reflets de la PHYSIQUE

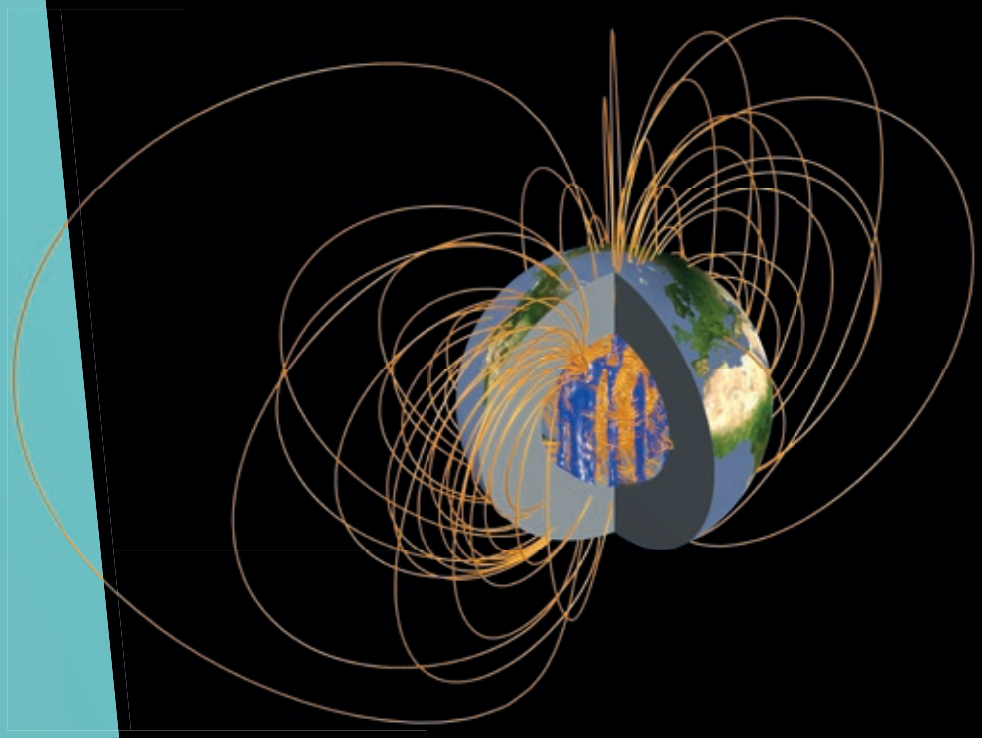
n° 69
juin 2021

Revue de la Société Française de Physique

www.refletsdelaphysique.fr

Images de la physique

Champ géomagnétique et dynamique du noyau terrestre



Avancées de la recherche

- **Comment améliorer le flou des images astronomiques**
- **Miroirs temporels instantanés**

Science et société

- **Pédagogies alternatives en physique à l'université**

Société Française de Physique

cnrs

n° 69 - juin 2021

Rencontres avec les composantes de la Société Française de Physique

Pour bien faire connaissance avec l'ensemble des forces vives de la Société Française de Physique, j'ai entrepris de rencontrer la présidente ou le président, ainsi que le bureau, de chaque composante : divisions thématiques, sections locales et commissions. Après une trentaine de ces réunions, il est possible d'en tirer aujourd'hui un premier bilan. C'est tout d'abord le plaisir de constater l'enthousiasme et l'énergie de toutes celles et tous ceux qui se sont engagés au service de notre communauté, en assurant la responsabilité de ces composantes qui forment la majeure partie de la vie de la SFP. Je les en remercie vivement ici. Le plaisir de constater également le partage des mêmes valeurs qui sous-tendent notre société : la passion de la recherche, du partage des connaissances qui en découle, l'implication dans l'écosystème du monde de la recherche et de l'enseignement supérieur, le dialogue avec la société, l'intégration harmonieuse de nos membres.

Quelques points peuvent néanmoins être améliorés. Les divisions de spécialité fonctionnent encore de façon assez isolée les unes par rapport aux autres : le principe d'une réunion biannuelle de l'ensemble des responsables a été acté afin d'y remédier. Les travaux remarquables de nos commissions doivent être mieux diffusés à l'intérieur de la SFP. Les sections locales rencontrent souvent des difficultés de renouvellement de leur bureau et de leurs dirigeants : nous allons profiter de la mise en place de nos nouveaux statuts début 2022 pour renouveler l'ensemble des mandats. Le but n'est pas du tout de changer systématiquement les équipes en place qui pourront se représenter si elles le souhaitent, mais d'une part d'enclencher un processus plus formel de leur désignation et d'autre part de fixer un terme explicite à cet engagement. Nous espérons ainsi susciter de nouvelles vocations pour apporter du renouveau là où cela est nécessaire, sans décourager ces nouvelles volontés par une prise de responsabilité de trop longue durée. J'espère que vous serez nombreuses et nombreux à rejoindre les bureaux de nos sections locales pour y assumer, un temps, de nouvelles fonctions. Cet engagement au service de la communauté nécessitera certes un peu de votre temps mais pourra se révéler très enrichissante du point de vue professionnel et personnel, en particulier pour les plus jeunes d'entre vous. Je vous en remercie par avance. Pour améliorer la connaissance réciproque des actions des composantes, notre *Newsletter* pourra s'enrichir de faits marquants qui complèteront le recensement des divers évènements actuellement disponible.

La préparation des 150 ans de la SFP en 2023 a été abordée lors de toutes ces rencontres, et de nombreuses composantes ont d'ores et déjà de très bonnes idées de manifestations qu'elles pourraient organiser à cette occasion. Le premier bilan de l'appel à propositions lancé au début de l'année sera effectué cet automne, ce qui permettra d'obtenir une ébauche du calendrier pour cette année très festive qui s'annonce mémorable ! À ce sujet, signalons que Françoise Combes, professeure au Collège de France et récente médaille d'or du CNRS, et Serge Haroche, prix Nobel de physique, nous ont fait l'amitié et le grand honneur d'être les Marraine et Parrain de l'opération « 150 ans de la SFP », dont le slogan officiel récemment adopté est « 150 ans d'engagement pour la Physique »

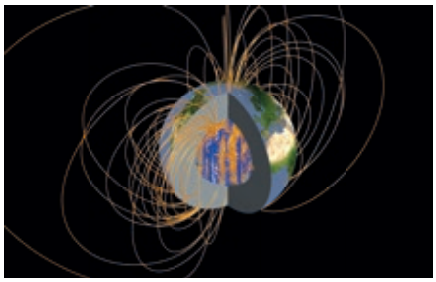
En parallèle à ces rencontres, la présidence de la SFP (Catherine Langlais, Jean-Paul Duraud et moi-même) a également rencontré les dix sociétés sœurs dont nous sommes les plus proches. J'aurai l'occasion de vous en rendre compte prochainement.

Le retour progressif à des conditions de travail plus habituelles est attendu évidemment avec beaucoup d'impatience. Plusieurs grands évènements sont ainsi programmés en présentiel dès le mois de juillet : les colloques de la division PAMO lors du Congrès Optique de la SFO à Dijon du 5 au 9 juillet ; la seconde édition des Rencontres Physique - Entreprise - Recherche (RPER) le 17 septembre sur le Campus Pierre et Marie Curie à Paris (voir p. 41) ; les Rencontres de Chimie Physique à Sète la semaine suivante ; les Rencontres de Physique et Interrogations Fondamentales (PIF) le 27 novembre à la BnF, etc. La priorité des semaines à venir sera de se revoir et d'échanger comme nous en avions l'habitude.

Je vous souhaite donc un très bel été plein de retrouvailles, aussi amicales que scientifiques !

Guy Wormser
Président de la Société Française de Physique

Sommaire



© Julien Aubert, IPGP/CNRS

Coupe de l'intérieur de la Terre, montrant le noyau fluide sphérique externe et les lignes de champ magnétique (voir article, p. 4).

Éditorial

2 Rencontres avec les composantes de la Société Française de Physique
G. Wormser

Images de la physique

4 Champ géomagnétique et dynamique du noyau terrestre
N. Gillet

Avancées de la recherche

10 Une force de portance élastohydrodynamique en matière molle
T. Salez, B. Saintyves, Z. Zheng, V. Bertin et A. Maali

16 Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques : un défi interdisciplinaire
A. Auffèves

21 Du flou des images astronomiques à un prix Nobel de physique
P. Léna et G. Perrin

28 Miroirs temporels instantanés : une nouvelle approche du retournement temporel
A. Eddi et E. Fort

Science et société

34 Comment des pédagogies alternatives peuvent aider à la réussite des étudiants de physique du 1er cycle universitaire
R. Demeyer et J. Margueron

Au sein et autour de la SFP

39 Création de la division Physique Non Linéaire de la SFP

40 L'Université Paris-Saclay, gagnante du French Physicists' Tournament 2021

41 Les prochaines Rencontres Physique-Entreprise-Recherche

42 Une soirée digitale consacrée au Temps

43 Jacques Friedel, homme des XXe et XXIe siècles

44 Prix scientifiques

46 Marc Lefort (1922-2021) — Maurice Kléman (1934-2021)

Reflets de la physique et ses lecteurs

48 Index des articles publiés dans *Reflets de la physique* en 2020

50 Notes de lecture

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

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

Directeur de la publication : Jean-Paul DURAUD
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR
Réalisation graphique : Lætitia MORIN
laetitiamorin@free.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Communication : Mayline VERGUIN
Service publicité : Bernadette DUFOUR
bernadette.dufour@edpsciences.org
Dépôt légal : 2e trimestre 2021
ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777

© SFP - Édité à 3000 exemplaires

Imprimé par JOUVE-PRINT
733, rue Saint-Léonard – 53100 Mayenne

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

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

24

29

35

42

Champ géomagnétique et dynamique du noyau terrestre

Nicolas Gillet (nicolas.gillet@univ-grenoble-alpes.fr)
Institut des Sciences de la Terre (Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, IRD, UGE)
1381 rue de la Piscine, BP 40700, 38058 Grenoble Cedex 9

Le champ géomagnétique est principalement généré par les mouvements de métal liquide dans le noyau de la Terre par « effet dynamo », 3000 km sous nos pieds. Son évolution est suivie en continu au sol et, depuis vingt ans, par des satellites qui nous apportent des informations sans précédent. Notre compréhension de la « géodynamo » a évolué ces dernières années, grâce aussi aux importantes avancées des calculs numériques.

L'information portée par les mesures magnétiques, couplée à celle des simulations hautes performances, nous aide à reconstituer la dynamique dans le noyau. Les champs d'applications sont vastes, la dynamique du noyau affectant par exemple la durée du jour ou le champ magnétique gouvernant la météo de l'espace.

Le champ magnétique terrestre conditionne l'interaction de notre planète avec le flux de particules en provenance du Soleil (ou vent solaire). Les fluctuations géomagnétiques qui en résultent induisant des courants électriques dans le sol, il interfère alors avec notre civilisation. Ainsi, des tempêtes magnétiques ont été à l'origine de perturbations dans les télécommunications, et de pannes électriques étendues sur des milliers de km (comme celle, spectaculaire, de 1989 au Québec).

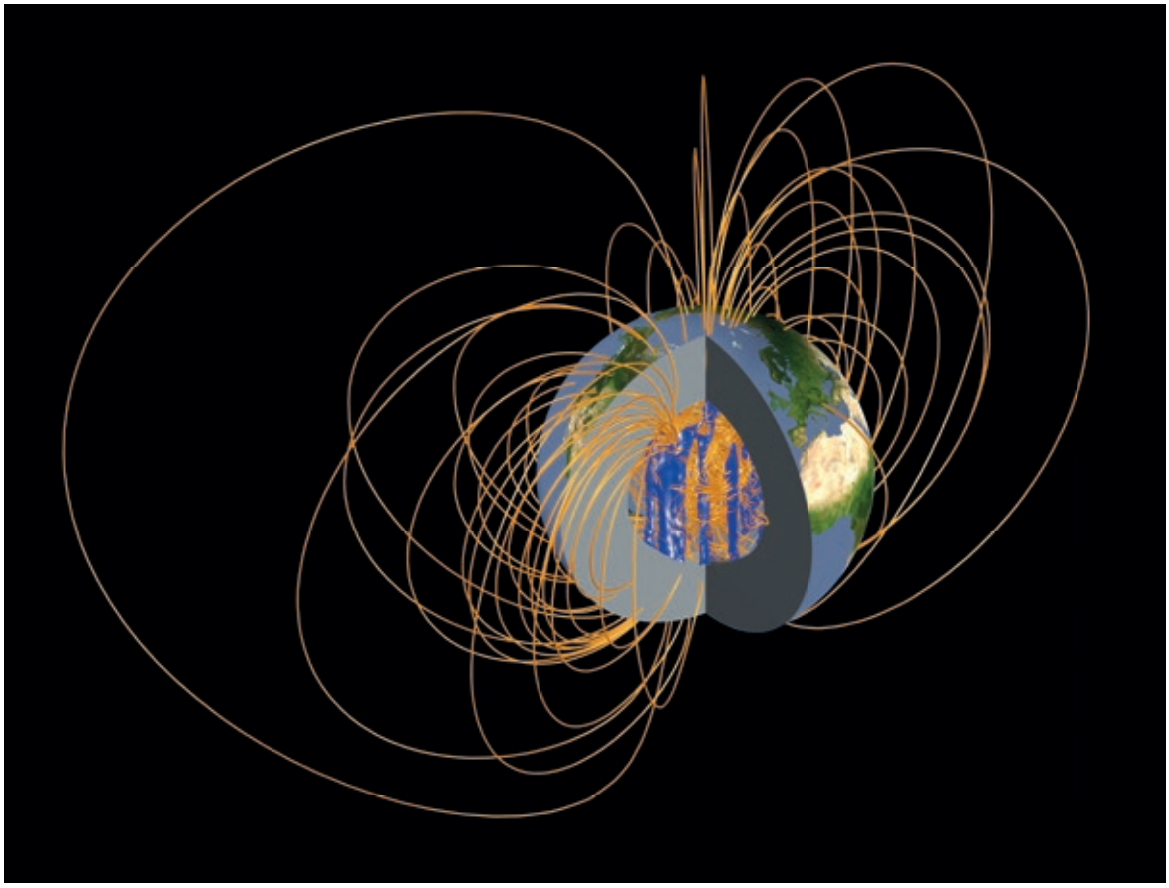
Le champ géomagnétique est aussi un facteur clé des aurores polaires. Partout autour de nous, il est utilisé par une partie de la faune pour s'orienter. C'est finalement un outil géophysique puissant : la mesure du champ magnétique enregistré dans la croute terrestre au fil des âges géologiques étaye par exemple la théorie de la tectonique des plaques.

Observations géomagnétiques

Sur Terre, un magnétomètre mesure une somme de contributions, soit internes (provenant du noyau liquide ou de la croute terrestre), soit externes (provenant de la magnétosphère à une distance de quelques rayons terrestres, ou de l'ionosphère à quelques centaines de km d'altitude). Le champ dynamo en provenance du noyau liquide, d'amplitude ≈ 50 μT à la surface terrestre, représente la majeure partie de l'énergie magnétique mesurée. Cependant, près d'une zone volcanique, l'aimantation rémanente dans les roches peut être localement assez forte pour perturber une boussole et nous faire perdre le Nord. Dans un autre registre, les variations du champ magnétosphérique atteignent plusieurs centaines de nanoteslas (nT) lors de tempêtes magnétiques (résultat d'interactions entre le champ du noyau et le vent solaire).

Le géomagnétisme est une science relativement jeune : ainsi, il faut attendre le milieu du XIXe siècle et K.F. Gauss pour avoir la preuve que le champ géomagnétique est essentiellement d'origine interne à notre planète. Nous savons aujourd'hui qu'il provient d'écoulements de métal liquide dans le noyau externe, une coquille sphérique de 3485 km de rayon extérieur et de 1220 km de rayon intérieur, située au centre de notre planète (fig. 1). Le mécanisme de fonctionnement de cette « géodynamo » fut suggéré par J. Larmor en 1919 : de l'énergie cinétique est puisée dans les mouvements fluides pour générer des courants électriques (et donc un champ magnétique).

Quand on dit « liquide », il faut entendre fluide très peu visqueux, comme de l'eau, au contraire du manteau, roche de phase solide qui flue sur des temps géologiques. La connaissance des propriétés physiques, comme la densité du noyau, nous vient en premier lieu de l'étude des ondes sismiques qui traversent la Terre. On sait ainsi que le noyau est majoritairement composé de fer, plus un ou plusieurs éléments légers comme l'oxygène, le soufre, le silicium, le carbone et l'hydrogène. Cette connaissance est complétée par des calculs de chimie quantique et des expériences de laboratoire utilisant, par exemple, des presses à enclume



© Julien Aubert, IPGP/CNRS.

1. Une coupe de l'intérieur de la Terre, montrant le noyau externe sphérique. En orange, les lignes de champ magnétique et, en bleu, les colonnes fluides à l'origine du champ, alignées avec l'axe de rotation, du fait de la force de Coriolis.

de diamant ou des chocs laser. On peut ainsi contraindre les propriétés de la matière (compatibilité des divers éléments légers avec le fer liquide, conductivités électrique et thermique des alliages envisagés) sous ces conditions extrêmes de pression et de température[(a)]. Connaitre ces ingrédients est crucial pour établir l'état convectif du noyau en déterminant, par exemple, le caractère stable ou non du gradient de densité sous sa surface externe.

La connaissance des écoulements dans le noyau se base sur les mesures de champ magnétique : depuis deux décennies, celles enregistrées depuis l'espace apportent des informations précieuses. Ainsi, depuis fin 2013, les trois satellites de la mission *Swarm*[(b)] de l'ESA permettent, entre autres, de séparer au mieux les sources magnétiques internes et externes à la Terre. Ces données complètent les mesures au sol effectuées depuis le milieu du XIXe siècle (et actuellement *via* le réseau Intermagnet) et les mesures historiques réalisées pour la navigation (cataloguées depuis la fin du XVIe siècle). Sur des périodes millénaires et au-delà, le paléomagnétisme utilise des enregistrements indirects : extraits de poteries, fours, coulées de lave, ou encore sédiments contenant des matériaux susceptibles de « figer » le champ magnétique présent à l'époque de leur formation. On a pu ainsi découvrir les inversions des pôles magnétiques, qui s'opèrent sur une durée de quelques milliers d'années. La dernière a eu lieu il y a environ 800 000 ans. Les traces les plus anciennes du champ magnétique terrestre (enregistrées dans des cristaux inclus dans des roches) remontent à au moins deux milliards d'années.

La géodynamo

La figure 1 montre les écoulements dans le noyau externe, permettant à la géodynamo de fonctionner. Ces écoulements génèrent des courants électriques, à l'origine du champ magnétique terrestre, à première vue dipolaire.

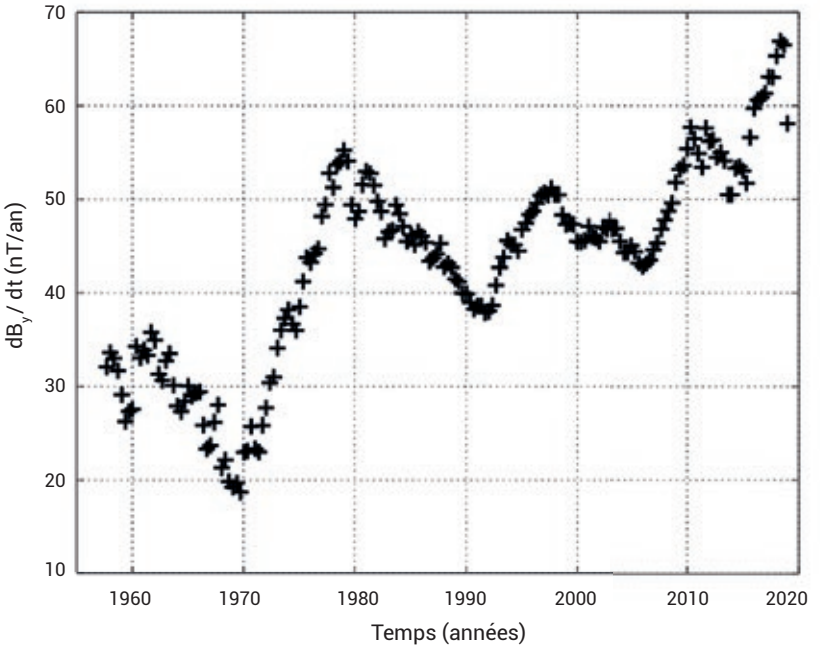
Théorie

Pour comprendre cet **effet dynamo**, il est particulièrement instructif de regarder la dérivée temporelle $\mathbf{B}'(t)$ du champ magnétique $\mathbf{B}$ mesuré (fig. 2) : elle nous informe sur les écoulements de métal liquide sous la surface du noyau. En effet, en combinant les équations de l'électromagnétisme et la loi d'Ohm, on montre que la variation temporelle $\mathbf{B}(t)$ est régie par **l'équation d'induction** :

$$\mathbf{B}'(t) = \nabla \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B}(t)) + \eta\nabla^2\mathbf{B}(t) \quad (1)$$

où $\eta \sim 1\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ est la diffusivité magnétique[(c)] du noyau liquide et $\mathbf{U}$ la vitesse du fluide dans le référentiel terrestre en rotation. Le premier terme à droite est une source (ou force électromotrice, f.e.m.) induite par le cisaillement des lignes de champ par l'écoulement fluide $\mathbf{U}$, et le second un puits (dissipation par effet Joule). Pour avoir une création pérenne d'un champ magnétique à partir de l'énergie cinétique, il faut que le terme source l'emporte. Pour cela, le nombre de Reynolds magnétique sans dimension $R_m = UD/\eta$ doit être très

>>>



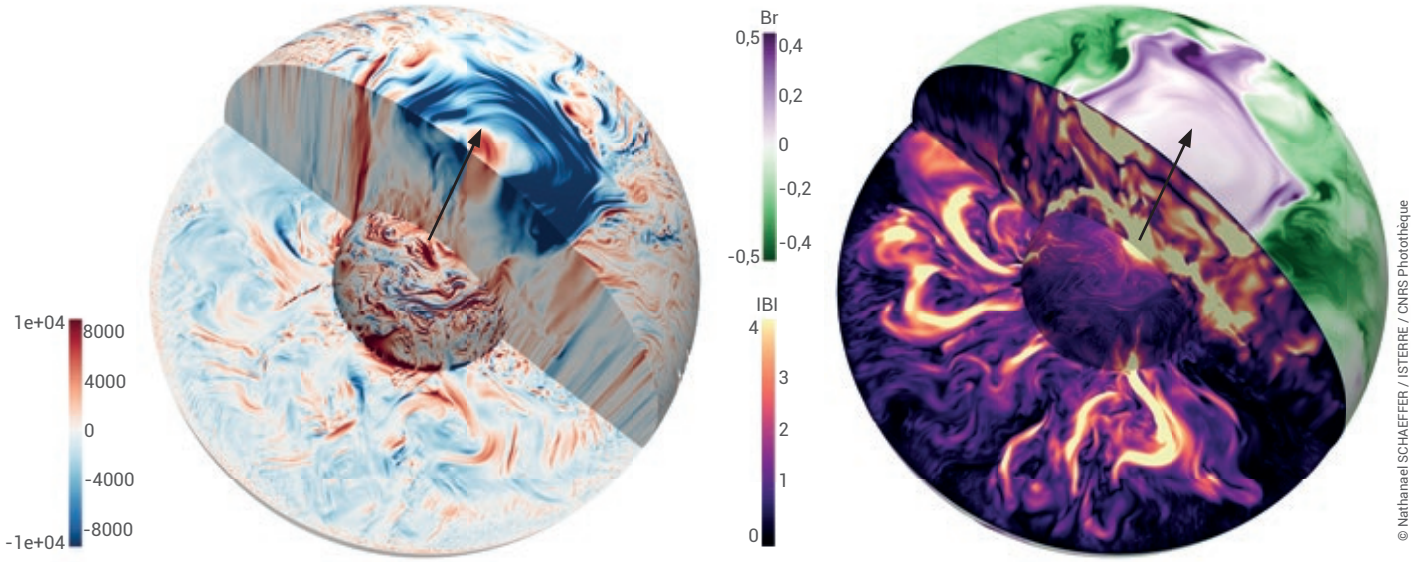
2. Série temporelle de la dérivée par rapport au temps de la composante B_y (vers l'Est) **du champ magnétique**, mesurée à l'observatoire de Chambon-la-Forêt (France). Les changements abrupts de pente sont nommés « secousses magnétiques ».

