M1-M2) et les chercheurs de nombreuses communautés : atomes froids, optique quantique et technologies quantiques en général, physique moléculaire, physique du solide et supraconductivité, physique statistique. Tous ne manqueront pas de faire un usage intensif de ce volume.

L'ensemble de la *Mécanique Quantique* est unique par son étendue et sa qualité, et mérite sans conteste d'orner les étagères de la plupart d'entre nous.

Jean-Michel Raimond
Professeur, Sorbonne Université



Diffusive spreading in nature, technology and society

Préface de Gerhard Ertl, prix Nobel de chimie 2007

Armin Bunde, Jürgen Caro, Jörg Kärger et Gero Vogel, éditeurs

(Springer, 2018, 420 p., 121,77 € (livre relié), 84,81 € (format Kindle))

Cet ouvrage traite les problèmes de propagation dans leur ensemble. Les chapitres individuels s'adressent à un large public, issu (au-delà de la physique) des domaines des sciences naturelles, des sciences de l'ingénieur, des mathématiques, de l'archéologie, l'épidémiologie, la linguistique et la sociologie.

Quand on parle de processus de diffusion, on pense tout de suite – en ce qui me concerne – à la diffusion dans les gaz, les liquides et les solides (selon le livre classique de W. Jost publié en 1952), fondée en fait sur le mouvement aléatoire de molécules ou d'atomes. S'y rattachent les noms d'Adolf Fick et Albert Einstein, et les théories du mouvement brownien (*random walk*). C'est une initiative de collègues de Leipzig d'avoir eu l'idée d'élargir le domaine d'application à toute variable dont le mouvement ressort d'une description analytique par les équations de la diffusion, domaine couvrant un très grand nombre de disciplines, de la physique proprement dite à l'écologie ou la linguistique.

Cette approche avait déjà été proposée par divers auteurs – notamment L. Cavalli-Sforza, il y a près de cinquante ans – à propos de la « révolution néolithique ». Le problème posé était : diffusion des populations ou diffusion de connaissances techniques ? (sujet repris dans le présent ouvrage). Un autre exemple est la propagation des contagions, dont un cas nous afflige : la mineuse du marronnier qui, partie du sud de l'ex-Yougoslavie, il y a une trentaine d'années, a envahi toute l'Europe, causant ces sinistres feuilles brunes et rabougries des marronniers. Dans ce cas, il apparaît déjà que le simple processus diffusif est insuffisant, et qu'il doit s'y ajouter une composante dite des « vols de Lévy ».

À la suite d'une première conférence tenue à Leipzig en 2005 sur ce thème fédérateur "*Diffusion Fundamentals*", à laquelle j'avais participé, se sont succédées des conférences biennales. Les comptes rendus de la sixième conférence, qui s'est tenue en 2015 à Dresde, font l'objet du présent volume.

Le livre s'ouvre par deux chapitres d'introduction, que les éditeurs ont eu l'initiative d'écrire pour aider à la lecture des dix-huit contributions spécialisées. Un rappel des équations classiques de la diffusion, complétées de termes spécifiques (qui me rappellent par exemple les approches réaction-diffusion de défauts cristallins sous irradiation), équations qui permettent l'analyse quantitative de processus très variés, dont de beaux exemples sont donnés pour l'évolution des écosystèmes comme le prouvent les dix-huit contributions qui suivent. Il est remarquable à ce propos que l'approche analytique, fondée sur les équations de réaction-

diffusion avec le minimum de paramètres, est assez puissante pour analyser ces phénomènes de diffusion et propagation, englobés ici sous le titre "*diffusion spreading*" – le premier terme usuel en physique, le second en écologie et épidémiologie. Les approches de pure simulation du type « automates cellulaires » ne sont utilisées que dans un chapitre en résonance au chapitre précédent sur le même sujet (la « révolution néolithique »).

Ces dix-huit contributions ont été regroupées autour de trois thèmes : la Nature (au sens très large), la Technologie, la Société. Si le premier semble évident, quoique certains sujets surprendront peut-être le lecteur (les *particules Janus*), les deux autres paraissent encore plus originales, ne traitant pas seulement d'objets matériels, mais de peuples et de cultures, de langues, d'information, de maladies et contagions, d'entités non matérielles telles les innovations ou les défauts dans les réseaux numériques. Il n'est pas possible en une page de citer tous les sujets abordés : ce que je viens d'en dire – notamment de leur variété – devrait être suffisant pour susciter l'intérêt de nos lecteurs.

Voilà un bel exemple d'approche interdisciplinaire réunissant une quarantaine d'auteurs, en majorité allemands. L'absence de Français est très regrettable – tant à cette conférence que dans les précédentes. Pourtant, nos compatriotes auraient pu se faire entendre et apporter des contributions originales.

On note l'absence de résumé en tête de chaque contribution, absence compensée par le chapitre 1, dans lequel les éditeurs ont remarquablement résumé et souligné les points forts des dix-huit contributions. Il faut féliciter les organisateurs d'avoir su rassembler les spécialistes de disciplines si différentes, réunis sous la bannière d'une approche de physiciens.

Springer a édité un livre de grande qualité : belle typographie, figures soignées, avec des légendes abondantes, index très complet (félicitation aux éditeurs !)

Je recommande ce livre pour sa grande originalité et la large couverture inhabituelle des phénomènes analysés. Les physiciens devraient trouver beaucoup de plaisir et d'intérêt à le parcourir.

Jean Philibert

Professeur émérite à l'université Paris-Sud (Orsay)

Time World

Congrès international
SUR LE TEMPS



**21, 22, 23
NOVEMBRE 2019**

Cité des sciences et de l'industrie
Paris - France

Réservez vos billets sur www.timeworld2019.com

Une coproduction



En partenariat avec