>>>

supérieur à 1 : il caractérise en effet le rapport entre le temps caractéristique $T_\eta = D^2/\eta$ de dissipation d'une perturbation magnétique de taille D, et le temps $T_U = D/U$ pour que cette perturbation parcoure une distance de l'ordre de D en étant entrainée à la vitesse U du fluide. Dans le cas terrestre, l'analyse dimensionnelle de l'équation (1) donne $U \sim DB'/B \sim 10$ km/an, pour $D \sim 3000$ km (taille du noyau), $B \sim 30$ µT et $B' \sim 100$ nT/an. Cela correspond à $R_m \sim 1000 >> 1$, soit une dissipation magnétique bien inférieure à la f.e.m. aux grandes échelles spatiales.

Pour aller plus avant vers une interprétation dynamique, il faut intégrer les effets des forces de Lorentz et de Coriolis, responsables des ondes d'Alfven et des ondes inertielles. Pour les premières, la force de rappel résulte du cisaillement des lignes de champ magnétique par l'écoulement. Non dispersives, elles se propagent le long des lignes de champ à une vitesse $U_A = B / (\rho\mu)^{1/2}$ proportionnelle à l'intensité B du champ magnétique ambiant ($\rho \sim 10^4$ kg/m^3 est la densité du noyau et $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m sa perméabilité magnétique). Les ondes inertielles sont, elles, liées à la force de Coriolis qui s'exerce sur les écoulements dans un fluide en rotation (à vitesse angulaire $\Omega = 7{,}3 \times 10^{-3}$ s^{-1} dans le noyau). Leur période est de l'ordre de $T_\Omega = 1/(2\Omega)$ (la journée). En quelques T_Ω, elles organisent l'écoulement en colonnes alignées avec l'axe de rotation (fig. 1). Fortement dispersives, les ondes inertielles sont omniprésentes dans la mécanique des fluides dite géophysique (océan, atmosphère, noyaux planétaires, étoiles...).

Les caractéristiques des écoulements observés sont déterminées par les valeurs relatives des temps $T_A = D/U_A$ et T_Ω de propagation de ces ondes, et du temps de dissipation $T_\eta = D^2/\eta$, c'est-à-dire par les rapports :



3. Coupe du noyau liquide dans une simulation numérique de la géodynamo [2].
À gauche : vitesse azimutale (en bleu vers l'Ouest, en rouge vers l'Est). La grande surface bleue représente une tornade géante de métal liquide de 1200 km de rayon, située sous le pôle Nord. Unité de mesure de la vitesse : mètres/an.
À droite : en volume, l'intensité |B| du champ magnétique (noir : nul, jaune : maximal), avec en surface le champ radial Br qui sort (violet) ou qui rentre (vert) du noyau. Unités : milliteslas.
La flèche noire indique l'axe de rotation de la planète. La sphère au centre représente la surface de la graine de fer cristallisé.

- $Lu = T_\eta / T_A = U_A D/\eta$ (nombre de Lundquist),
- $Le = T_\Omega / T_A = U_A/(2\Omega D)$ (nombre de Lehner),
- $Al = T_A / T_U = U/U_A$ (nombre d'Alfven).

Dans le cas du noyau terrestre ($D \sim 3000$ km), on a $T_\eta \sim 300\,000$ ans >> $T_U \sim 300$ ans >> $T_A \sim 3$ ans >> $T_\Omega \sim 1$ jour, si bien que :

- $Lu \sim 10^5$: une onde d'Alfven a largement le temps de se propager à travers le noyau avant d'être dissipée ;
- $Le \sim 10^{-4}$: les ondes inertielles se propagent bien plus vite que les ondes d'Alfven. Les écoulements ont le temps de s'organiser en colonnes parallèles à l'axe de rotation ;
- $Al \sim 10^{-2}$: les ondes d'Alfven se propagent environ cent fois plus vite que le fluide.

Études expérimentales

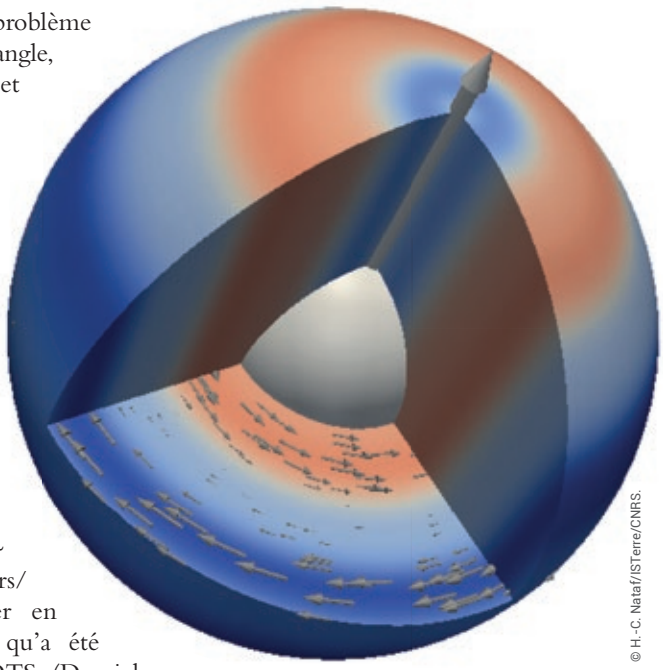
Plusieurs projets expérimentaux ont cherché à reproduire l'effet dynamo, en forçant mécaniquement des écoulements de sodium liquide[d]. Atteindre des valeurs du nombre de Reynolds magnétique $R_m \sim 50$ pour une taille caractéristique $D \sim 0{,}5$ m (un volume $V \sim 0{,}1$ m^3), nécessite des vitesses $U \sim 10$ m/s. Cela requiert une puissance $P_U \sim E_U / T_U \sim \rho V U^3/(2D)$, de l'ordre de 100 kW ($E_U \sim \rho V U^2/2$ est l'énergie cinétique). L'effet dynamo a effectivement été observé expérimentalement pour des puissances de quelques centaines de kW [1] : d'abord à Riga et Karlsruhe en 2000 avec des écoulements très contraints, puis en 2006 à Cadarache (avec un effet ferromagnétique). Dans cette dernière expérience, il a par exemple été possible de reproduire les inversions de polarité du champ magnétique terrestre. D'autres projets, pourtant plus ambitieux (utilisation d'une sphère de 3 mètres de diamètre au Maryland), n'ont pas permis d'observer l'effet dynamo. Le diable se cache dans les détails : géométrie des écoulements, rôle des couches limites... Avec un champ généré de l'ordre de 10 mT, les dynamos expérimentales atteignent $Al \sim 30$ >> 1. Produire une dynamo ne suffit donc pas à modéliser le régime géophysique (où Al << 1), dans lequel la puissance à fournir est déterminée par l'énergie magnétique $E_B \sim V B^2/(2\mu)$. Atteindre « seulement » $Al = 0{,}1$ nécessite une puissance
$P_B \sim E_B/T_U \sim P_U / Al^2 \approx 10$ MW...

On peut attaquer le problème géophysique sous un autre angle, en étudiant la turbulence et les ondes en présence d'un champ magnétique imposé. Toujours pour $D \sim 0{,}5$ m, atteindre Lu >> 1 (disons 100) nécessite un champ $B \sim \eta\,(\rho\mu)^{1/2}\, Lu/D \sim 0{,}7$ T, à maintenir sur le volume de l'expérience. Satisfaire dans le même temps à la condition Le << 1 (disons 10^{-2}) requiert un taux de rotation $\Omega \sim \eta\, Lu/(2\, D^2\, Le) \sim$ 2000 rad/s ou 20 000 tours/minute. C'est pour aller en direction de ce régime qu'a été construite l'expérience DTS (Derviche Tourneur Sodium) à Grenoble, où des ondes d'Alfven, très affectées par la diffusion, ont été observées. Dans tous ces cas, le problème est que, dans un métal liquide, le champ magnétique diffuse bien plus vite que la quantité de mouvement, de sorte que soit la dissipation magnétique est trop forte (Lu trop faible), soit le champ magnétique induit est trop faible (Al trop grand).

Études numériques

La voie numérique aussi est très exigeante : du fait de la rotation rapide de la planète, il est nécessaire d'intégrer les équations sur des durées très longues (quelques 10 000 ans), tout en résolvant numériquement des fluctuations rapides (de période inférieure à la journée) et des couches limites très fines aux frontières du domaine (parois, interfaces). La puissance croissante des ordinateurs rend cependant possibles, dans certaines gammes de paramètres, des simulations reproduisant des caractéristiques du cas terrestre : dipôle prédominant, renversements des pôles magnétiques...

Pour donner une idée du défi auquel nous faisons face, simuler 5000 ans de l'évolution du noyau, même pour une viscosité dix millions de fois plus élevée qu'en réalité, nécessite aujourd'hui dix millions d'heures-cœur[e], avec le code le plus performant [2]. Ces calculs montrent (fig. 3 gauche) un champ de vitesse du fluide très contraint par la rotation terrestre et organisé en colonnes alignées avec l'axe de rotation (Le << 1). En allant en direction des paramètres terrestres, l'énergie magnétique calculée (fig. 3 droite) devient supérieure à l'énergie cinétique (Al << 1).



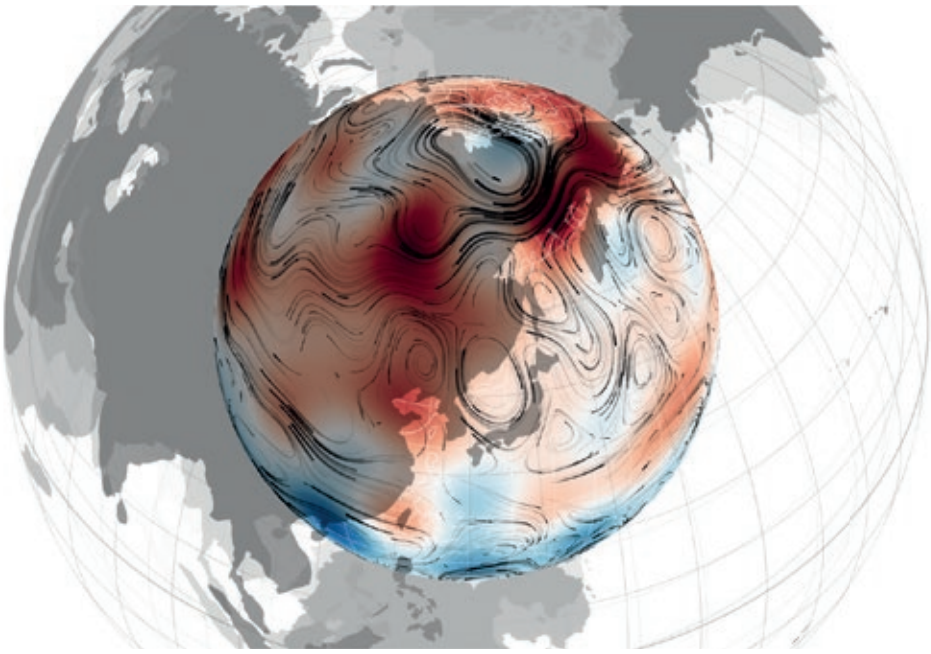
© H.-C. Nataf/ISTerre/CNRS.

4. Reconstitution du champ de vitesse (petites flèches sur fonds orange et bleu) **des ondes de torsion d'Alfven pour l'année 1955** (échelle de couleur entre ± 0,4 km/an).
Organisées en cylindres parallèles à l'axe de rotation (grande flèche grise), ces ondes se propagent dans la direction radiale cylindrique et cisaillent le champ magnétique interne au noyau.

Ondes hydromagnétiques

Mais quel est le champ magnétique présent au sein du noyau liquide ? Il est possible d'extrapoler mathématiquement le champ mesuré au-dessus de la surface terrestre partout où la circulation de courants électriques reste négligeable. Le manteau étant un bon isolant électrique, on peut ainsi cartographier le champ à la surface du noyau aux périodes plus longues que l'année, et aux échelles spatiales supérieures à environ 800 km. Cette dernière limite tient à l'atténuation du champ dynamo à mesure que l'on s'éloigne du noyau (plus forte pour des signaux de petite taille), et à son écrantage par le magnétisme crustal, qui domine le signal mesuré aux petites longueurs d'onde spatiale. Reconstruire le champ au sein même du métal liquide requiert des modèles dynamiques tenant compte des courants électriques.

>>>



5. Assimilation de données géomagnétiques. Reconstitution, à partir de la mission *Swarm*, des écoulements (trajectoires noires, amplitude maximale de 40 km/an) et du champ magnétique (en rouge qui rentre dans le noyau, en bleu qui en sort, échelle de couleur ± 1 mT) à la surface du noyau externe en 2015. (https://geodyn.univ-grenoble-alpes.fr/).

>>>

La première estimation du champ dans le noyau fluide provient de la détection d'ondes d'Alfven particulières : les ondes dites « de torsion ». Ces dernières s'organisent en tubes cylindriques alignés avec l'axe de rotation (fig. 4). À grande échelle, ce sont les seules ondes d'Alfven qui peuvent exister dans le noyau pour la raison suivante : dans la limite $Le << 1$, une perturbation dans le noyau serait normalement accommodée plus rapidement par les ondes inertielles que par les ondes d'Alfven. Cependant, la projection de la force de Coriolis sur les cylindres de torsion est nulle et ne créera donc pas d'ondes : ainsi, et seulement pour cette géométrie d'écoulements, c'est la force de Lorentz (à l'origine des ondes d'Alfven) qui interviendra. Décrites théoriquement par S. Braginski en 1970, les ondes de torsion permettent de sonder le champ magnétique dans lequel elles se propagent. Les ondes détectées à partir des mesures magnétiques traversent le noyau en quatre ans, soit une vitesse de phase $U_A \sim 1000$ km/an. Ceci implique un champ de quelques mT au sein du noyau liquide [3], environ dix fois plus fort qu'à sa surface.

La valeur de U_A est à comparer à la vitesse $U \sim 10$ km/an caractéristique du fluide : leur rapport $Al \sim 10^{-2}$ indique que l'énergie magnétique est 10 000 fois plus grande que l'énergie cinétique dans le noyau. La présence d'un champ magnétique d'une telle intensité est de prime-abord étonnante. En effet, l'ordre de grandeur du rapport entre force de Lorentz ($F_L \sim B^2/(\mu D)$) et force de Coriolis ($F_C \sim 2\rho\Omega U$) indique $F_L/F_C \sim Le/Al \sim 10^{-2}$. La force magnétique n'apparait *a priori* pas si cruciale... Mais c'est sans compter avec le fait que la force de Coriolis ne travaille pas : c'est une force inertielle ou « fictive », perpendiculaire à la fois à l'axe de rotation et à la vitesse du fluide ; aussi, le système couplé des champs magnétique et de vitesse s'organise pour minimiser le travail de la force de Lorentz.

Cette énergie magnétique gigantesque est un ingrédient primordial qui distingue la dynamique du noyau de celle des enveloppes fluides superficielles comme l'océan et l'atmosphère, elles aussi dominées par la force de Coriolis. Pour de telles valeurs de B, apparait une famille d'ondes hydromagnétiques non axisymmétriques (*i.e.* avec des variations en azimuth, contrairement aux ondes de torsion). Ce sont les ondes « magnéto-Coriolis », pour lesquelles le terme de rappel fait intervenir à la fois la force de Coriolis et celle de Lorentz. Décrites dans les années 1960 par R. Hide et W. Malkus, elles se subdivisent pour $Le << 1$ en ondes rapides (ondes inertielles faiblement modifiées par **B**) et en ondes lentes. La période de ces dernières évolue comme T_A/Le, soit de l'ordre du millier d'années pour des perturbations de grande échelle. Dans ce schéma de pensée, il n'existe pas aux périodes interannuelles d'ondes non axisymmétriques de grande échelle.

C'est pourtant dans cette gamme de périodes qu'interviennent les « secousses magnétiques ». Ces variations abruptes de $\mathbf{B'}(t)$, illustrées par la figure 2, sont de trop forte amplitude pour être expliquées uniquement par les ondes de torsion. Étant donné nos difficultés à observer et simuler les variations issues du noyau aux périodes plus courtes que quelques années, la question de savoir si les secousses sont des phénomènes isolés dans le temps, ou bien si elles existent en permanence, reste ouverte. Doit-on faire appel à la turbulence hydromagnétique en rotation pour les expliquer ? Des mécanismes ondulatoires de petite échelle en sont-ils la source ?

Dans l'état actuel des ressources en calcul numérique, le régime où $Al << 1$ est très difficile à atteindre. Des tentatives émergent cependant, qui nécessitent de paramétrer les effets de la turbulence. Des secousses du type de celles montrées dans la figure 2 apparaissent alors et sont la signature de mécanismes ondulatoires. Comme c'est le cas avec les mesures magnétiques, elles sont plus fréquemment détectées dans la région équatoriale. Des panaches thermiques, en remontant depuis la surface de la graine solide, excitent des ondes d'Alfven structurées en colonnes alignées avec l'axe de rotation (du fait d'une force de Coriolis prédominante) et qui se propagent localement le long des lignes de champ magnétique [4]. Ces observations font écho à la découverte d'ondes magnéto-Coriolis de périodes interannuelles [5]. Dans les deux cas, ces ondulations semblent gouvernées par des structures de petite taille, tout en portant une signature à grande échelle qui pourrait correspondre aux secousses détectées dans les réseaux au sol et les mesures satellitaires.

Au-delà du noyau

Les observations peuvent être combinées à l'intégration numérique d'un modèle dynamique dans le but de tirer au mieux profit de ces deux sources d'information. Si ces techniques, appelées « assimilations de données », sont utilisées de manière opérationnelle en océanographie ou en météorologie, ce n'est que récemment qu'elles ont été introduites en géomagnétisme. La figure 5 montre une reconstitution par assimilation de données du champ de vitesse et du champ magnétique à la surface du noyau, à partir des mesures des satellites *Swarm* et de modèles simplifiés dérivés de simulations numériques de la géodynamo. Ces dernières ne sont pas encore utilisables de manière opérationnelle, mais pourraient permettre dans le futur d'interpréter les variations interannuelles observées[f].

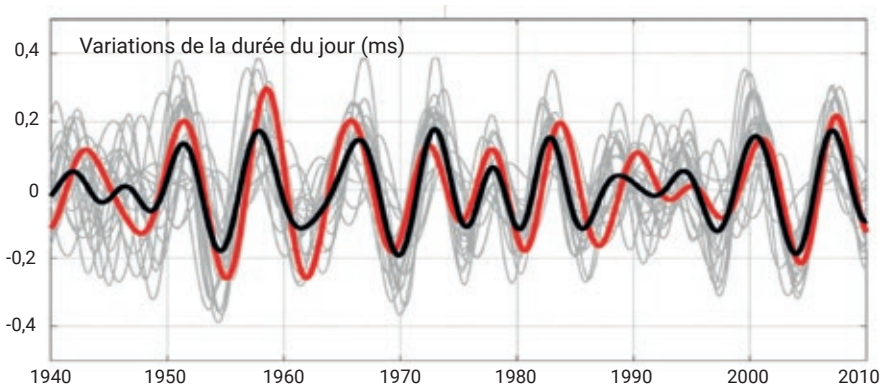
Les approches de ce type ont des applications possibles variées. Par exemple, le moment cinétique total de rotation de la Terre, somme de celui de ses différentes couches, doit rester constant. Si le moment cinétique d'une des couches fluides varie, cela doit donc être compensé par une variation en sens inverse du moment cinétique de la partie solide de la Terre. Ainsi, si le premier diminue, la vitesse de rotation de la Terre solide doit augmenter et la durée du jour sera réduite. Ces variations peuvent atteindre quelques millisecondes et être déterminées par interférométrie des ondes radio émises par les étoiles.

Aux périodes plus courtes que quatre ans environ, ce sont les variations du moment cinétique associé aux écoulements atmosphériques qui déterminent les variations de la durée du jour.

En revanche, les variations de plus longue période dépendent en grande partie des écoulements du noyau. En particulier, une variation d'une fraction de ms et de périodicité de l'ordre de six ans signe la présence d'ondes de torsion, comme illustré par la figure 6. Les écoulements du noyau sont ici reconstruits à partir de mesures magnétiques complètement indépendantes des données de durée du jour. Le bon accord entre ces observations et nos prédictions donne ainsi confiance dans les reconstitutions de la dynamique du noyau.

Le calcul du moment cinétique global de la Terre doit aussi prendre en compte les variations de son moment d'inertie aux périodes interannuelles, dues à la redistribution à la surface terrestre des masses hydrologiques qui déforment notre planète. Or, les informations sur la dynamique du noyau issues des mesures magnétiques donnent en partie accès à ce bilan : le géomagnétisme pourrait donc aider à mieux connaitre les évolutions du bilan de masse du système océan-atmosphère-hydrosphère dues au changement climatique.

Les dynamiques des différentes enveloppes de notre planète ne peuvent pas être considérées indépendamment, comme en témoignent les variations de ses paramètres d'orientation tels que, par exemple, la durée du jour. Le signal magnétique est une des informations qui nous permet de passer de la magnétosphère au noyau. ■



6. Variations de la durée du jour terrestre. Comparaison entre les composantes mesurées de période voisine de 6 ans (en rouge ; unités : ms) et les prédictions utilisant un ensemble d'écoulements du noyau terrestre, reconstitués à partir des mesures magnétiques (en gris, moyenne en noir) [6].

Remerciements

Ce manuscrit a profité de discussions fructueuses avec, en particulier, J. Aubert, D. Cébron, D. Jault, G. Morard, H.-C. Nataf et N. Schaeffer.

(a) 135 GPa et ≈ 4000 K à la surface du noyau ; 330 GPa et 5500 K à la surface de la graine solide, de rayon 1220 km.

(b) *Swarm* est une mission de l'Agence spatiale européenne (ESA), qui a pour objectif d'étudier les variations spatiales et temporelles du champ géomagnétique, l'aimantation de la lithosphère, la conductivité électrique du manteau, ainsi que l'environnement ionosphérique de la Terre. Elle met en œuvre trois satellites identiques, qui ont été lancés en 2013.

(c) La diffusivité magnétique $\eta = 1/(\mu\sigma)$ est déterminée par la conductivité électrique σ et la perméabilité magnétique μ du fluide.

(d) Le sodium est le métal le plus approprié, alliant une faible densité $\rho \approx 10^3$ kg/m^3 et une faible diffusivité magnétique $\eta \approx 0{,}1$ m^2/s.

(e) Pour un processeur multicœurs, cette valeur représente la somme des temps de calcul des différents « cœurs » ("core" en anglais).

(f) La modélisation de la dynamique du noyau requiert une plus forte puissance de calcul que celles de l'océan ou de l'atmosphère, car pour ces dernières (i) l'épaisseur très fine autorise certaines approximations, (ii) des mesures *in situ* permettent de paramétrer certains phénomènes comme la taille des couches limites, et (iii) les modèles de turbulence – qui évitent de résoudre toutes les interactions aux petites échelles – sont plus aboutis.

Références

1• P. Cardin et P. Olson, "Experiments on core dynamics", dans *Treatise on Geophysics*, 2e édition, vol. **8**, *Core dynamics* (2015) 317-339.

2• N. Schaeffer *et al.*, "Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth's core", *Geophys. J. Int.* **211** (2017) 1-29.

3• N. Gillet *et al.*, "Fast torsional waves and strong magnetic field within the earth's core", *Nature* **465** (2010) 74-77.

4• J. Aubert et C.C. Finlay, "Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at earth's core surface", *Nature Geoscience* **12** (2019) 393-398.

5• F. Gerck *et al.*, "Fast quasi-geostrophic magneto-coriolis modes in the earth's core", *Geophys. Res. Lett.* (2020) 2020GL090803.

6• N. Gillet *et al.*, "Planetary gyre, time-dependent eddies, torsional waves, and equatorial jets at the Earth's core surface", *J. Geophys. Res.: Solid Earth* **120** (2015) 3991-4013.

Une force de portance élastohydrodynamique en matière molle

Thomas Salez[(1)] (thomas.salez@u-bordeaux.fr), **Baudouin Saintyves**[(2)], **Zaicheng Zhang**[(1)], **Vincent Bertin**[(1)] et **Abdelhamid Maali**[(1)]

(1) Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (UMR CNRS 5798 et Université de Bordeaux), 351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

(2) High Concept Labs, MANA Contemporary, Chicago, IL (USA)

La friction est un phénomène omniprésent, aux conséquences majeures. Une stratégie pour réduire les frottements entre deux objets est d'intercaler une couche de fluide lubrifiant.
Pour des objets élastiques, le couplage entre leur déformation et la pression due à l'écoulement engendre des effets non triviaux, tels que l'apparition d'une force de portance.

Dans ce contexte, le problème d'une particule libre dans un fluide et proche d'une paroi molle a été traité théoriquement – avec des prédictions étonnantes. La portance a été ensuite observée expérimentalement de manière indirecte, à diverses échelles. Enfin, sa première mesure directe et quantitative à l'échelle nanométrique a été réalisée.

Le contact mou et humide

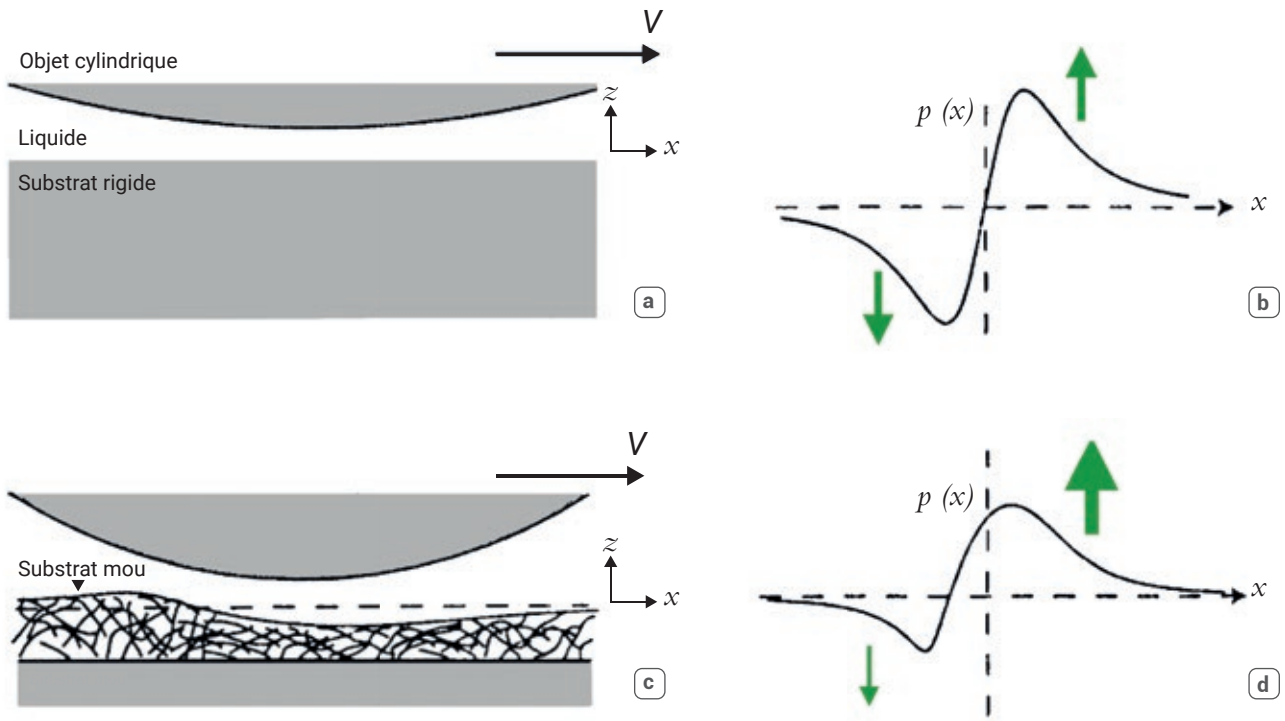
Les contacts lubrifiés entre solides déformables sont très répandus dans la nature et l'industrie. Leur riche histoire en science et en ingénierie implique des problématiques et des échelles de longueur et de temps très variées. Les exemples incluent : les glissements de terrain catastrophiques en géologie mettant en jeu des écoulements confinés dans des sols poroélastiques (c'est-à-dire poreux et élastiques comme une éponge), l'*aquaplaning* des pneus en caoutchouc sur routes humides, les roulements à billes industriels (métalliques, mais se déformant aux grandes vitesses mises en jeu), les articulations synoviales et cartilagineuses, le mouvement cellulaire dans les vaisseaux sanguins ou dans des dispositifs microfluidiques artificiels… Ces exemples impliquent invariablement les phénomènes de frottement et d'adhésion, mais aussi un couplage dit « élastohydrodynamique » (EHD) entre l'écoulement du lubrifiant et la déformation des parois.

Récemment, un tel couplage EHD lubrifié a attiré l'attention dans le contexte de la matière molle confinée, et pourrait bien jouer un rôle crucial dans le mouvement de diverses entités physiologiques et biologiques. Par exemple, les articulations osseuses des mammifères mettent probablement en jeu l'interaction fine entre les cartilages mous et le liquide synovial, ce qui pourrait expliquer leur coefficient de friction effectif remarquablement bas. En outre, grâce à l'existence du couplage EHD, l'appareil à forces de surface (SFA) et le microscope à force atomique (AFM) permettent de sonder l'élasticité des matériaux souples et fragiles, en évitant tout contact adhésif invasif qui pourrait altérer leurs propriétés [1].

Force de portance émergente en matière molle confinée

Traditionnellement, les forces de portance, qui maintiennent un avion en l'air, résultent d'écoulements inertiels (c'est-à-dire liés à l'accélération du fluide) autour des ailes. Cependant, dans le cadre du couplage EHD lubrifié introduit ci-dessus, une nouvelle force de portance a été prédite théoriquement. Cette dernière émerge pour des écoulements visqueux et confinés, où l'inertie est négligeable, à condition que les parois soient déformables. Même si l'idée d'une portance EHD est probablement antérieure, au travers de l'étude de matériaux industriels plus rigides, elle a été remise à l'ordre du jour dans le contexte de la matière molle dans les années 1990 [2].

Essentiellement, tout objet symétrique se déplaçant dans un fluide visqueux et le long d'une paroi élastique est repoussé de celle-ci par une force normale engendrée dynamiquement. Cette dernière résulte d'une brisure de la symétrie du contact intime, et donc de l'écoulement confiné associé, en raison de la déformation de la paroi (fig. 1). L'écoulement sous l'objet engendre une surpression à l'avant qui comprime le substrat élastique, et une



1. Principe de la force de portance élastohydrodynamique. Au voisinage d'un substrat rigide (a), le champ de pression p(x) induit dans le liquide visqueux par le mouvement tangentiel d'un cylindre rigide se déplaçant à la vitesse V est antisymétrique dans la direction tangentielle x (b). En d'autres termes, la pression repousse autant le cylindre vers le haut à l'avant qu'elle ne le tire vers le bas à l'arrière (flèches vertes). Il en résulte une force normale (intégrale de la pression le long de x) nulle dans la direction z. En revanche, un substrat mou (c) est déformé par le champ de pression. Ce dernier perd alors sa symétrie (d). Ainsi, les pressions à l'avant et à l'arrière du cylindre ne se compensent plus (flèches vertes). Par conséquent, l'intégrale selon x du champ de pression devient strictement positive, ce qui se traduit par une force normale pointant vers le haut : la portance élastohydrodynamique (image adaptée de [4]).

dépression à l'arrière qui, à l'inverse, attire le substrat vers l'objet. Cette asymétrie de la déformation induit une asymétrie de l'écoulement. Ainsi, comme pour la portance aérodynamique créée par l'asymétrie du flux d'air autour d'une aile d'avion, il se dégage ici aussi une portance. Cependant, son origine est élastohydrodynamique cette fois. De plus, à mesure que l'espace entre l'objet et la paroi souple est réduit, la force de portance augmente.

Ce mécanisme intrigant a été exploré théoriquement en détails, et généralisé au mouvement de vésicules molles le long d'une paroi rigide [3], ainsi que pour différents milieux élastiques et différentes géométries [4]. En outre, la brisure de symétrie sous-jacente du contact lubrifié n'est pas l'apanage de la seule élasticité. D'autres propriétés peuvent produire une portance analogue, telles que la capillarité de l'interface, une inhomogénéité de glissement, la géométrie du solide (même rigide)... Soulignons enfin que le mécanisme de portance décrit ici est distinct d'autres effets de portance mettant en jeu l'inertie, le caractère viscoélastique du fluide lui-même et/ou les variations spatiales de l'écoulement extérieur.

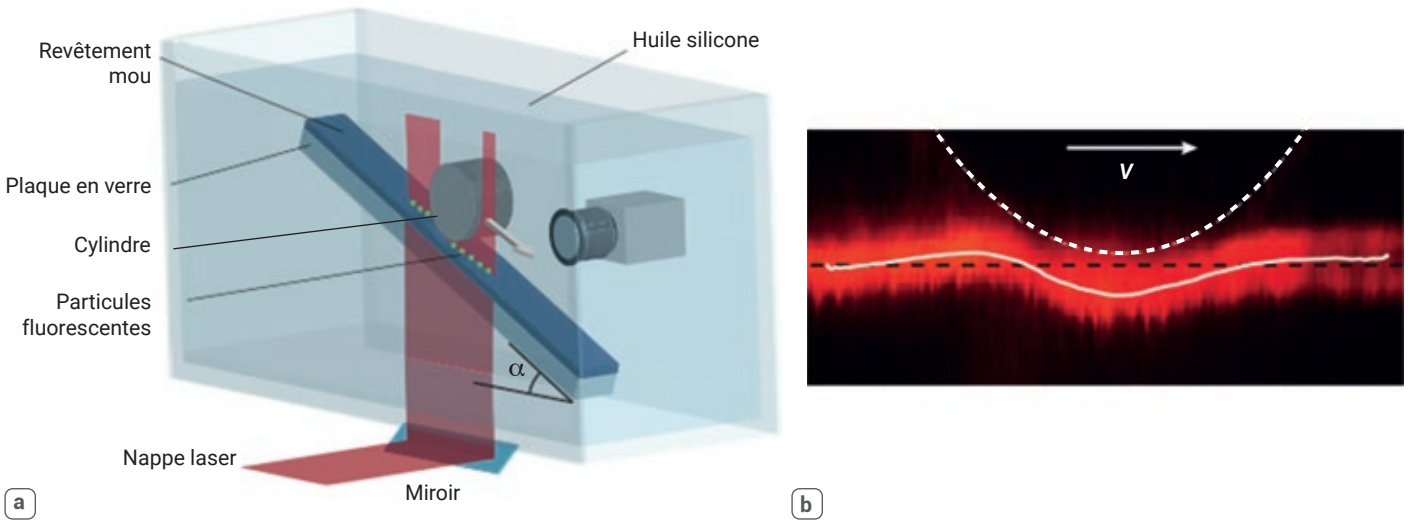
Une zoologie de type inertiel contre-intuitive

Dans les premières descriptions théoriques citées ci-dessus, la vitesse de la particule et l'épaisseur de la couche fluide sont supposées constantes et imposées de l'extérieur. Le cas d'une particule libre est cependant important en pratique. Dans ce contexte, nous avons prédit théoriquement une zoologie de trajectoires originales pour le cas d'un cylindre libre immergé dans un fluide visqueux, et qui peut simultanément sédimenter (tomber sous l'effet de la gravité), glisser ou rouler près d'un mur mou [5]. L'approche a consisté à résoudre les équations de l'hydrodynamique en confinement. Il a ainsi été possible de calculer d'abord les champs de vitesse et de pression dans le fluide dans le cas d'une paroi rigide, puis d'évaluer leurs modifications pour des parois élastiques faiblement déformables. Par intégration des contraintes résultantes à la surface du cylindre, les forces et couples émergents ont pu être calculés.

Le couplage entre déformation élastique et écoulement confiné ajoute des non-linéarités qui modifient drastiquement la dynamique. Nous avons en effet observé des comportements très intrigants, comme :

(i) un phénomène de « succion élasto-hydrodynamique », où le cylindre sédimente de manière accélérée vers le mur ;

>>>



2. Montage expérimental macroscopique.
(a) Un cylindre rigide plongé dans un bain d'huile silicone glisse le long d'un plan incliné recouvert d'une fine couche élastique. Des particules fluorescentes encastrées à la surface de cette dernière permettent d'observer sa déformation à l'aide d'un laser et d'une caméra.
(b) Vue latérale redressée. La ligne pointillée blanche indique le profil du cylindre se déplaçant à la vitesse tangentielle V. La ligne en tirets noirs correspond à la surface non déformée de la couche élastique. Le trait plein blanc correspond à la moyenne du signal fluorescent (rouge), révélant le profil de la déformation. Les paramètres expérimentaux sont ici : épaisseur de la couche élastique h = 1,5 mm, module élastique de cisaillement de cette couche G = 65 kPa, viscosité du l'huile η = 1 Pa.s, rayon du cylindre R = 12,7 mm, densité du cylindre ρ = 8510 kg.m^{-3} et angle α = 11 °.

>>>

(ii) un effet de type Magnus (c'est-à-dire une force de portance hydrodynamique exercée sur un objet en rotation, comme une balle de tennis [6]), où la portance est contrôlée par la rotation propre du cylindre ;
(iii) un effet de type « boomerang » (ou « rétro » au billard), avec un retour en arrière spontané du cylindre ;
(iv) une inversion du sens de roulement ;
(v) ou encore un phénomène d'aquaplanage spontané et auto-entretenu…

Fait intéressant, ces effets sont souvent rencontrés dans des écoulements inertiels, sous amortis, généralement associés à des objets gros et rapides. *A contrario*, et comme pour la portance EHD décrite plus haut, ils sont ici engendrés à petite échelle, à basse vitesse et sans accélération du fluide, par la seule présence de frontières élastiques voisines. Ceci pourrait avoir des implications importantes en biologie, et on pourrait alors même envisager de « jouer au tennis » avec une cellule…

Cependant, malgré les idées et avancées théoriques discutées précédemment, des preuves expérimentales manquaient – jusqu'à très récemment.

Observation macroscopique indirecte : réduction de la friction effective

Afin de sonder expérimentalement l'hypothétique force de portance EHD, nous avons étudié le mouvement libre et lubrifié d'un cylindre pesant le long d'une paroi molle [7]. Le dispositif expérimental est constitué d'un plan incliné rigide en verre, recouvert d'une fine couche élastique d'élastomère (polydiméthylsiloxane, PDMS) ou de gel (polyacrylamide, PAA), le tout immergé dans un récipient rempli d'huile silicone de viscosité contrôlée (fig. 2a).

À l'aide de ce dispositif, nous avons alors observé et étudié la chute de cylindres de tailles et matériaux divers, tout en faisant varier le module élastique et l'épaisseur du revêtement mou. En comparaison avec le cas d'une surface rigide (ici le verre sans revêtement), nous avons observé que la vitesse tangentielle V du cylindre augmente significativement pour une surface molle (fig. 3a), ce qui correspond à une diminution du frottement effectif. La vitesse observée, et donc le frottement, apparaissent relativement constants dans l'espace et le temps, indiquant la suppression du phénomène de « coller-glisser » caractéristique du frottement sec entre deux solides.

De surcroit, lors du passage du cylindre le long de la paroi, le revêtement mou est déformé de manière asymétrique (fig. 2b), ce qui permet de confirmer l'existence d'un couplage EHD (fig. 1c-d).

Les résultats expérimentaux corroborent les prédictions théoriques exposées précédemment, dans le cas de faibles déformations de la surface. La force de portance s'oppose à la composante normale du poids, ce qui explique pourquoi le cylindre lévite lors de sa chute. La puissance motrice de la composante tangentielle du poids est quant à elle entièrement dissipée par l'écoulement visqueux confiné sous le cylindre, entrainant un phénomène de type aquaplanage à vitesse constante. La théorie prédit une vitesse tangentielle qui diminue avec le module élastique de cisaillement, ce qui a été vérifié quantitativement pour une large gamme de paramètres (fig. 3b) : épaisseur de la couche élastique h = 0,1 à 2 mm, module de cisaillement élastique de cette couche G = 8 à 300 kPa, viscosité de l'huile η = 0,01 à 100 Pa.s, angle d'inclinaison α = 10 à 40°, densité du cylindre ρ = 2240 à 8510 kg.m^{-3} et rayon du cylindre R = 6,35 à 12,7 mm.

Cependant, lorsque les gels deviennent très mous (c'est-à-dire lorsque le module élastique de cisaillement devient inférieur à 10 kPa), donc à grande déformation, la théorie asymptotique précédente n'est plus vérifiée, et la vitesse atteint un maximum, puis diminue même à nouveau dans certains cas (fig. 3a). Ceci suggère l'existence d'un mécanisme de saturation, voire d'une rigidité optimale pour réduire le frottement effectif. La saturation pourrait par exemple être due à un nivellement de la déformation élastique, qui ne pourrait excéder l'épaisseur du film de fluide.

Notons enfin que le même dispositif expérimental nous a permis d'étudier en détails la rotation et le couple EHD émergeant spontanément sur le cylindre lors de sa translation. Nous ne discuterons pas cet aspect ici, car l'idée est analogue au cas de la force de portance.

Observations indirectes complémentaires : systèmes biomimétiques et élancés

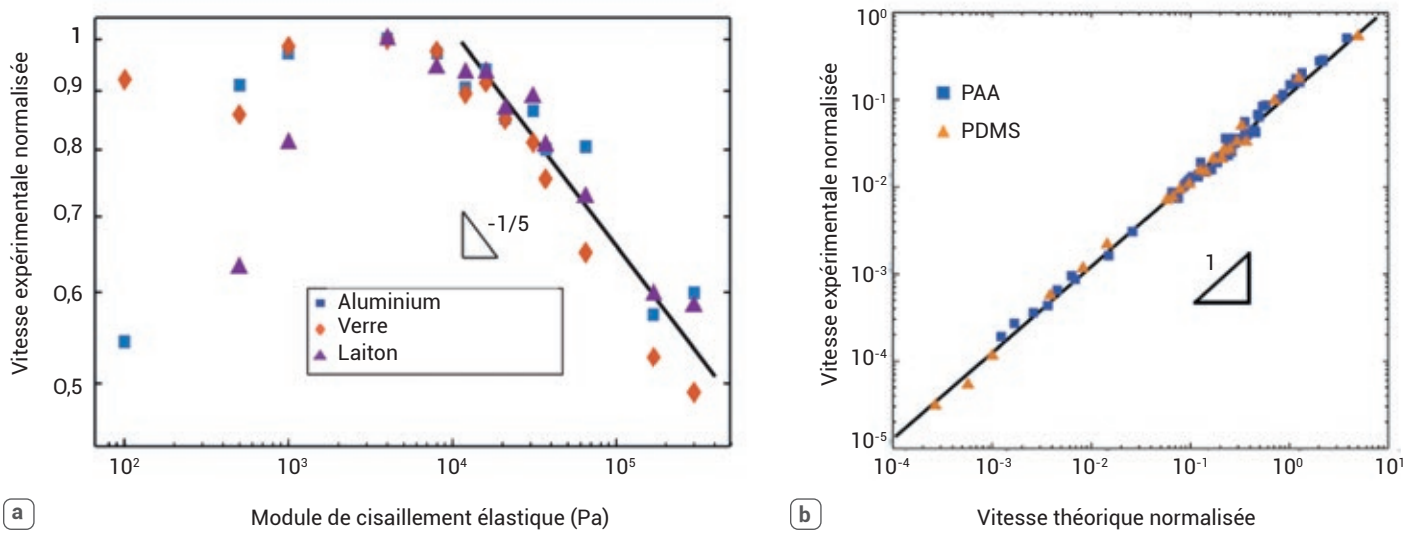
Par la suite, deux études dans la communauté naissante autour de la problématique du contact EHD en matière molle ont confirmé l'existence de la force de portance, et ce de manière indirecte également.

Tout d'abord, une équipe grenobloise a réalisé le suivi optique du mouvement d'une microparticule transportée par un écoulement, dans un canal microfluidique dont les parois avaient été recouvertes au préalable d'une brosse de polymère biomimétique [8]. La trajectoire de la particule s'écarte systématiquement des parois, avec une loi en accord avec le modèle de portance EHD. Cette étude expérimentale révèle ainsi pour la première fois l'importance de cette force de portance dans des contextes microfluidiques pertinents pour la biologie.

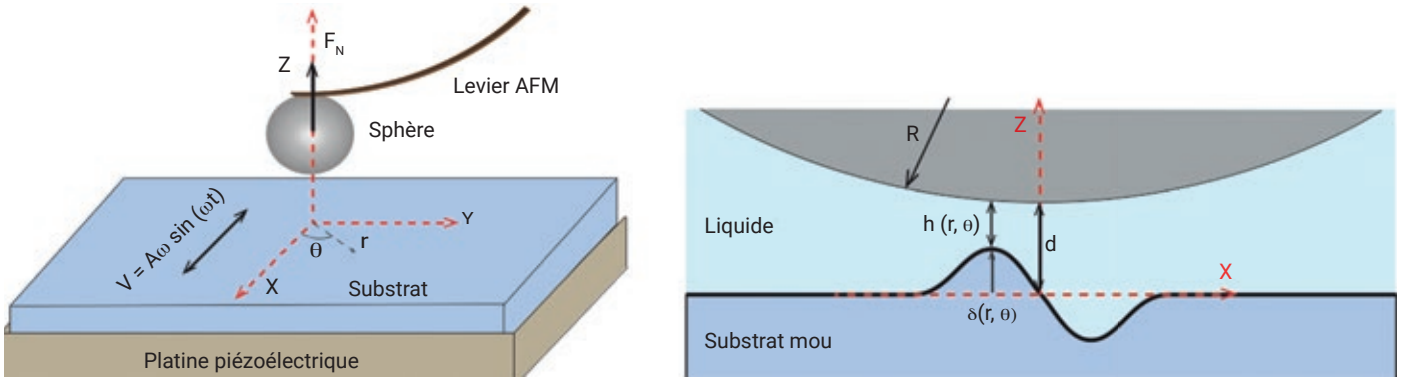
Une seconde étude a consisté à observer la sédimentation gravitationnelle d'une bille millimétrique le long d'une membrane verticale tendue. Ses auteurs ont observé une importante dérive perpendiculairement à la membrane et en s'en écartant, révélant ainsi la grande amplification de la force de portance pour les frontières très déformables associées aux géométries élancées [9]. De nouveau, il existe un intérêt potentiel pour la biologie, puisque les membranes y sont omniprésentes.

Néanmoins, si cette littérature expérimentale récente corrobore l'existence de la force de portance EHD, ainsi que son importance potentielle à petite échelle et en biophysique, une mesure de force, directe et à l'échelle nanométrique, faisait alors encore défaut.

>>>



3. Résultat macroscopique : réduction de la friction effective.
(a) Vitesse tangentielle expérimentale du cylindre en fonction du module de cisaillement de la couche élastique, pour trois cylindres de matériaux différents. L'axe vertical est normalisé par la vitesse maximale mesurée pour chaque cylindre. Les paramètres expérimentaux communs sont ici : épaisseur de la couche élastique h = 600 μm, viscosité de l'huile η = 1 Pa.s et angle α = 11°. Les paramètres spécifiques sont les suivants : cylindre 1 (aluminium) : densité ρ = 2720 kg.m^{-3}, rayon R = 12,7 mm ; cylindre 2 (verre) : ρ = 2240 kg.m^{-3}, R = 9,5 mm ; cylindre 3 (laiton) : ρ = 8510 kg.m^{-3}, R = 6,35 mm. La ligne en trait plein a une pente de −1/5 dans cette représentation log-log. En comparaison, le cas d'un substrat rigide donnerait une vitesse quasi nulle (résultat non présenté ici).
(b) Vitesse tangentielle expérimentale du cylindre en fonction de la vitesse théorique, pour l'ensemble des expériences réalisées avec des couches d'élastomères (polydiméthylsiloxane, PDMS) et d'hydrogels (polyacrylamide, PAA). Les deux axes sont normalisés par une même vitesse de chute libre de référence. La ligne en trait plein a une pente de 1 dans cette représentation log-log.



a b

4. Montage expérimental microscopique. Vues d'ensemble (a) et rapprochée (b). Un substrat mou est fixé sur une platine piézoélectrique de translation oscillant transversalement au cours du temps t, dans la direction x, avec la pulsation ω, l'amplitude spatiale A et la vitesse V. Une sphère rigide de silice de rayon micrométrique R est collée sur un levier de microscope à force atomique (AFM) et immergée dans un liquide visqueux à proximité du substrat. La force normale F_N exercée sur la sphère dans la direction z, à une distance nanométrique d de la surface, est directement mesurée à partir de la déflexion du levier (de raideur connue). Le champ de déformation normal δ induit à la surface libre du substrat par l'écoulement visqueux modifie le profil d'épaisseur h du liquide confiné, et donc les contraintes hydrodynamiques qui s'exercent sur la sphère (voir la figure 1).

>>>

Mesure microscopique directe de la portance élastohydrodynamique

Pour effectuer une mesure quantitative et directe de la force de portance à petite échelle, nous avons collé une sphère, de rayon R = 60 µm, à la pointe d'un levier de microscope à force atomique (AFM) de raideur k = 210 mN.m^{-1}. Nous l'avons ensuite placée dans un liquide visqueux (huile silicone ou alcool), près d'un substrat élastomérique (polydiméthylsiloxane, PDMS) déformable mais incompressible, d'épaisseur de l'ordre de 30 µm et oscillant latéralement (fig. 4a) [10]. Ce faisant, un couplage EHD est induit (fig. 4b). Des mesures de la force normale F_N moyennée dans le temps (c'est-à-dire $F = \langle F_N \rangle$) ont été obtenues pour plusieurs distances sphère-substrat d entre 1 nm et 10 µm, et dans diverses conditions expérimentales : fréquence d'oscillation $f = \omega/(2\pi)$ = 25 à 50 Hz, amplitude d'oscillation A = 3,6 à 36 µm, module de cisaillement élastique du substrat G = 98 à 485 kPa et viscosité du liquide η = 14 à 96 mPa.s.

Alors qu'aux abords d'une surface rigide (silicium sans revêtement élastique), la force mesurée est nulle, une force de portance de l'ordre de la dizaine de nanonewtons est mesurée pour des substrats mous (fig. 5a). La force suit une loi de puissance avec la distance, d'exposant -5/2 (voir l'encart sur la figure 5a), ce qui est une caractéristique typique du couplage EHD dans le cas des substrats épais et incompressibles, pour lesquels on attend la loi d'échelle : $F_N \sim (\eta^2 V^2/G).(R/d)^{5/2}$ [4]. De surcroit, à une distance d donnée, plus la paroi est molle (c'est-à-dire plus G est faible), plus la force est grande, comme attendu. De même, les expériences montrent bien que la force augmente avec la vitesse V du substrat (et donc du fluide).

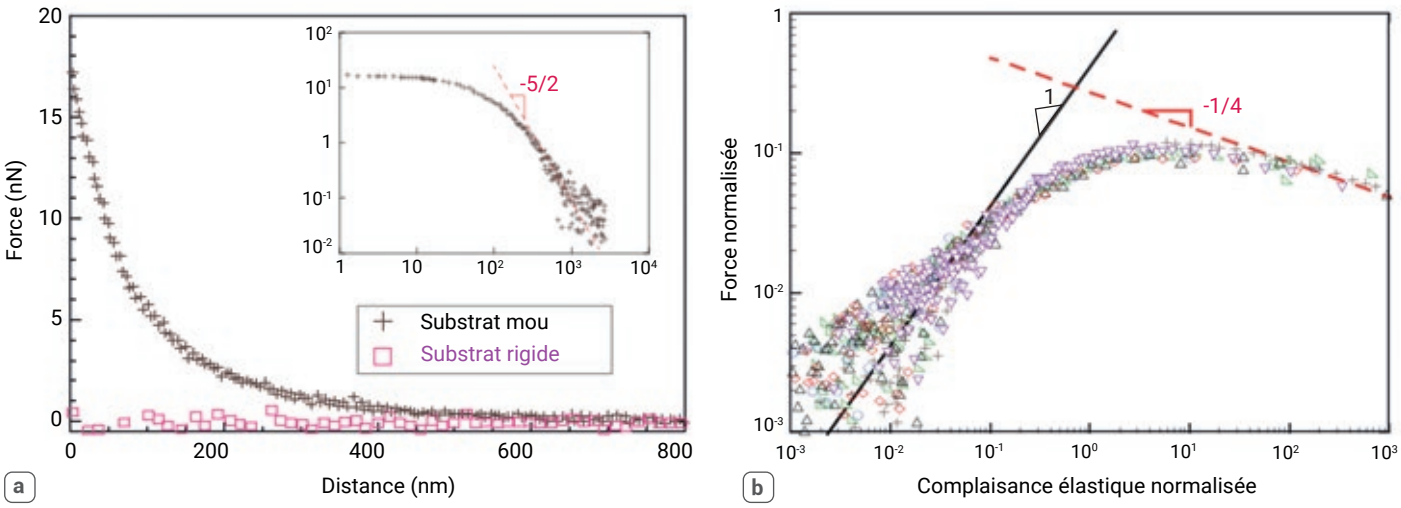
Toutes ces mesures peuvent être regroupées sur une seule courbe maitresse (fig. 5b), donnée par la loi d'échelle précédente. En outre, nous avons pu calculer exactement le préfacteur de cette loi d'échelle, ce qui permet de capturer sans paramètre ajustable l'ensemble des données, à faible complaisance élastique (c'est-à-dire grand module élastique) ou large distance. Enfin, à courte distance, les observations indiquent une saturation de l'effet de portance (voir l'encart de la figure 5a), ce qui fait écho à la saturation précédemment observée indirectement *via* la mesure macroscopique de la friction effective (fig. 3a).

Nous soulignons qu'une mesure indépendante de la force de portance EHD a été réalisée de manière concomitante par une autre équipe bordelaise, pour un système différent : des couches de microgels compressibles étudiées à l'aide d'un appareil à forces de surface (SFA) [11].

Perspectives

L'ensemble de ces questions et résultats marque l'émergence d'une nouvelle communauté en France et dans le monde, autour de la problématique du contact élastohydrodynamique en matière molle. Cette activité engendre de nouvelles idées pour aborder des phénomènes aussi divers que le vieillissement des articulations cartilagineuses ou l'origine des glissements de terrain. Les avancées récentes laissent entrevoir des perspectives d'applications fascinantes, vers les lubrifiants intelligents et l'ingénierie fonctionnalisée de la friction (par exemple, pour les pistons des moteurs), ou encore vers la rhéologie locale non invasive des nano/biomatériaux et des revêtements fragiles de surfaces.

Dans un futur proche, l'exploration expérimentale de la zoologie de comportements de type inertiel décrite ci-dessus semble être une tâche pertinente, ainsi que l'incorporation de caractéristiques complexes (par exemple viscoélastiques et poroélastiques) à celle-ci. Les cartilages, avec leurs propriétés de friction incroyables et encore mal comprises, pourraient être revisités sous l'angle élastohydrodynamique, de façon à mieux les comprendre et pouvoir concevoir de nouvelles prothèses biomimétiques, par exemple. Outre l'élasticité, d'autres mécanismes de brisure de symétrie du contact lubrifié pourraient être explorés expérimentalement, tels que :



5. Résultat microscopique : mesure directe de la force de portance élastohydrodynamique. (a) Moyenne temporelle F de la force normale F_N s'exerçant sur la sphère (voir la figure 4) en fonction de la distance d au substrat, pour des substrats rigide (silicium) et mou (PDMS), et pour un jeu de paramètres (fréquence, amplitude, viscosité et rayon de la sphère) fixé. L'encart montre une représentation log-log des données pour le cas mou où la ligne en tirets est de pente -5/2, caractéristique de l'exposant de la loi de puissance attendue dans le cas d'un substrat élastique incompressible semi infini [3]. (b) Force normale moyenne normalisée par une force de référence en fonction de la complaisance élastique (c'est-à-dire l'inverse du module élastique) normalisée par une complaisance de référence, en échelles logarithmiques, résultant des données force-distance (voir (a)), pour toutes les expériences réalisées et paramètres explorés dans cette étude. La ligne noire en trait plein de pente 1 correspond à la prédiction théorique asymptotique à faible complaisance (ou grande distance), sans paramètre ajustable. La ligne rouge en tirets indique une loi de puissance empirique d'exposant -1/4 dans le régime de forte complaisance (ou faible distance).

i) des inhomogénéités de friction ; ou ii) des réponses capillaires propres aux liquides et aux gels très mous, pour n'en nommer que quelques-uns.

En outre, moduler spatialement et de façon optimisée la complaisance élastique pourrait être un moyen, au travers des couplages EHD résultants, d'ajuster le frottement de manière efficace (par exemple pour les sports de glisse) et de diriger le transport microfluidique de particules, dans l'esprit de la durotaxie (la tendance à se déplacer dans le sens d'un gradient de rigidité) des cellules biologiques.

Enfin, des phénomènes collectifs de type « effet Cheerios » (c'est-à-dire l'attraction capillaire entre des objets flottant à la surface libre d'un liquide), engendrés par l'apparition d'interactions effectives, pourraient être abordés dans un contexte de couplage EHD. Ceci permettrait, par exemple, de développer une micro-ingénierie fine pour la rhéologie des suspensions molles. ■

Les résultats présentés dans cet article sont le fruit d'une collaboration internationale incluant :
L. Mahadevan, T. Jules, B. Rallabandi, C. Schönecker, H. Stone, M. Arshad, É. Raphaël et J. Ault.
Nous les remercions vivement.

Références

1• R. Villey *et al.*, « Indenter du verre avec un liquide ? », *Reflets de la Physique*, **43** (2015) 38.

2• K. Sekimoto et L. Leibler, "A mechanism for shear thickening of polymer-bearing surfaces: elasto-hydrodynamic coupling", *Europhysics Letters*, **23** (1993) 113.

3• J. Beaucourt *et al.*, "Optimal lift force on vesicles near a compressible substrate", *Europhysics Letters*, **67** (2004) 676.

4• J. M. Skotheim et L. Mahadevan, "Soft lubrication: the elastohydrodynamics of nonconforming and conforming contacts", *Physics of Fluids*, **17** (2005) 092101.

5• T. Salez et L. Mahadevan, "Elastohydrodynamics of a sliding, spinning and sedimenting cylinder near a soft wall", *Journal of Fluid Mechanics*, **779** (2015) 181.

6• G. Dupeux *et al.*, « Le football et ses trajectoires », *Reflets de la Physique*, **28** (2012) 10.

7• B. Saintyves *et al.*, "Self-sustained lift and low friction via soft lubrication", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **113** (2016) 5847.

8• H. S. Davies *et al.*, "Elastohydrodynamic lift at a soft wall", *Phys. Rev. Lett.*, **120** (2018) 198001.

9• B. Rallabandi *et al.*, "Membrane-induced hydroelastic migration of a particle surfing its own wave", *Nature Physics*, **14** (2018) 1211.

10• Z. Zhang *et al.*, "Direct measurement of the elastohydrodynamic lift force at the nanoscale", *Phys. Rev. Lett.*, **124** (2020) 0504502.

11• P. Vialar *et al.*, "Compliant surfaces under shear: elastohydrodynamic lift force", *Langmuir*, **35** (2019) 15605.

Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques : un défi interdisciplinaire

Alexia Auffèves (alexia.auffeves@neel.cnrs.fr)
Institut Néel (UPR2940 CNRS et Université Grenoble Alpes)
25 avenue des Martyrs, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9

Jusqu'ici, la question de la facture énergétique d'un calculateur quantique n'a guère été abordée par les programmes de recherche – bien qu'elle amène actuellement l'industrie des semi-conducteurs à ses limites.

Existe-t-il un avantage quantique de nature énergétique ? Ou bien, au contraire, faudra-t-il une centrale nucléaire par ordinateur quantique ?

Cet article propose des pistes pour répondre à ces questions.

Remerciements
L'autrice remercie chaleureusement Olivier Ezratty, Marco Fellous-Asiani, Benjamin Huard, Yvain Thonnart et Robert Whitney pour leurs relectures attentives.

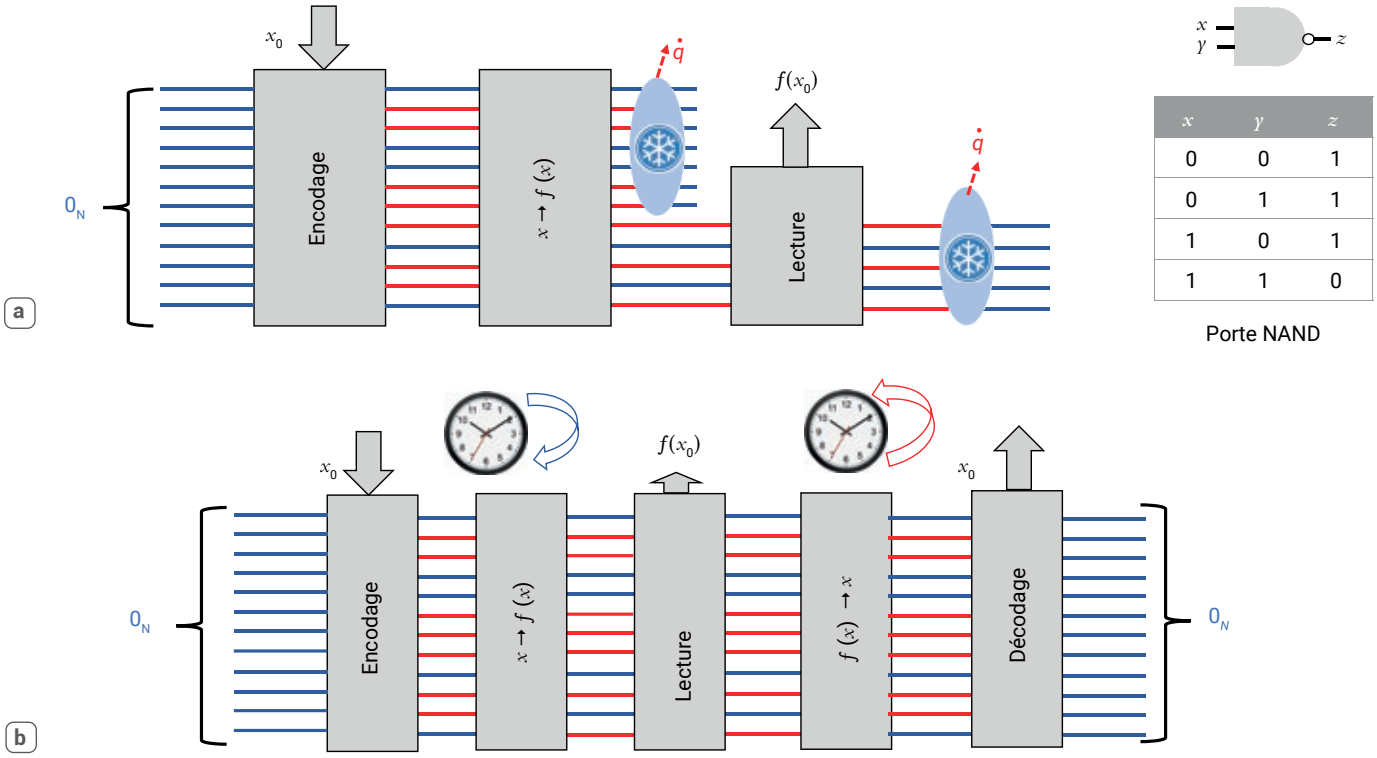
L'informatique quantique est un domaine en plein essor, mettant en synergie la recherche fondamentale, l'ingénierie et l'industrie. En exploitant des mécanismes quantiques tels que la superposition et l'intrication, elle promet de résoudre des problèmes complexes, classiquement intraitables. C'est la « suprématie quantique » [1], une première étape ayant été franchie en octobre 2019 par Google. Si le chemin jusqu'à l'ordinateur quantique résistant aux erreurs est long, il trace déjà de nouvelles voies prometteuses pour le traitement de l'information sur la base des dispositifs physiques actuels.

Cout énergétique du calcul classique

Avant d'aborder la question du calcul quantique, il est indispensable de préciser quelques notions de base sur le traitement de l'information classique. Celle-ci est encodée sur des « bits », à savoir des systèmes physiques ne pouvant prendre que deux états identifiés par convention comme 0 ou 1. Un exemple typique est celui des états « chargé » et « déchargé » d'un condensateur. Il peut également s'agir de l'aimantation d'un matériau. Un registre comportant N bits peut ainsi encoder une valeur d'une variable x parmi 2^N possibilités.

Un calculateur peut être décrit de façon très idéalisée comme une machine programmable ayant pour fonction de délivrer, à partir de la variable x, la fonction f(x) (fig. 1). Pour ce faire, les N bits d'un « registre de calcul » sont initialement préparés dans l'état 0. Cela correspond à l'état « 0_N » du registre, sur lequel la variable x est copiée. Une séquence de portes logiques est ensuite appliquée sur les différents bits du registre, à une fréquence typique appelée fréquence d'horloge. La porte NAND (insert en haut à droite de la figure 1a) est un exemple de porte logique à deux bits. Elle est universelle : tous les calculs classiques peuvent en principe être réalisés sous forme de séquences de portes NAND. Au terme des opérations logiques, le résultat f(x) peut être lu sur le registre, qui doit finalement être réinitialisé dans l'état 0_N pour qu'un nouveau calcul puisse être effectué.

Actuellement, le traitement de l'information classique est caractérisé par son irréversibilité, qui conduit à une dissipation de chaleur. L'irréversibilité est d'abord de nature thermodynamique : par exemple, la résistivité des composants électroniques induit une dissipation de chaleur lors des commutations logiques, qui augmente avec la fréquence d'horloge et la densité des transistors [2]. Il existe également une irréversibilité de nature fondamentale :



x	y	z
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

1. Calcul irréversible *versus* calcul réversible. Un calcul consiste en une séquence d'opérations physiques effectuées sur un registre comportant N bits. La couleur bleue (resp. rouge) symbolise la valeur 0 (resp. 1) du bit correspondant. Le registre est préalablement initialisé dans l'état 0_N, puis la variable x_0 est encodée sur le registre. Une séquence de portes logiques permet le calcul de $f(x_0)$, résultat lu par l'opérateur. Le registre doit être réinitialisé avant le lancement du calcul suivant.
a) Paradigme actuel (dit de Landauer). Les portes logiques utilisées pour le calcul sont irréversibles et le registre est réinitialisé en fin de calcul. Information et chaleur $\dot{q}$ sont dissipées dans un réservoir froid (symbolisé par un flocon de neige). Insert : symbole et table de vérité d'une porte NAND (qui, à deux entrées x et y, pouvant avoir chacune la valeur 0 ou 1, associe une sortie z qui a la valeur 1 seulement si l'une des deux entrées a la valeur 0).
b) Paradigme réversible. Les portes logiques sont réversibles, ce qui permet d'inverser physiquement toutes les étapes du calcul après extraction du résultat. L'énergie dépensée pour réaliser le calcul est récupérée et le registre d'entrée est réinitialisé sans dissipation de chaleur. Le déploiement d'une technologie réversible est à l'étude dans de nombreux laboratoires de R&D.

l'irréversibilité logique, liée à la perte d'information au cours du calcul. Elle est due à la conception physique des portes NAND, avec deux bits en entrée et un seul en sortie (insert de la figure 1a). Elle est également liée à la réinitialisation du registre de calcul (fig. 1a). Comme l'irréversibilité thermodynamique, l'irréversibilité logique a des conséquences énergétiques. Rolf Landauer [3] a ainsi prédit que la perte d'un bit d'information dans un environnement à température T correspond à une dissipation minimale de chaleur de $k_B T \log 2$, typiquement 10^{-20} J à température ambiante[(a)].

Calcul réversible

Dans nos ordinateurs actuels, la dissipation de chaleur est due à l'irréversibilité thermodynamique. Elle est supérieure de trois à quatre ordres de grandeur à la limite fondamentale de Landauer, mais cette dernière pourrait rapidement devenir un obstacle sérieux du fait de l'explosion de la demande en puissance de calcul (*big data*, intelligence artificielle, simulations...). Un changement de paradigme pourrait être apporté par le calcul réversible : le calcul est opéré dans le sens direct, puis après lecture du résultat, est « rembobiné » comme dans un film. Cette opération inverse réinitialise le registre d'entrée sans dissiper de chaleur, et permet de récupérer l'énergie dépensée pour réaliser le calcul (fig. 1b). Ces idées révolutionnaires, conçues par Charles Bennett dans les années 1980, sont considérées comme une solution de plus en plus sérieuse [4]. Plusieurs pistes sont explorées, en particulier le CMOS adiabatique[(b)], et les circuits supraconducteurs réversibles.

Un avantage énergétique quantique ?

A priori, on pourrait s'attendre à ce qu'un calcul quantique soit moins couteux en énergie qu'un calcul classique équivalent, et ce pour deux raisons. D'une part, la notion de superposition d'états de la logique quantique permet d'envisager de diminuer le nombre d'étapes nécessaires à l'obtention du résultat. Ainsi, l'expérience de suprématie quantique [5] réalisée par Google [6] a mis en jeu des puissances typiques de 25 kW, trois ordres de grandeur en dessous des puissances consommées par des supercalculateurs de type IBM Summit[(c)].

D'autre part et même si ce n'est pas une caractéristique usuellement mise en avant, le calcul quantique constitue un exemple typique de traitement réversible de l'information. Celle-ci est codée sur des registres

>>>

A priori, on peut s'attendre à ce qu'un calcul quantique soit moins couteux en énergie qu'un calcul classique équivalent, pour deux raisons. D'une part, la notion de superposition d'états de la logique quantique permet d'envisager de diminuer le nombre d'étapes nécessaires à l'obtention du résultat. D'autre part,... le calcul quantique constitue un exemple typique de traitement réversible de l'information.

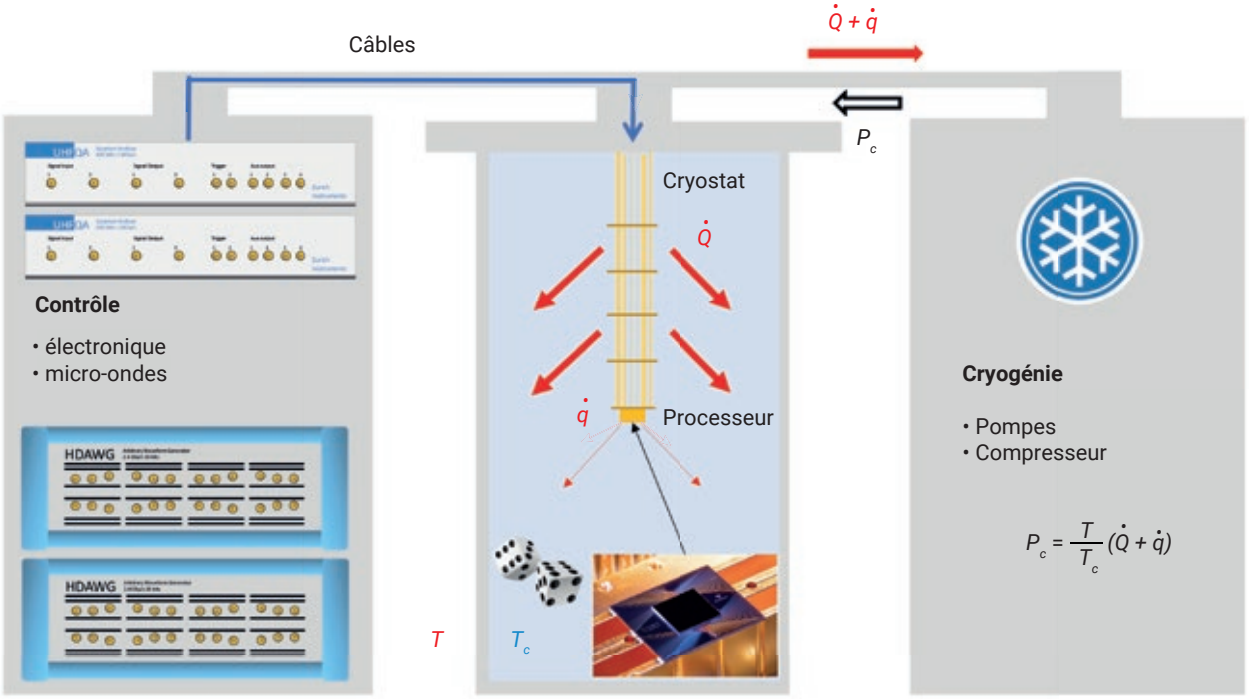
>>>

composés de bits quantiques ou qubits. Contrairement à leurs homologues classiques, les qubits peuvent non seulement se trouver dans l'état « 0 » ou dans l'état « 1 », mais aussi dans des superpositions cohérentes d'états « 0 et 1 ». Un calcul quantique repose ainsi sur la préparation de superpositions cohérentes d'un grand nombre de qubits. Ces états peuvent être vus comme des « chats de Schrödinger », à la fois morts et vivants tant qu'aucune mesure de leur état n'est réalisée. C'est sur cette cohérence à grande échelle que repose une part de l'avantage quantique computationnel, et celle-ci doit être préservée tout au long du calcul.

Cela impose en particulier que les portes logiques quantiques ne dissipent aucune information dans l'environnement : cela reviendrait en effet à mesurer le registre, et à transformer les superpositions cohérentes « 0 et 1 » en états « 0 » ou « 1 », appelés mélanges statistiques, sans intérêt pour le calcul quantique. C'est le phénomène de décohérence, qui rend toute expérience de physique quantique si délicate à réaliser. Les portes quantiques doivent donc être *logiquement réversibles*. Dans un monde idéal, un calcul quantique devrait pouvoir être effectué dans le sens direct au prix d'une certaine énergie, puis l'énergie récupérée en réalisant ensuite le calcul en sens inverse, conduisant à un cout énergétique nul ! Une telle gratuité présuppose cependant que le calcul est effectué sans erreurs, ce qui est irréaliste. Comme expliqué ci-dessous, la lutte contre les erreurs est l'origine fondamentale du cout énergétique du calcul quantique.

Le cout énergétique de la lutte contre le bruit

Un processeur est toujours couplé à un environnement : par exemple, les qubits supraconducteurs sont en interaction avec des phonons, des charges électriques... Les interactions incontrôlées qui en résultent sont à l'origine d'un « bruit quantique », c'est-à-dire des perturbations aléatoires de l'état des qubits qui conduisent à des erreurs dans les algorithmes, d'autant plus sévères que le taux de bruit est plus important. Ultimement, ce bruit tend à dégrader l'état des qubits dans des états de type « 0 » ou « 1 » sans intérêt pour le calcul. Les expérimentateurs doivent donc relever le défi de taille d'isoler le processeur du bruit quantique (fig. 2).



2. Un calculateur quantique est un système hors-équilibre. Le processeur est refroidi à la température $T_C < T$, où T est la température ambiante. Les dés symbolisent le bruit quantique rémanent à l'intérieur du cryostat. Le processeur est contrôlé depuis l'extérieur par des câbles qui dissipent un taux de chaleur $\dot{Q}$ (flèches épaisses rouges), le processeur dissipant $\dot{q}$ (flèches fines rouges). La puissance dépensée ne peut pas être inférieure à la puissance de Carnot $P_C = (T/T_C)(\dot{Q} + \dot{q})$

D'un point de vue thermodynamique, il s'agit typiquement de réaliser un processus « hors-équilibre », à savoir préserver la cohérence et l'intrication quantiques alors même que le bruit tend à les détruire. Le deuxième principe de la thermodynamique nous enseigne que maintenir des états hors-équilibre a un cout fondamental, qui est à l'origine de la facture énergétique du calcul quantique. Ramener le bruit à des taux compatibles avec une certaine probabilité de succès du calcul coute une puissance minimale – d'autant plus importante que le taux de bruit visé est plus faible. On liste ci-dessous les principaux postes de dépense dans le cas typique de qubits solides, tels que les supraconducteurs ou les qubits de *spin* d'électron piégé dans une boîte quantique en matrice de silicium. Les pistes pour réduire ces couts sont également indiquées. La stratégie de réduction du bruit comporte généralement trois étapes à réaliser successivement.

1) *Calculer à froid.* Pour la plupart des qubits à l'état solide, la première action est de réduire le bruit thermique en plaçant le processeur en environnement cryogénique. Le calcul est effectué au cœur de cryostats à dilution où la température est de quelques millikelvins (pour les qubits supraconducteurs), et jusqu'à 1 K (pour les qubits de *spin*). Dans les expériences actuelles, le processeur est relié à l'extérieur *via* des câbles transportant des signaux analogiques : ce sont des impulsions micro-ondes activant les portes à un et deux qubits et servant à la mesure de ceux-ci.

La puissance minimale à consacrer au maintien de la température T_c des qubits est la puissance de Carnot. Dans une approche simplifiée[(d)], celle-ci est proportionnelle au rapport des températures T/T_c, où T est la température ambiante. Cela motive à augmenter la température opérationnelle T_c. L'amélioration de l'efficacité des cryostats fait l'objet d'importantes recherches en cryogénie. D'autre part la puissance de Carnot évolue comme $\dot{Q}$, le taux de chaleur dissipée à l'intérieur du cryostat, qui a deux sources principales de nature pratique (fig. 2) : (i) les impulsions micro-ondes doivent être amplifiées, puis atténuées fortement pour filtrer le bruit thermique venant de l'extérieur, ce qui occasionne d'importantes dissipations de chaleur ; (ii) les câbles conduisent la chaleur de l'extérieur dans le cryostat. Il est délicat de donner une valeur précise pour $\dot{Q}$, tant celle-ci dépend d'une multiplicité de paramètres tels que la technologie des câbles, les stratégies de multiplexage, les températures aux différents étages du cryostat, le nombre de portes logiques activées en parallèle... On donne des ordres de grandeur dans le cas d'une porte à 1 qubit (voir l'encadré). L'optimisation de $\dot{Q}$ sera un enjeu essentiel, qui repose sur un travail largement interdisciplinaire.

2) *Calculer plus vite que le bruit.* La cryogénie permet de ramener le bruit affectant les qubits à des niveaux tolérables. La deuxième action est de réaliser les calculs sur des échelles de temps courtes pour réduire la probabilité qu'une erreur se produise au cours de son déroulement. Cette stratégie a ses limites, car elle augmente la puissance consommée et donc la chaleur dissipée à l'intérieur du cryostat par unité de temps, notamment pour activer les portes quantiques. Qui plus est, la puissance de contrôle est bornée supérieurement sous peine d'induire des erreurs[(e)], voire de détruire le qubit.

3) *Corriger les erreurs.* Réaliser pleinement les promesses de l'informatique quantique implique la manipulation de registres de grande taille et l'enchainement d'un grand nombre de séquences de portes quantiques. C'est par exemple le cas de l'algorithme de factorisation de nombres entiers de Shor [7], qui pourrait être utilisé pour décrypter une clé RSA. Cela constitue un exemple de « suprématie quantique » [5], à même de générer des failles de sécurité redoutables. Une telle opération requiert l'activation de millions de portes logiques – augmentant d'autant la probabilité d'échec de l'algorithme complet [8]. Les stratégies 1) et 2) présentées ci-dessus ne sont en général pas suffisantes pour réduire le bruit aux niveaux souhaités[(f)]. Il faut donc développer des dispositifs tolérants aux erreurs, fondés sur la redondance de l'information [9]. Un bit d'information quantique (le qubit dit « logique ») est alors codé sur plusieurs qubits physiques (de 5 pour les codes correcteurs d'erreur les plus simples, à plusieurs dizaines de milliers). Les erreurs sont détectées et corrigées au cours même du calcul, mais le prix à payer est élevé : le nombre de qubits contenus par le processeur tolérant aux erreurs peut alors atteindre plusieurs millions, ce qui impose une importante quantité d'électronique de contrôle et de connexions avec l'extérieur du cryostat.

>>>

Consommation énergétique d'une porte à un qubit supraconducteur

On donne ici des ordres de grandeur de consommation énergétique dans le cas d'un processeur élémentaire, composé d'un unique qubit supraconducteur. Un algorithme se réduit à une séquence de portes quantiques à un qubit, c'est-à-dire un train d'impulsions micro-ondes. La puissance typique d'une telle impulsion est $P_g = 10^{-12}$ W, ce qui correspond à une dizaine de photons de fréquence 10 GHz échangés pendant 1 ns.

On distingue les deux scénarios ci-dessous.

- **Scénario non autonome** : les signaux sont mis en forme à l'extérieur du cryostat et amenés au qubit *via* un câble, dont la conduction induit un taux de chaleur typique au niveau du processeur $\dot{Q}_{cond}$ $(T \to T_c) = 1$ mW (valeur pour un mètre de coaxial entre $T = 300$ K et $T_c = 1$ mK). D'autre part, le câble conduit également le rayonnement thermique à température ambiante. Afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, les impulsions sont amplifiées lors de leur génération, puis atténuées au niveau du qubit de typiquement $A = T/T_c$. L'atténuateur dissipe ainsi un taux de chaleur $\dot{Q}_{diss} = AP_g = 10^{-7}$ W.
- **Scénario autonome** : les signaux sont mis en forme à l'intérieur du cryostat. La dissipation de chaleur se réduit à celle de l'électronique de contrôle, $\dot{q}_{CMOS} = 1$ mW par porte active. Cette valeur pourrait être encore réduite en exploitant des technologies alternatives.

>>>

Les pistes autonomes

Les connexions du processeur froid avec le monde extérieur sont à l'origine de la plus grosse partie de la facture énergétique, du fait de la dissipation de chaleur interne au cryostat par les câbles. L'amélioration des architectures de calcul, de la connectivité des codes et de l'adressage des qubits est indispensable, mais permettra difficilement une réelle mise à l'échelle. Pour pallier cette difficulté, il est envisagé à moyen terme que la génération des signaux analogiques qui contrôlent le processeur, tout comme le traitement de l'information, soient effectués à l'intérieur du cryostat, le calcul se déroulant en autonomie complète [9]. La communication avec l'extérieur se réduirait alors à l'envoi d'instructions et à l'extraction du résultat, respectivement au début et en fin de calcul, le tout sous la forme de signaux numériques.

Dans cette situation, la dissipation de chaleur $\dot{q}$ (fig. 2) est localisée au niveau du processeur, et essentiellement due à l'électronique contrôlant *in situ* la génération et la lecture des micro-ondes, ainsi que la correction des erreurs. C'est dans cette perspective qu'est actuellement développée la technologie de cryo-CMOS, qui vise à améliorer les performances énergétiques des transistors en environnement cryogénique. Cependant, les meilleures projections estiment une réduction de la dissipation à quelques $\dot{q}_{CMOS} = 100\ \mu W$ par porte active. Au vu de leur performance actuelle, la consommation d'énergie des cryostats devrait atteindre 1 MW pour supporter un million de qubits physiques fonctionnant à 10 mK[g].

Ces estimations mettent en lumière tout l'intérêt pour le calcul quantique d'explorer des pistes alternatives telles que le calcul réversible, qui pourraient réduire drastiquement la facture énergétique de la partie classique de l'ordinateur quantique. Elles montrent aussi que les performances énergétiques du traitement classique et quantique de l'information sont irréductiblement liées. Eu égard au nombre de qubits potentiellement en jeu, réduire le cout énergétique de l'électronique de contrôle apparait essentiel. Dans une perspective encore plus futuriste, les mécanismes de correction d'erreur (mesure et rétroaction) pourraient être intégralement réalisés à l'échelle quantique sans mettre en jeu aucune information classique – réduisant d'autant la facture énergétique.

Conclusion et perspectives

Le dimensionnement énergétique des calculateurs quantiques apparait comme une contrainte fondamentale pour leur mise à l'échelle, et définit les conditions de possibilité d'un nouvel avantage quantique de nature purement énergétique. La compréhension et l'optimisation de leur consommation trace de nouvelles pistes d'exploration à l'interface entre recherche fondamentale et ingénierie. Les pistes évoquées ici peuvent servir de base à la réalisation d'une étude globale et systématique de la consommation énergétique pour les différentes technologies de qubits actuellement développées [10].

Ultimement, c'est bien la présence du bruit qui empêche d'inverser le sens d'un calcul et de récupérer l'énergie dépensée pour le réaliser. L'un des défis de la recherche sera de dériver de nouvelles bornes fondamentales reliant quantitativement le taux de bruit à la consommation énergétique des calculateurs, en particulier dans le régime quantique. L'enjeu, de taille dans un monde dont les ressources paraissent toujours plus limitées, sera d'optimiser leur consommation et de dégager tout l'avantage énergétique que l'on peut attendre de ces calculateurs d'un nouveau type. ■

Références

1• M. Le Bellac, « Peut-on parler de suprématie quantique ? », *Reflets de la physique* **67** (2020) 4-8.

2• J.L Hennessy et D. A. Patterson, "A New Golden Age for Computer Architecture", *Communications of the ACM* **62** (2019) 48-60.

3• R. Landauer, "Irreversibility and heat generation in the computing process", *IBM Journal of Research and Development*, **5** (3) (1961) 183–191.

4• C.H. Bennett, "Logical Reversibility of Computation", *IBM Journal of Research and Development*, **17** (6) (1973) 525-532.

5• J. Preskill, "Why I Called It 'Quantum Supremacy'", *Quanta Magazine* (2 octobre 2019).

6• F. Arute, "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor", *Nature* **574** (2019) 505-510.

7• P.W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring", *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, IEEE Comput. Soc. Press (1994) 124-134.

8• C. Gidney et M. Ekerå, "How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits", *Quantum* **5** (2021) 433.

9• M.A. Nielsen et I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*, Cambridge University Press (2010).

10• J. Bardin *et al.*, "A 28nm Bulk-CMOS 4-to-8GHz <2mW Cryogenic Pulse Moderator for Scalable Quantum Computing", *Proceedings of the 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference* (2019) 456-458.

11• O. Ezratty, *Comprendre l'informatique quantique* (2020), e-book téléchargeable sur www.oezratty.net/wordpress/2020/comprendre-informatique-quantique-edition-2020/

(a) Il s'agit d'une valeur microscopique, typiquement l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt.

(b) CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) est une technique de fabrication de composants électroniques.

(c) Il est probable qu'un tel avantage énergétique pourra être conservé dans les évolutions à court terme du calcul quantique de type "Noisy Intermediate Scale Quantum" ou NISQ, qui utilise des calculateurs exploitant quelques dizaines de qubits physiques en l'absence de toute correction d'erreur. Certains algorithmes quantiques présentent déjà un intérêt pratique.

(d) En toute rigueur, il faut tenir compte des températures aux différents étages du cryostat.

(e) Dans les qubits supraconducteurs, il s'agit notamment de l'excitation de niveaux d'énergie plus élevés.

(f) Ainsi, la factorisation d'une clef de 2048 qubits requiert l'activation de $L = 2048^2$ portes, chacune ayant une probabilité d'erreur p_{err}. Pour que l'algorithme total ait une probabilité d'erreur inférieure à 1/3, il convient que $p_{err} < 1/3L \approx 10^{-6}$, largement en deçà des capacités technologiques actuelles (autour de 10^{-4} [5]).

(g) La puissance de Carnot s'écrit : $P_C = (T/T_C)\ N_q\ P_{CMOS} \sim 1$ MW, où on a introduit le nombre de qubits physiques $N_q = 10^6$ (typique pour un processeur résistant aux pannes), la puissance dissipée $P_{CMOS} = 100\ \mu W$, et le facteur de magnification $(T/T_c) = 10^4$.

Du flou des images astronomiques à un prix Nobel de physique

Pierre Léna[1, 2] (pierre.lena@obspm.fr) et **Guy Perrin**[1] (guy.perrin@obspm.fr)
(1) LESIA (Observatoire de Paris, Université PSL CNRS, Sorbonne Université, Université de Paris). Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon Cedex
(2) Université de Paris

Deux des lauréats du prix Nobel de physique 2020 sont primés pour leurs observations [1], qui ont confirmé l'existence d'un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie. En améliorant considérablement, jusqu'à un facteur de plus de cent-mille parfois, la résolution spatiale des télescopes utilisés, ils ont exploré un véritable laboratoire de relativité générale, au plus près de cette singularité de l'espace-temps.

Ces gains en résolution résultent d'un franchissement de la limitation imposée par l'atmosphère terrestre, grâce à l'interférométrie des tavelures (1970), puis l'optique adaptative (1989), enfin la mise en service de télescopes optiques géants (ca. 2000), et du réseau interférométrique du Very Large Telescope européen.

Cet article prolonge celui de N. Deruelle et J.P. Lasota, « Le prix Nobel de physique 2020, ou la consécration des trous noirs », *Reflets de la physique* **68** (2021) 20-23.

© ESO/S. Brunier

Le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO durant les observations. Un laser est lancé du télescope UT4 pour créer une étoile artificielle à une distance de 90 km de la Terre. Ce laser fait partie du système d'optique adaptative qui permet aux astronomes d'éviter les effets de turbulence de l'atmosphère, et produit des images presque aussi nettes que si le télescope était dans l'espace (voir encadré, p. 23).

Galilée fut le premier, avec sa lunette, à dépasser le pouvoir de résolution angulaire de l'œil nu, et à mettre en évidence des détails inconnus sur des objets célestes. Depuis, cette quête du détail n'a jamais cessé. Malgré un diamètre D croissant (télescope Hale de D = 5 m, Mont Palomar, 1952), la résolution spatiale des télescopes optiques – lumière visible, puis infrarouge depuis quelques décennies – demeurait limitée par la turbulence de l'atmosphère terrestre à environ une seconde d'arc (le *seeing*), et ne pouvait atteindre la résolution ultime (λ/D) fixée par la diffraction de la lumière. L'accès à l'espace (Hubble, D = 2,4 m, 1989) s'en affranchissait, mais ce ne sera qu'en 2022 que le James Webb Space Telescope (D = 6,4 m) progressera dans cette voie.

Dès 1868, Hippolyte Fizeau avait proposé de mesurer le diamètre des étoiles en atteignant, ou même augmentant, la résolution λ/D par une méthode interférométrique. Albert Michelson mit en œuvre cette idée sur le télescope Hooker (D = 2,5 m, étendu ainsi à 6 m) au Mont Wilson (Californie). En 1920, Francis Pease et lui furent les premiers à mesurer le diamètre angulaire d'une étoile, Bételgeuse (environ 40 millisecondes d'arc), améliorant d'un facteur vingt-cinq la limite imposée par le *seeing*. La physique de l'équilibre interne des étoiles, disposant ainsi de vérifications par l'observation, progressa alors rapidement.

Dans les années 1950, la radioastronomie aux longueurs d'onde supérieures au centimètre (moins affectées par l'atmosphère) exploita l'idée de Fizeau. La combinaison cohérente des rayonnements reçus par plusieurs télescopes distants, formant un interféromètre, synthétisa l'image que donnerait un télescope de plusieurs centaines de mètres de diamètre, voire davantage, dans le cas d'instruments situés à des distances intercontinentales.

>>>

>>>

Aux longueurs d'onde optiques, les effets de *seeing* et la précision instrumentale requise dissuadèrent longtemps un effort semblable, jusqu'en 1975 quand Antoine Labeyrie sut coupler de façon cohérente deux petits télescopes distants de 12 mètres, puis davantage, et mesurer le diamètre de l'étoile Véga avec une précision exceptionnelle. Ce résultat, et les entreprises parallèles qui suivirent dans le monde, influèrent de façon décisive sur la conception, alors en cours, du Very Large Telescope européen.

Quant à la limitation imposée aux télescopes optiques par le *seeing*, elle fut franchie progressivement à partir de 1970 par un traitement des images perturbées, proposé par Labeyrie, puis définitivement en 1989 grâce à l'optique adaptative (voir encadré, p. 23). Cette méthode de correction du front d'onde après sa traversée de l'atmosphère, en temps réel, restitua aux télescopes géants de la fin du XXe siècle la résolution limitée par la diffraction.

Turbulence atmosphérique, limite de diffraction et interférométrie des tavelures

En 1970, utilisant le télescope de 5 m du Mont Palomar, A. Labeyrie montre que la tache de *seeing* contient encore de l'information à haute fréquence spatiale sur la structure de l'objet [2]. Une transformation de Fourier permet de retrouver le module des composantes de hautes fréquences et donc, sans toutefois reconstituer une véritable image, d'obtenir une précieuse information sur les détails compris entre l'étalement du *seeing* et la limite (λ/D) imposée par la diffraction. Cette démonstration a d'importantes conséquences. Dans le visible et le proche infrarouge, elle permet des mesures du diamètre de certaines étoiles brillantes, des condensations de formation d'étoiles, des éjections de matière par ces dernières. L'interférométrie des tavelures, comme elle est alors nommée, confronte les modèles de propagation lumineuse dans un milieu d'indice aléatoire – ici l'atmosphère – avec les observations. Sont ainsi mis en évidence : la dépendance chromatique de l'aire de cohérence du front d'onde, du temps de cohérence dans l'image, du domaine isoplanétique autour d'un point de celle-ci, ainsi que d'autres facteurs caractéristiques de la turbulence en un site donné, telle l'échelle externe ou la répartition verticale des couches turbulentes entre le sol et la tropopause. Par comparaison à la lumière visible, ces facteurs sont tous plus favorables dans le proche infrarouge, comme le montra François Roddier.

En 1977, s'inspirant de techniques numériques mises au point pour le traitement des images en radioastronomie (algorithme Clean), Gerd Weigelt montre qu'un traitement analogue (*triple masking*) permet à l'interférométrie des tavelures de récupérer l'intégralité d'une image jusqu'à la limite de diffraction, au prix d'une perte significative de rapport signal sur bruit. D'autres méthodes statistiques voient le jour, en particulier celles qui consistent à sélectionner, parmi les images aléatoires instantanées – poses de quelques centièmes de seconde figeant la turbulence –, les plus riches en hautes fréquences et à reconstruire une image par translation et addition de ces instantanés (*lucky imaging*, *shift-and-add*...).

Un pas essentiel est franchi avec la première démonstration de l'optique adaptative en astronomie, qui fut accomplie par une équipe française en 1989 et fournit une image à la limite de diffraction d'un télescope de 1,52 m [3]. Cet outil équipera naturellement le Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO), alors en construction sur le Cerro Paranal à 2630 m d'altitude dans le désert d'Atacama (Chili). Cet instrument géant entre en service dix ans plus tard, avec une optique adaptative dotée d'une caméra infrarouge (Naos-Conica), située au foyer de l'un des quatre télescopes de 8,2 m. Il en est de même au Keck Telescope au Mauna Kea (Hawaï). Au Chili comme à Hawaï, la limite de diffraction à λ = 2,2 µm est atteinte.

Un trou noir potentiel au centre de la Voie lactée

Entre 1974 et 1982, une source radio est identifiée au centre cinématique de notre Galaxie, situé dans la direction de la constellation du Sagittaire. Son nom, Sgr A★, en dérive. Dès 1985, à Berkeley, Charles Townes (prix Nobel de physique 1964 pour la conception du maser), avec notamment le jeune Reinhard Genzel, publie une étude sur cette région qui, à partir d'un ensemble d'observations radio et infrarouge, conclut à la présence probable d'un trou noir massif. Peu auparavant, l'existence de tels objets avait été postulée pour expliquer l'extrême intensité d'émission lumineuse par les quasars. Ce n'est qu'en 1998 que l'étude radioastronomique du mouvement de masers H_2O autour de Sgr A★ donnera une première indication de la masse de cet objet. R. Genzel et A. Eckart installent une caméra infrarouge (32 X 32 pixels, format maximal à l'époque) sur le New Technology Telescope (3,58 m) de l'ESO au Chili. Le domaine infrarouge s'impose, vers 2,2 µm, puisque ce n'est qu'à ces longueurs d'onde que les nuages denses de poussière, situés dans l'épaisseur du plan galactique, deviennent transparents. Appliquant la technique de sélection d'images ci-dessus, ils obtiennent une carte du champ d'étoiles entourant Sgr A★ avec une résolution proche de 0,1 seconde d'arc. Ces observations sont poursuivies de façon continue jusqu'en 2002 et permettent de reconstruire les mouvements propres de plusieurs dizaines d'étoiles.

Utilisant la même technique de sélection d'images sur l'un des télescopes Keck de 10 m mis en œuvre à Hawaï à partir de 1998, Andrea Ghez à Berkeley publie un catalogue de ces étoiles, qui met également en évidence leurs trajectoires elliptiques [4]. Ces deux équipes concurrentes, mais qui échangent leurs résultats, déduisent par simple application de la troisième loi de Kepler une masse entre 2 et 8 10^6 M_{Soleil} pour l'objet central, dont la nature de trou noir devient de plus en plus probable. Mais ces mesures sont encore très loin de l'échelle spatiale à atteindre pour montrer que cette masse est circonscrite à l'horizon du trou noir. Il s'en faut d'un facteur 50 000 en résolution !

Une étroite collaboration s'installe entre les équipes allemande et française, ces dernières ayant construit l'instrument Naos. Parmi toutes les étoiles environnant Sgr A★, l'une d'entre elles, S2, retient particulièrement l'attention avec une orbite fortement elliptique et une période de 16 ans, les passages au péricentre devant se produire en 2002 et 2018. S2 approche alors Sgr A★ à une distance de 17 heures-lumière, soit un angle de 12 millisecondes d'arc vu de la Terre. La détermination précise de l'orbite, en mesurant la vitesse projetée, bénéficie de la résolution accrue. Ceci permet d'affiner la détermination de la masse centrale et d'affirmer progressivement le caractère extrêmement compact

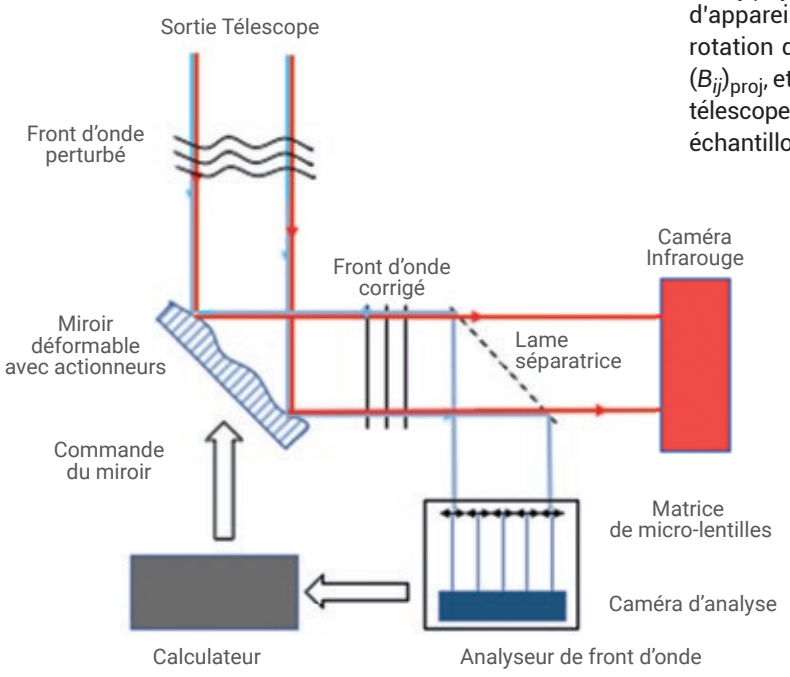
>>>

Optique adaptative et interférométrie stellaire

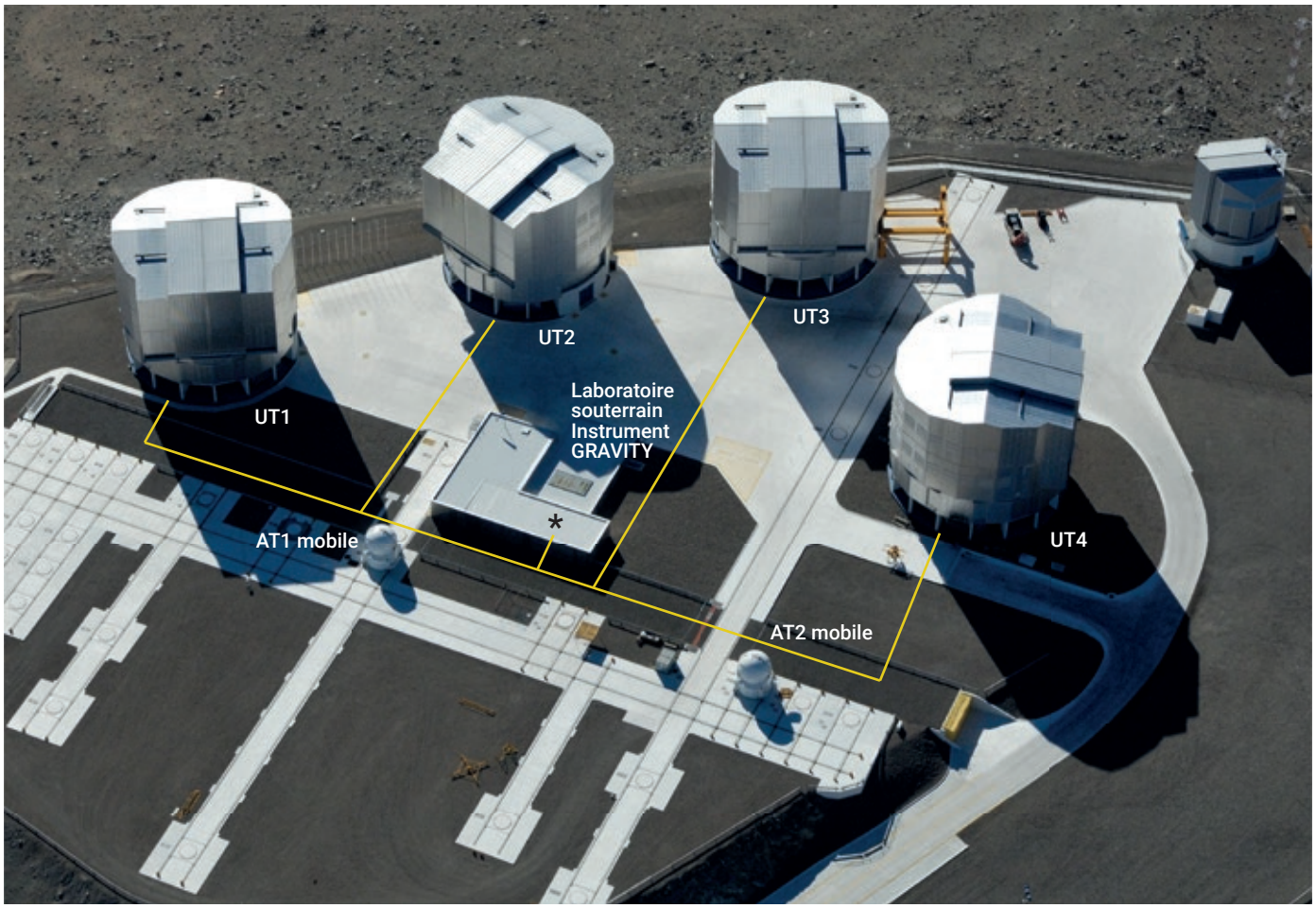
Recevant d'une source ponctuelle une onde lumineuse plane monochromatique de longueur d'onde λ, l'objectif (de diamètre D) d'un télescope placé dans l'espace en donne en son foyer une image dont la distribution d'intensité est fixée par la figure d'Airy (une tache brillante entourée de cercles concentriques de plus faible luminosité), étalée par la diffraction et d'une largeur angulaire à mi-hauteur d'environ λ/D. Mais si l'onde a traversé l'atmosphère terrestre où les inhomogénéités aléatoires de température créent des inhomogénéités d'indice de réfraction, la surface d'onde abordant l'objectif est comme « cabossée en phase ». Ses retards ou avances de phase, rapidement variables dans le temps et aléatoires sur la surface de l'onde, peuvent être de l'ordre de la longueur d'onde, voire supérieurs. Très élevés et affectant l'amplitude, ils sont responsables de la scintillation des étoiles. Plus faibles, ils provoquent un étalement de l'image focale, déjà compris par Newton et appelé *seeing* par les astronomes. Cette tache de *seeing* a généralement une dimension de l'ordre de la seconde d'arc, soit près de vingt fois la limite de diffraction à $\lambda = 2\ \mu$m pour un télescope de 8 m : la perte de résolution angulaire est dramatique.

L'**optique adaptative** est une méthode active de « décabossage » du front d'onde, qui restitue sa phase d'origine et donc la qualité ultime de l'image [11]. Pour atteindre ce but, trois éléments sont utilisés (fig. E1). Prélevant une partie de l'énergie du front d'onde, l'*analyseur de front d'onde* l'échantillonne et en mesure rapidement (à l'échelle du kHz) les écarts de phase. La déformation de la surface d'un petit *miroir*, placé sur une pupille image de l'objectif, est obtenue par une grille d'actionneurs, qui sont commandés par un *calculateur* à partir des écarts mesurés. La méthode connait toutefois une limite, lorsque l'objet étudié est trop peu brillant pour que l'analyseur mesure la phase à la fréquence requise, fixée par l'état de l'atmosphère. Parfois, une étoile assez brillante est suffisamment proche de l'objet (dans le plan du ciel) pour être utilisée par l'analyseur comme référence et permettre la correction : on s'appuie alors sur la corrélation existante entre les perturbations affectant les parcours de deux ondes aux trajets très voisins. Sinon, la solution récemment adoptée consiste à exciter avec un laser, tiré par le télescope (voir la figure p. 21), la couche d'atomes de sodium fluorescents présents dans la haute stratosphère pour y créer une étoile artificielle, proche de la ligne de visée et servant de référence à l'analyseur.

L'**interférométrie stellaire** est une version développée de l'expérience des trous d'Young. Elle recherche une résolution angulaire plus élevée encore que λ/D, en combinant en un foyer unique F la lumière issue de plusieurs télescopes T_1, T_2, ..., T_n, répartis sur un plan à des distances mutuelles B_{ij} (bases interférométriques) et observant simultanément l'objet (fig. 1, p. 24). Si l'on veille à ce que les chemins optiques T_iF soient maintenus égaux à quelques nanomètres près, des franges d'Young se produisent en F, correspondant aux $n(n-1)/2$ séparations entre télescopes. En échantillonnant ainsi le plan des fréquences spatiales, la mesure de l'amplitude et de la phase relative (nombre complexe) de ces systèmes de franges fournit des valeurs discrètes de la transformée de Fourier de l'image recherchée. En référence à l'onde incidente, c'est la *valeur projetée* de la base sur le plan d'onde qui définit la fréquence spatiale explorée, laquelle dépend donc de la direction de l'objet étudié. La fréquence la plus élevée est $(B_{ij})_{proj}/\lambda$, quand $(B_{ij})_{proj}$ est la plus grande valeur des séparations projetées entre télescopes, valeur qui peut atteindre plusieurs dizaines de fois leur diamètre ou davantage. La résolution atteinte est $\lambda/(B_{ij})_{proj}$, et la qualité de l'image ainsi construite (fonction d'appareil) est d'autant meilleure que n est grand. À n fixé, la rotation de la Terre change au cours du temps la valeur des $(B_{ij})_{proj}$, et il est également possible de modifier les bases si les télescopes sont mobiles. L'une et l'autre conduisent à un meilleur échantillonnage du plan de Fourier, donc à une meilleure image.



E1. Principe de l'optique adaptative. Le schéma met en évidence les trois éléments essentiels d'une optique adaptative : l'*analyseur de front d'onde*, le *calculateur* (ordinateur), le *miroir déformable*, dont la surface est contrôlée par un ensemble d'actionneurs (piezo-électriques ou autres). L'analyseur échantillonne, à une longueur d'onde choisie (traits bleus) le front d'onde perturbé, réfléchi par une lame séparatrice, à l'aide d'une matrice de microlentilles, dont les images sur la caméra d'analyse fournissent la pente locale du front. Initialement, le front d'onde n'est pas corrigé, tandis que la figure présente la situation lorsque la boucle de rétroaction (flèches) fonctionne sur un front corrigé, qui est également reçu (traits rouges) par la caméra infrarouge, laquelle fournit alors l'image finale du champ étudié.
(Source : G. Rousset & J.C. Fontanella).



1. Le Very Large Telescope Interferometer (VLTI) sur le Cerro Paranal dans le désert d'Atacama (Chili). Le mode interférométrique du VLT consiste à coupler de façon cohérente soit les quatre télescopes (UT) de 8,2 m, soit les quatre télescopes auxiliaires (AT) de 1,8 m, mobiles sur rail, soit même une combinaison des UT et AT. Les différents faisceaux cheminent sous terre (lignes jaunes), après avoir reçu une première correction d'optique adaptative à leur sortie du télescope. Ils sont remis en phase par des lignes à retard variable, compensant notamment la rotation de la Terre, situées dans le laboratoire souterrain (marqué *), où ils sont finalement recombinés pour former la figure d'interférence, puis détectés par l'instrument Gravity, également situé dans ce laboratoire. (Source : ESO).

>>>

de celle-ci. En outre, sur ce même télescope, le spectrographe Sinfoni, également corrigé par l'optique adaptative, mesure l'effet Doppler-Fizeau de S2 et donne la valeur de la composante radiale de sa vitesse.

De surcroit en 2003, le suivi de la région centrale met en évidence de brusques sursauts d'intensité lumineuse (*flares*), localisés sur la position de Sgr A*, dont l'interprétation n'est pas immédiate, mais qui sont sans doute liés au comportement de la matière dans le voisinage immédiat du trou noir [5]. La contrainte sur la compacité de l'objet restant limitée par la résolution angulaire, cette découverte rend plus nécessaire encore son amélioration.

L'optique adaptative rend possible l'interférométrie optique du VLT

L'étape suivante consiste donc à utiliser le mode interférométrique du VLT, appelé Very Large Telescope Interferometer (VLTI). Ce mode combine de façon cohérente les quatre télescopes de 8,2 m – Unit Telescopes ou UT (fig. 1). On mesure ainsi les fréquences spatiales d'une image dont la résolution atteint λ/B_p où B_p est la projection, sur le front d'onde incident, de la plus grande des bases interférométriques disponibles, soit ici B = 130 m entre les télescopes UT1 et UT4. La rotation de la Terre permet de couvrir un ensemble de fréquences spatiales, améliorant l'image obtenue alors par synthèse d'ouverture (voir l'encadré p. 23).

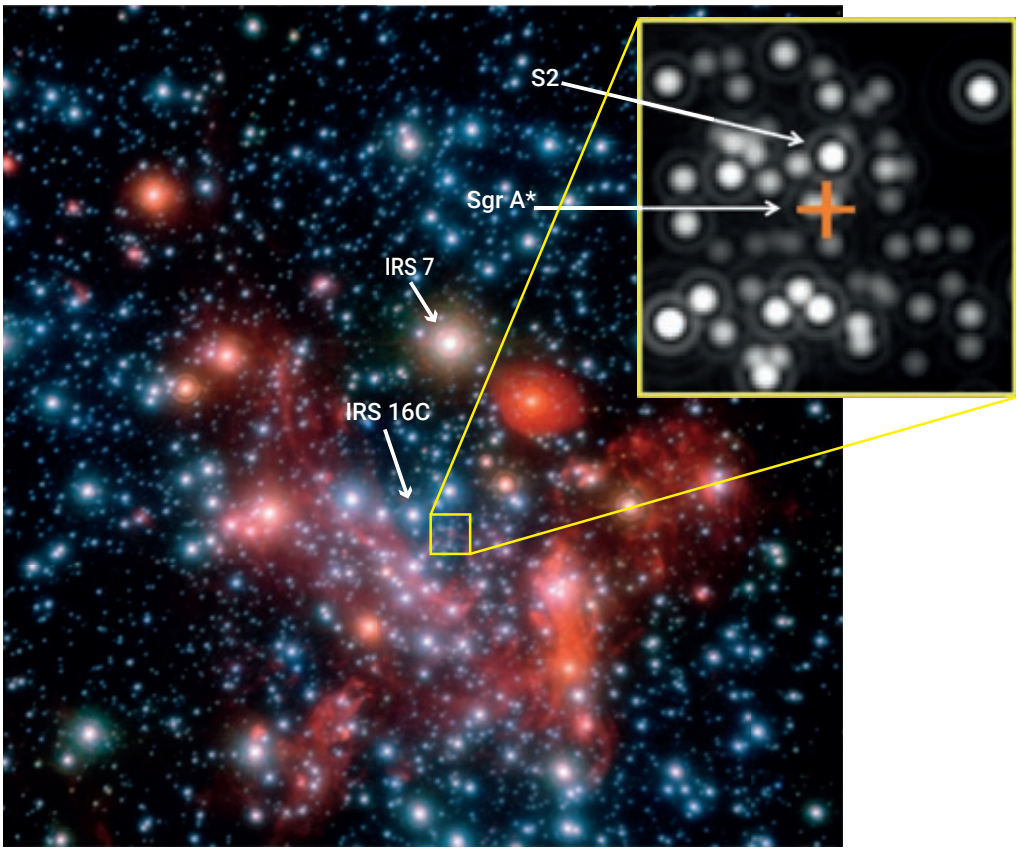
Décidé en 1987, le VLTI aboutit en 2002, soit quatre ans après la première lumière du VLT. Deux de ses UT sont alors couplés, et l'ensemble de quatre UT le sera en 2010 avec le système de recombinaison Pionier, réalisé en optique intégrée à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble.

Néanmoins, un chemin important restait à parcourir avant de pouvoir observer le cœur du centre galactique avec le VLTI, car des gains en sensibilité et en précision angulaire, chacun d'un facteur 1000, demeuraient nécessaires. Dans ce but et dès 2005, un nouvel instrument focal, appelé "Gravity", est mis en chantier par les équipes du Max-Planck Institute für extraterrestriche Physik (Garching) et de l'Observatoire de Paris. La combinaison d'une maitrise de l'optique adaptative, avec

analyse de surface d'onde dans l'infrarouge, et de l'interférométrie de précision associée à la nature de l'environnement de Sgr A★ joue alors un rôle décisif [6]. L'instrument Gravity, devenu opérationnel à partir de 2016, exploite une circonstance favorable et tout à fait particulière à l'environnement immédiat de Sgr A★. En effet, la présence d'étoiles de référence, très proches de l'objet central et suffisamment brillantes, permet de faire fonctionner les systèmes d'optique adaptative sans étoile laser (voir l'encadré) et de stabiliser les franges d'interférence pour augmenter le temps de pose d'un facteur 1000 par rapport aux instruments conventionnels (fig. 2 et fig. 3).

La mesure finale fait appel à trois asservissements simultanés : le premier pour corriger les effets de la turbulence dès la sortie des quatre télescopes UT du VLT (optique adaptative sur l'étoile de référence IRS7) ; le deuxième au foyer commun pour corriger les résidus de turbulence sur une source interne avant recombinaison des faisceaux ; le troisième enfin pour mesurer les systèmes de franges dans le minuscule champ interférométrique de 2'' x 2'', en asservissant sur l'étoile IRS16C (fig. 2 et fig. 3).

En amont de Gravity, des lignes à retard compensent les écarts de phase entre les faisceaux issus des quatre télescopes UT. Ces écarts sont provoqués par la rotation terrestre et la géométrie des bases par rapport à la direction de la source observée. Gravity forme et mesure à chaque instant six systèmes de franges en combinant les quatre faisceaux du VLTI par paires. L'image finale sera déduite de ces mesures (voir l'encadré). Des fibres monomodes en verre fluoré filtrent les turbulences résiduelles, compensent les écarts de différence de marche entre l'objet étudié et l'étoile de référence, et enfin contrôlent les polarisations. Ces techniques sont nées d'un long parcours sur des interféromètres équipés de télescopes de petit diamètre, tels que Fluor avec V. Coudé du Foresto ou 'Ohana avec G. Perrin. L'optique intégrée fait de Gravity un instrument compact et très stable, qui non seulement atteint dans l'image la limite de diffraction λ/B = 2 mas (millisecondes d'arc), mais peut la dépasser d'un facteur cent en faisant une mesure différentielle de distance entre les images de deux objets voisins, chacune pourtant limitée en résolution à λ/B (*astrométrie interférométrique différentielle*).

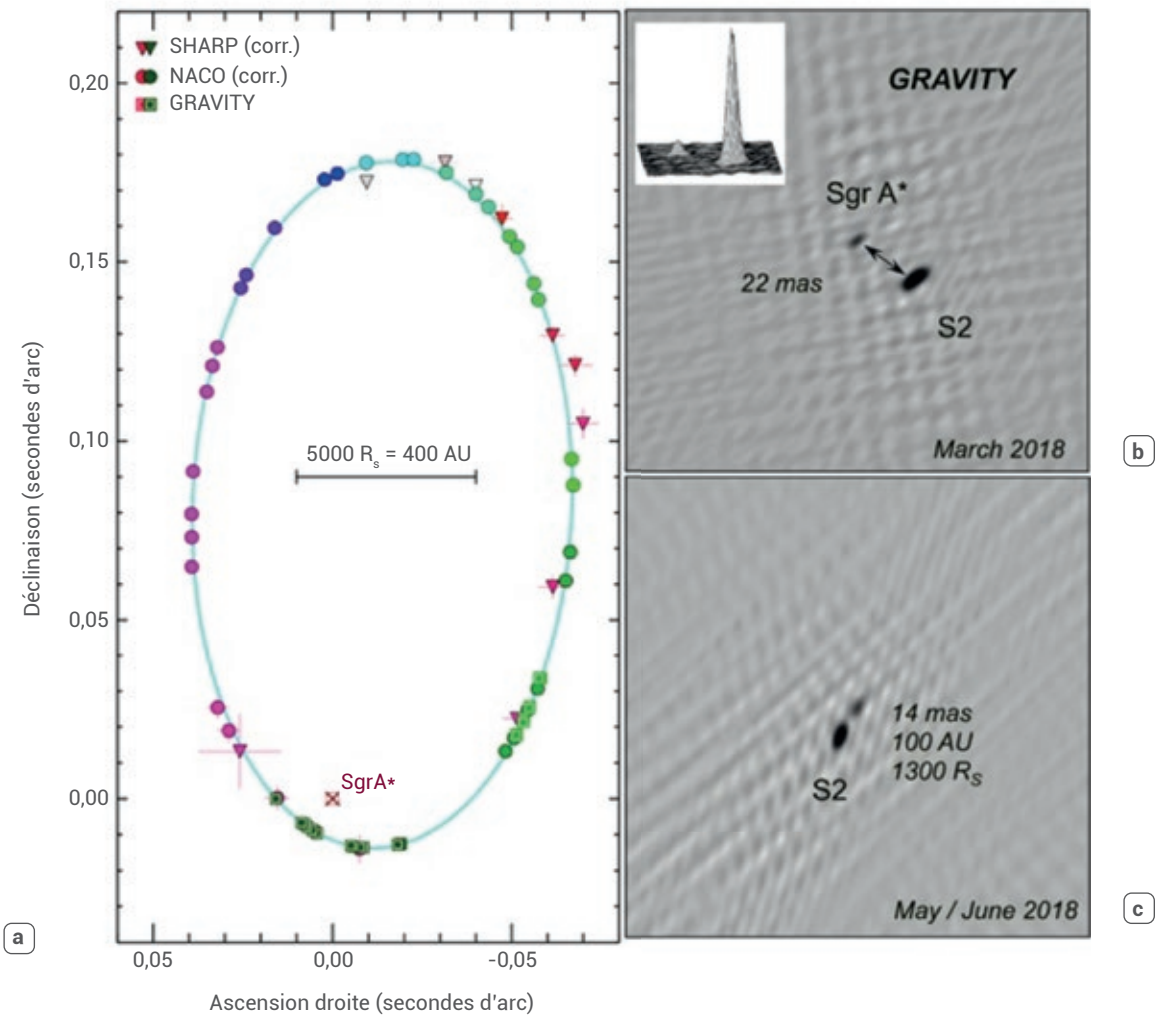


2. Images, dans le proche infrarouge, de la région centrale de la Voie lactée. Champ de 30" x 30" (secondes d'arc), avec insert de 1,4" x 1,4". L'étoile IRS7 est située à 6" de Sgr A* et sert de référence pour la correction adaptative. L'étoile IRS16C, située à 1" de Sgr A*, se trouve dans le champ de vue de l'interféromètre (2" x 2"), non reporté sur la figure. Dans ce petit champ, le calcul comme les mesures montrent que les écarts de phase aléatoires, produits par des parcours atmosphériques relatifs à des objets distincts, demeurent fortement corrélés : on peut alors utiliser les franges sur IRS16C pour compenser ces écarts par un asservissement et faire des intégrations longues de plusieurs minutes, « en aveugle » sur celles de Sgr A*. Les positions de Sgr A* et de l'étoile S2, alors non loin de son apocentre (point de l'orbite elliptique le plus éloigné du foyer), sont indiquées dans l'insert. Source : ESO.

Entre 2016 et 2020, Gravity a apporté des résultats majeurs. Le passage de l'étoile S2 au péricentre, en mai 2018, a été observé. Non seulement une meilleure détermination de la masse du trou noir a été obtenue par la caractérisation plus précise de l'ellipse parcourue, mais des effets relativistes en champ intense ont été mesurés : effet Doppler relativiste [7] et précession relativiste de la trajectoire elliptique [8]. Enfin, les brefs et intenses sursauts d'émission infrarouge ont été localisés avec précision dans le voisinage immédiat de Sgr A★. L'observation astrométrique différentielle de leur déplacement autour de Sgr A★, à la précision de 30 µas (microsecondes d'arc), permit de localiser leur orbite non loin de la dernière orbite circulaire stable (ISCO), à une distance de la singularité inférieure à quatre rayons de Schwarzschild (10 µas) [9]. Il en résulte que la masse de 4,26 (± 0,1) 10^6 M_{Soleil} est contenue dans un volume proche de celui de l'horizon des événements (fig. 4).

Ces résultats exceptionnels n'épuisent pas le potentiel de la configuration adaptative et interférométrique de Gravity. Une évolution de ce dernier (Gravity+) reçoit la priorité pour une installation au Cerro Paranal en 2024-2025, avec des performances considérablement accrues. L'un des objectifs est de trouver une ou plusieurs étoiles, moins brillantes que S2, qui s'approcheraient davantage encore de Sgr A★ et dont le mouvement permettrait un sondage de champs gravitationnels plus intenses encore. L'ambition est alors de mesurer la vitesse de rotation du trou noir, seul para-

>>>



3. Orbite et images de l'étoile S2 [7]. (a) Orbite de S2 mesurée durant deux décennies par interférométrie des tavelures (caméra SHARP sur le télescope NTT de l'ESO, de diamètre 3,6 m), optique adaptative (instrument NACO sur le VLT, de diamètre 8,2 m) et interférométrie longue base (Gravity).
(b, c) Images de S2 prises juste avant et au moment du passage au péricentre en mai 2018. Le gain en résolution angulaire permet de clairement séparer S2 du trou noir. L'allongement apparent des objets traduit la fonction d'appareil de l'interféromètre (réponse impulsionnelle).
Source : GRAVITY Collaboration, A&A 615 (2018) L15, reproduit avec la permission de l'ESO.

>>>

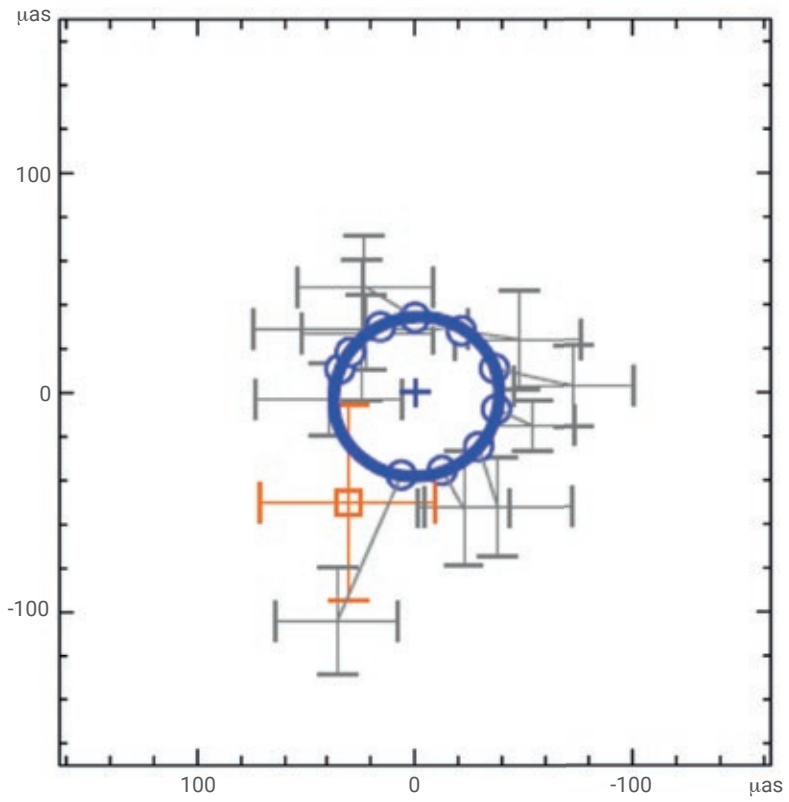
mètre manquant en pratique pour totalement caractériser Sgr A*, puisque sa charge électrique est très vraisemblablement nulle.

Il n'est pas indifférent de mentionner ici le Keck Telescope, situé à Hawaï. Ses deux télescopes de 10 m de diamètre, séparés de 100 m, avaient été également prévus pour fonctionner en mode interférométrique. Pour des motifs essentiellement financiers, cette configuration a été mise en sommeil par la NASA à partir de 2008, si bien que le VLTI est au monde le seul interféromètre optique, combinant la résolution et la sensibilité permettant l'étude de ce trou noir central.

L'interféromètre intercontinental (programme Event Horizon Telescope EHT), réalisé par un ensemble de radiotélescopes millimétriques répartis sur la surface de la Terre, pôle Sud compris, possède une capacité d'imagerie supérieure à celle du VLTI, soit une résolution de 20 μas à λ = 1,3 mm. L'observation par l'EHT du trou noir supermassif central dans la galaxie M87 a été publiée en 2019, mais celle de SgrA* ne l'est pas encore [10].

Conclusion

L'argumentaire [1] du prix Nobel de physique 2020 met en lumière les apports théoriques de Roger Penrose à la relativité générale, ainsi que les résultats observationnels de Reinhard Genzel en Europe et d'Andrea Ghez aux États-Unis, obtenus par l'exploitation tenace des techniques de haute résolution angulaire pendant plusieurs décennies. Comme brièvement montré dans le présent texte, ces travaux ont utilisé les étapes successives d'une « lutte contre le flou » pour vaincre les limites de la



4. Mesures dans le proche infrarouge (croix grises) et modèle (en bleu) de la position apparente de Sgr A* lors d'un sursaut lumineux d'une trentaine de minutes (évènement du 22 juillet 2018) [9]. La croix orange marque la position du centre de masse déduite des mesures orbitales de l'étoile S2. Les axes sont en microsecondes d'arc (µas). Les incertitudes de position sont d'environ 30 µas, soit un centième de la limite de diffraction interférométrique pour une base de 130 m entre les deux télescopes du VLT les plus éloignés. L'instrument Gravity obtient cette précision par astrométrie différentielle entre deux faisceaux : l'un positionné sur Sgr A*, l'autre sur l'étoile IRS16C, distante d'une seconde d'arc. L'orbite relativiste calculée (en bleu) possède 1,17 fois le rayon de la dernière orbite circulaire stable d'un trou noir de Schwarzschild de 4 millions de masses solaires. Elle est la trace du mouvement du plasma porté à très haute température, potentiellement par reconnexion magnétique, autour de Sgr A*. Il s'agit de la contrainte la plus forte sur la taille physique de Sgr A*. L'écart entre la croix rouge et le centre de l'orbite bleue est probablement dû à l'imprécision de mesure ou à un écart entre la position apparente de Sgr A* pendant un sursaut et sa position au repos, la base du jet dominant alors.

Source : GRAVITY Collaboration, A&A 618 (2018) L10, reproduit avec la permission de l'ESO.

résolution des images astronomiques aux longueurs d'onde optiques, tout d'abord imposées par la turbulence atmosphérique présente même dans les meilleurs sites terrestres d'observation, puis par la diffraction sur des télescopes utilisés individuellement, enfin par la combinaison interférométrique sur de longues bases de plusieurs télescopes géants. Entre la limite imposée par le *seeing*, soit environ une seconde d'arc, et la fonction d'appareil de l'interféromètre VLTI, un gain en résolution de près d'un facteur mille est obtenu. Avec l'astrométrie interférométrique différentielle, un nouveau gain d'un facteur de l'ordre de 100 permet d'atteindre des précisions relatives de positionnement de l'ordre de la trentaine de microsecondes d'arc. Nul doute que ces méthodes nouvelles ne bénéficient à une foule d'autres problèmes, telle l'étude d'exoplanètes situées dans l'environnement immédiat de leur étoile, comme montré tout récemment par le VLTI et l'instrument Gravity, qui se verra doté dès 2024 d'améliorations considérables dans le cadre du projet Gravity+. ■

Références

1• The Nobel Committee for Physics, "Theoretical foundation for black holes and the supermassive object at the Galactic centre" (2020). www.nobelprize.org/uploads/2020/10/advanced-physicsprize2020.pdf

2• A. Labeyrie, "Attainment of Diffraction Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier Analysing Speckle Patterns in Star Images", *A&A* **6** (1970) 85-87.

3• G. Rousset *et al.*, "First diffraction-limited astronomical images with adaptative optics", *A&A* **230** (1990) L29-L32.

4• A.M. Ghez *et al.*, "High proper-motion stars in the vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy", *Astrophys. J.* **509** (1998) 678-686.

5• R. Genzel *et al.*, "Near-infrared flares from accreting gas around the supermassive black hole at the Galactic Centre", *Nature* **425** (2003) 934-937.

6• F. Eisenhauer, G. Perrin *et al.*, "Gravity: Observing the Universe in Motion", *The Messenger*, **143** (2011) 16-24.

7• GRAVITY Collaboration, R. Abuter *et al.*, "Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole", *A&A* **615** (2018) L15.

8• GRAVITY Collaboration, R. Abuter *et al.*, "Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole", *A&A* **636** (2020) L5.

9• GRAVITY Collaboration, R. Abuter *et al.*, "Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole SgrA*", *A&A* **618** (2018) L10.

10• F. Combes, « Première image d'un trou noir », *Reflets de la physique* **64** (2020) 23-25.

11• D. Rouan, « L'E-ELT, un œil géant pour scruter l'univers », *Reflets de la physique* **47-48** (2016) 78-83.

Miroirs temporels instantanés : une nouvelle approche du retournement temporel

Antonin Eddi[1] (antonin.eddi@espci.fr) et **Emmanuel Fort**[2]

(1) Physique et mécanique des milieux hétérogènes
(CNRS, ESPCI Paris, Sorbonne Université, Université PSL, Université de Paris),
Sorbonne Université, 7 quai Saint-Bernard, 75005 Paris

(2) Institut Langevin (ESPCI Paris, CNRS, Université PSL),
1 rue Jussieu, 75238 Paris Cedex 05

Peut-on faire revivre à une onde sa vie passée ? Ce problème a été largement étudié, en particulier au moyen de miroirs à retournement temporel digitaux utilisant des ordinateurs pour effectuer l'opération.

Récemment, en nous appuyant sur les symétries entre temps et espace, nous avons introduit le concept de miroir temporel instantané basé sur une brusque modification des propriétés du milieu. Nous avons testé expérimentalement ce nouveau type de retournement temporel à l'aide d'ondes de surface dans des liquides et montré l'efficacité d'un tel procédé.

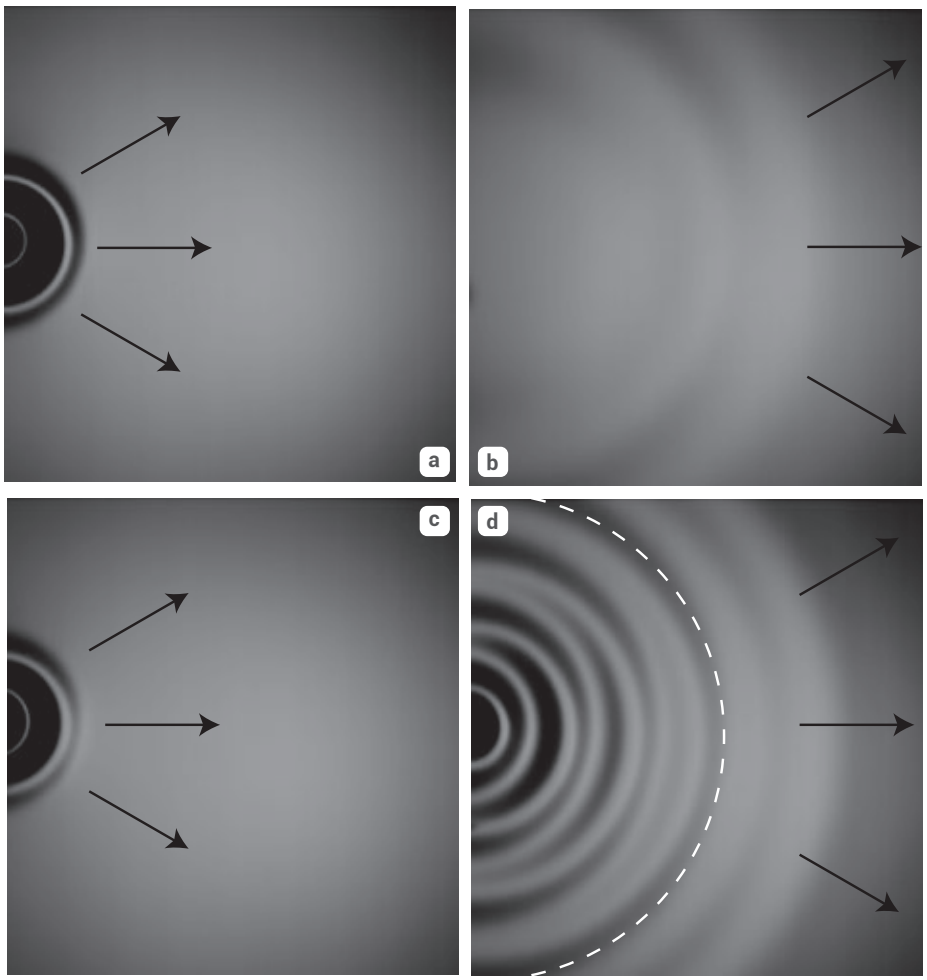
Cette approche nous a également permis de revisiter les miroirs à conjugaison de phase.

Le concept d'onde est omniprésent en physique et regroupe un ensemble de phénomènes allant de la physique microscopique – propagation des ondes électroniques dans des solides –, l'acoustique, l'optique ou les télécommunications jusqu'aux échelles astronomiques pour les ondes gravitationnelles. L'unité de ces phénomènes provient du fait qu'ils sont tous régis par des équations similaires, où une quantité (le « champ », noté ψ) varie conjointement dans le temps et l'espace. Cet aspect apparait clairement lorsque l'on considère la plus simple des équations d'ondes : l'équation de d'Alembert[a] pour laquelle temps et espace jouent des rôles symétriques conduisant à la propagation d'une onde de célérité c.

Si les ondes sont bien un concept universel, il est en revanche souvent difficile de les observer directement et d'accéder aux valeurs de ces champs à cause des échelles de temps et d'espace mises en jeu. De manière similaire, le contrôle précis des propriétés du milieu, à des échelles spatiales et temporelles petites devant celles des ondes, est souvent délicat à obtenir et nécessite des technologies complexes.

Il existe néanmoins un exemple qui vient naturellement à l'esprit lorsque l'on imagine des ondes : ce sont les vagues qui existent à la surface des liquides. En effet, elles sont macroscopiques et lentes (leur vitesse est de l'ordre de 20 cm/s), ce qui permet à tout un chacun de les observer au quotidien, en mer ou dans une tasse de thé. Leur physique est bien comprise : leur propagation, régie par les équations de la mécanique des fluides, est contrôlée aux grandes échelles spatiales par la gravité, tandis que la capillarité domine aux petites longueurs d'onde. Bien qu'elles présentent de nombreuses spécificités liées à leur nature (caractère dispersif, non-linéarités hydrodynamiques...), elles s'inscrivent parfaitement dans le cadre général décrit précédemment. De ce point de vue, les ondes gravito-capillaires sont un candidat idéal, injustement délaissé, pour l'étude de phénomènes fondamentaux liés à la propagation des ondes. Elles sont simples à mettre en œuvre et peuvent être observées et mesurées finement et en temps réel. Enfin, elles peuvent être contrôlées efficacement et dynamiquement à une échelle sub-longueur d'onde.

(a) Pour une corde inextensible, de masse linéique μ, tendue horizontalement avec une force constante F dans la direction x, l'équation d'onde de d'Alembert à une dimension s'écrit $\partial^2 y/\partial x^2 = (1/c^2)\, d^2y/dt^2$, où $c = (F/\mu)^{1/2}$ est la vitesse de propagation de l'onde, t le temps et y le déplacement transversal de la corde.



1. Ondes créées par une bille d'acier impactant sur un bain d'huile silicone.
(a)-(b) Dans le cas où le bain est au repos, on observe uniquement une onde capillaire qui se propage radialement (flèches noires). Le fluide étant visqueux, cette onde s'atténue fortement.
(c)-(d) Dans le cas où le bain est en vibration verticale sinusoïdale avec une accélération proche du seuil de l'instabilité de Faraday, une structure stationnaire avec la longueur d'onde de Faraday émerge après le passage de l'onde capillaire (intérieur du cercle en pointillés).
(Figure adaptée de A. Eddi *et al.* [3]).

Depuis quelques années, nous nous intéressons aux possibilités de contrôle de la propagation des ondes par des modifications temporelles du milieu. Les ondes gravito-capillaires offrent un terrain de jeu unique pour les implémentations expérimentales. Comme nous allons le voir, le temps et l'espace jouant des rôles symétriques dans l'équation de propagation, les modifications temporelles offrent de nombreuses possibilités.

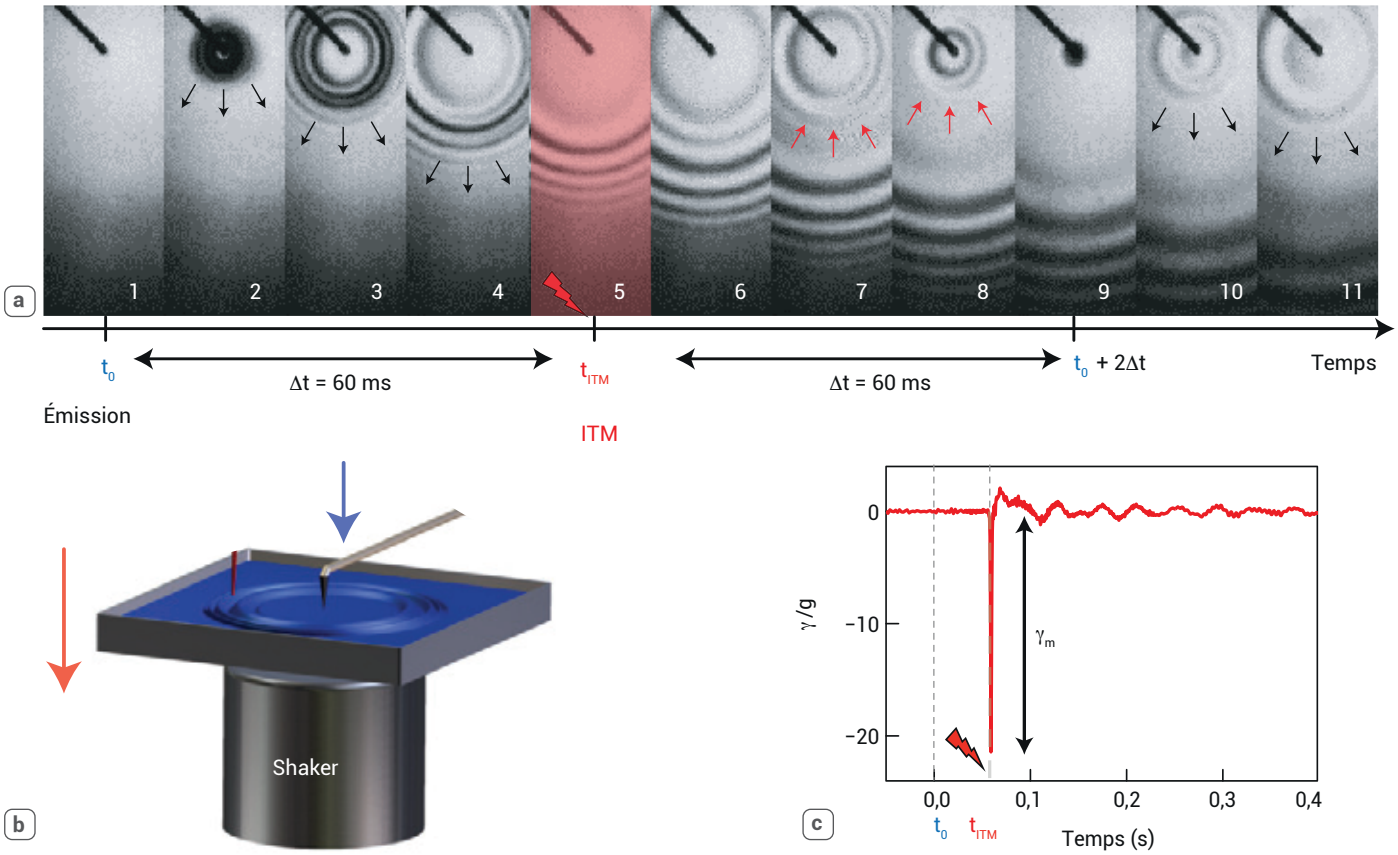
Ondes propagatives et ondes stationnaires

Cette thématique a débuté alors que nous étudiions avec Yves Couder la dynamique de « marcheurs » [1, 2]. Ces objets associent, à la surface d'un bain liquide en vibration verticale, une goutte rebondissante et le champ d'onde qu'elle génère à chacun de ses rebonds. Pour comprendre la nature exacte de ce champ d'ondes gravito-capillaires, nous avons entrepris une série d'expériences très simples, basées sur l'analyse de la perturbation générée par un choc unique à la surface d'un liquide soumis ou non à une vibration verticale [3]. Des billes d'acier millimétriques sont lâchées au-dessus d'un bain d'huile de silicone et produisent des ondes à la surface du bain avant de couler quasi immédiatement. Si le bain n'est soumis à aucune vibration, le paquet d'ondes généré est identique à celui créé par un caillou jeté dans l'eau (fig. 1a-b). Lors de l'impact, la bille excite des ondes capillaires qui se propagent radialement, tout en s'atténuant fortement à cause de la viscosité du liquide. Lorsque le bain est soumis à une vibration verticale sinusoïdale, on observe la même onde capillaire en train de se propager à la surface du bain (fig. 1c), mais le paquet d'ondes en se propageant laisse place derrière lui à une structure d'ondes stationnaires dont la fréquence et la longueur d'onde sont sélectionnées par la vibration (fig. 1d).

Cette structure est en fait liée à une instabilité dite « instabilité de Faraday », observée lorsque l'on excite verticalement un bain liquide au-dessus d'un certain seuil. Il s'agit d'une instabilité paramétrique qui est liée à la modulation de la gravité effective du bain (voir encadré, p. 31). Dans le cas des marcheurs, comme dans celui de la bille métallique, le bain est excité juste en dessous du seuil d'instabilité. Ainsi, ces ondes stationnaires s'amortissent lentement, avec un temps caractéristique d'autant plus long que l'on est proche du seuil de l'instabilité de Faraday.

L'apparition d'une structure stationnaire après le passage d'une onde propagative est extrêmement surprenante en soi. En effet, une onde stationnaire peut être vue comme la superposition de deux ondes *contra-propagatives*. Ceci signifie que la seule différence entre les deux expériences, à savoir la vibration du liquide, est susceptible de générer une onde additionnelle se propageant « à contre-sens », convergeant vers la source comme si elle remontait le temps. Par quel mécanisme la vibration du liquide réalise-t-elle cette opération ?

>>>



2. Expérience de miroir temporel instantané. (a) Série d'images en vue de dessus montrant la génération d'une onde capillaire qui se propage radialement (1-4, flèches noires), l'instant de l'ITM (*Instantaneous Time Mirror*) (5), puis l'émergence d'une onde retournée temporellement (6-9, flèches rouges), qui se refocalise sur la source (9) avant de diverger à nouveau (10-11, flèches noires). (b) Schéma de principe de l'expérience d'ITM. Un bain liquide est fixé sur un pot vibrant ("Shaker") pour appliquer un choc d'accélération verticale (flèche rouge). La pointe sert à exciter une onde circulaire (flèche bleue). (c) Accélération verticale γ_m imposée pendant l'ITM. (Figure adaptée de V. Bacot *et al.* [4].)

>>>

Miroirs temporels instantanés

Si les accélérations périodiques permettent de créer une onde retournée temporellement à une fréquence bien précise, il est peut-être possible de retourner l'ensemble d'un paquet d'onde par un choc quasi instantané [4]. Pour ce faire, nous avons d'abord généré à l'aide d'une aiguille une onde capillaire à la surface d'un bain liquide au repos (fig. 2a). Ce paquet d'ondes divergeant se propage tout en s'étalant à cause des propriétés dispersives des ondes capillaires (fig 2a, 1-4) : dans ce régime, les longueurs d'ondes les plus courtes sont les plus rapides. Après un certain temps, nous appliquons au bain un choc vertical à l'aide d'un pot vibrant (fig. 2b-c). Pendant quelques millisecondes, le bain liquide subit une accélération γ_m de plusieurs dizaines de fois la gravité g (fig 2a, 5). Juste après le choc, on constate que le paquet d'onde initial est amplifié. Son profil est très proche de celui du paquet d'onde initial au moment du choc mais, lorsqu'on observe son évolution, on s'aperçoit qu'il est en fait constitué de deux paquets d'ondes qui se propagent en sens opposé : l'un va diverger par rapport à la source et se confondre quasiment au paquet d'onde initial, l'autre va reconverger vers la source (fig 2a, 6-8). Ce dernier paquet est en fait le retourné temporel de l'onde initiale, il revit la vie passée de celle-ci et va se refocaliser sur la source (fig 2a, 9) avant de diverger à nouveau (fig 2a, 10-11). Nous avons appelé cette opération un « miroir temporel instantané » (*"Instantaneous Time Mirror"* – ITM – en anglais), puisqu'une onde retournée temporellement apparait à un instant donné en tout point de l'espace.

Nous avons également mesuré quantitativement les caractéristiques du champ d'onde tout au long de cette expérience (fig 3a, p. 32). Après le choc d'accélération, il est possible de séparer les ondes propagatives (ondes dites retardées) et contra-propagatives (ondes dites avancées) à l'aide d'une analyse de Fourier. On observe que la forme du paquet d'ondes retourné est très similaire à celle du paquet initial, au point que les profils coïncident presque exactement à des temps symétriques par rapport au moment de l'ITM. Contrairement à ce qui est observé habituellement avec un miroir spatial, le paquet d'ondes n'est pas retourné spatialement. Le retournement temporel permet au paquet de compenser sa dispersion. Les longueurs d'ondes courtes, qui sont plus rapides, ont voyagé plus loin de la source. Après l'ITM, elles vont rattraper les grandes longueurs d'ondes lors de la phase retour, et le paquet d'ondes va se refocaliser au niveau du point source.

Sources secondaires

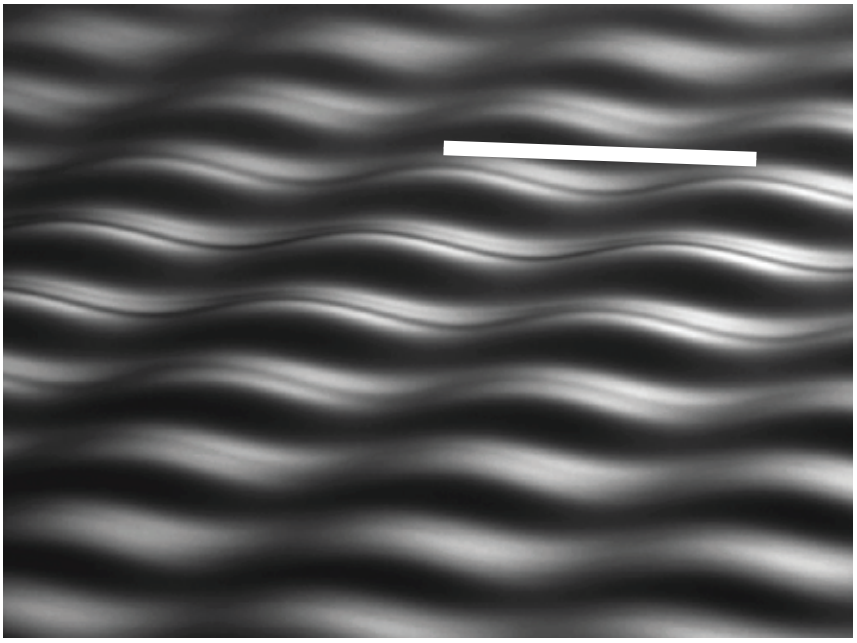
Il est intéressant de comprendre comment le changement soudain de la gravité effective est susceptible de produire ce phénomène spectaculaire. Comme la

vitesse de propagation des ondes dans le milieu dépend de la gravité, le choc induit en fait une variation brutale de cette vitesse. Si l'on considère l'équation de propagation générique avec un choc instantané, on s'aperçoit qu'une variation instantanée de la vitesse de propagation est équivalente à un terme source au moment du choc, proportionnel à la dérivée seconde du champ au moment du choc.

Ce sont ces sources qui sont à l'origine du champ additionnel créé. Puisque chaque source est isotrope (monopolaire), les fronts d'ondes qu'elles induisent se propagent non seulement dans la direction du champ initial mais également, de façon symétrique, dans le sens contra-propagatif. Les deux champs produits sont les retournés temporels l'un de l'autre. La répartition des sources secondaires étant fixée par le champ initial, les profils des champs produits sont très similaires au champ initial présent dans le bain (il s'agit en fait de sa dérivée, ce qui pour des paquets d'ondes relativement étroits spectralement est équivalent à ajouter un simple déphasage de $\pi/2$ par rapport au champ lui-même). Il est intéressant de noter que cette façon d'analyser le fonctionnement d'un ITM est lié à la théorie des sources secondaires de Huygens-Fresnel. Pour supprimer les fronts d'onde contra-propagatifs lors de la propagation des ondes, il a été nécessaire d'ajouter une composante dipolaire aux sources secondaires initialement conçues comme monopolaires par Huygens. Dans le cas de l'ITM, un ensemble de sources monopolaires lié au profil du champ présent à la surface du bain est créé lors du choc. Ces sources « à la Huygens » vont être à l'origine de fronts d'ondes contra-propagatifs associés à l'onde divergente et à l'onde retournée temporellement.

Ces résultats peuvent naturellement être étendus au cas de champs d'ondes plus complexes. La figure 3b-c présente des séries d'images des champs expérimentaux et numériques obtenus lorsque la source initiale possède une forme de tour Eiffel (1). On constate qu'à l'instant de l'ITM la forme initiale semble avoir complètement disparu, brouillée par la propagation combinée à la dispersion (2). Néanmoins, cette information reste contenue dans le champ d'onde et n'est pas perdue (3-4). L'ITM permet de faire réapparaitre la tour Eiffel sur la surface du liquide quelques instants plus tard, au moment de la refocalisation (5).

L'instabilité de Faraday



E1. Vue de côté du motif d'ondes stationnaires généré par l'instabilité de Faraday.
La barre blanche correspond à la longueur d'onde de Faraday, ici 5,1 mm.

Lorsque l'on applique une accélération verticale périodique à un récipient rempli de liquide et que cette accélération dépasse un certain seuil, une instabilité dite de Faraday apparait. En effet, Michael Faraday nota dès 1831 que dans ces conditions la surface du liquide se déstabilise et que des ondes stationnaires apparaissent spontanément à l'interface liquide-gaz [8, 9] (fig. E1).

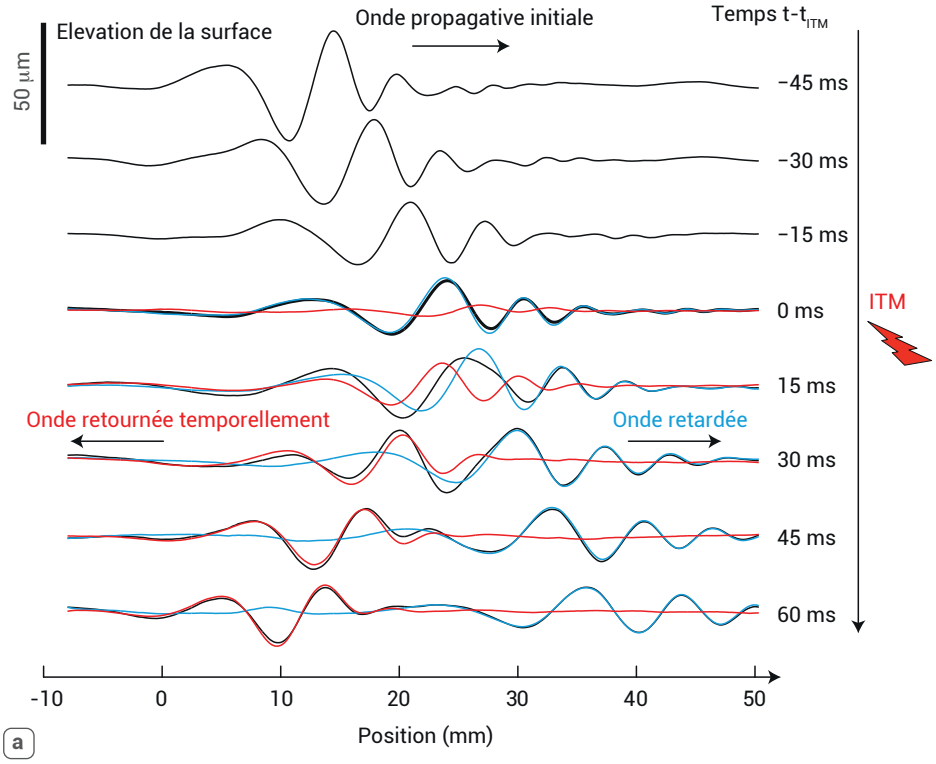
La modulation de la gravité effective ressentie par le liquide provoque le forçage paramétrique d'ondes de surface. Ces dernières possèdent une fréquence (dite de Faraday) moitié de la fréquence de forçage, et leur longueur d'onde est fixée par la relation de dispersion des ondes gravito-capillaires. Cette instabilité a été le support de nombreux travaux de physique non linéaire, en particulier pour l'étude de la formation de motifs étendus (avec différentes symétries) et leur sélection par des conditions aux limites spatiales imposées [10].

On peut également mentionner qu'elle se retrouve dans des milieux granulaires vibrés, avec notamment l'apparition d'états localisés, c'est-à-dire de zones instables confinées dans un environnement stable [11]. Plus récemment, elle a été au cœur des travaux de l'équipe d'Y. Couder et E. Fort, qui se sont intéressés à la dynamique des marcheurs qui présentent une forme de dualité onde-particule à l'échelle macroscopique [1, 2].

ITM *versus* retournement temporel standard

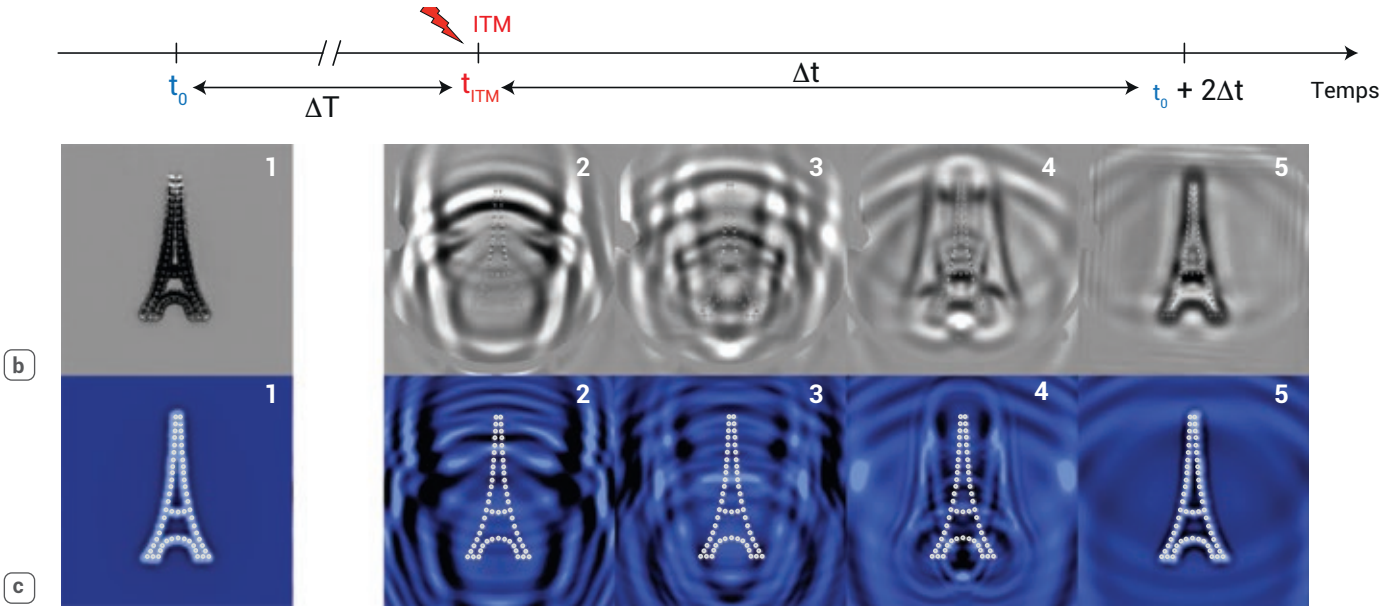
Il est intéressant de comparer les ITM aux miroirs à retournement temporels dits « digitaux », tels qu'ils sont réalisés en acoustique par exemple [5, 6]. Ces derniers utilisent des transducteurs et un traitement informatique pour réaliser l'inversion temporelle. Dans ce cas, le champ est enregistré dans la mémoire de l'ordinateur, contrairement à l'ITM pour lequel le milieu lui-même sert de support d'enregistrement du champ. La taille de la mémoire « externe » représente alors une limitation. Le traitement digital permet néanmoins d'effectuer des opérations plus complexes sur le signal réémis, ce qui se révèle particulièrement utile pour différentes applications. Il est ainsi par exemple possible d'amplifier le signal retourné temporellement de façon numérique, si les transducteurs ont une dynamique suffisante, alors que pour

>>>



3. Évolution d'un paquet d'ondes soumis à un miroir temporel instantané.
(a) Mesure de l'évolution d'un paquet d'ondes produit par une source ponctuelle et soumis à un ITM. Le paquet d'ondes initial (en noir) se propage d'abord de gauche à droite. Après l'ITM, une composante contra-propagative (en rouge) émerge sans que le profil spatial soit modifié. L'onde retardée est en bleu et l'onde totale après l'ITM est en noir. Les profils coïncident à des temps symétriques par rapport à l'ITM. (b) Expérience et (c) simulation numérique d'un ITM réalisé sur un champ d'onde en forme de tour Eiffel. La forme initiale (1) qui a disparu à l'instant de l'ITM (2) se reforme progressivement sur la surface (3-5).
(Figure adaptée de V. Bacot *et al.* [4]).

>>>
l'ITM, l'amplitude du signal retourné est directement liée à l'amplitude du changement de la vitesse de propagation des ondes qu'il est possible de réaliser dans le milieu. Les performances d'un miroir à retournement temporel standard sont fixées par la réponse spectrale des transducteurs, alors que la limite principale des ITMs provient du temps caractéristique sur lequel le changement de vitesse de propagation peut être effectué. Ceci implique également qu'un ITM peut être mis en œuvre à n'importe quel instant, tandis que le retournement temporel standard est forcément retardé. En effet, contrairement aux miroirs à retournement temporels digitaux qui nécessitent l'enregistrement préalable de l'ensemble des ondes à retourner avant d'effectuer le retournement temporel, l'ITM est instantané. Dans le cas de l'ITM, c'est le milieu lui-même qui joue le rôle de mémoire (spatiale) puisque l'onde retournée temporellement est liée au champ d'onde présent à la surface du bain lors du choc. Une forte variation de la vitesse des ondes dans l'ensemble du milieu peut être délicate à réaliser, en particulier pour la lumière. Néanmoins, pour des systèmes à une ou deux dimensions, l'optique non linéaire pourrait permettre des changements instantanés de l'indice de réfraction en utilisant les dimensions perpendiculaires à l'axe (ou au plan) de propagation.

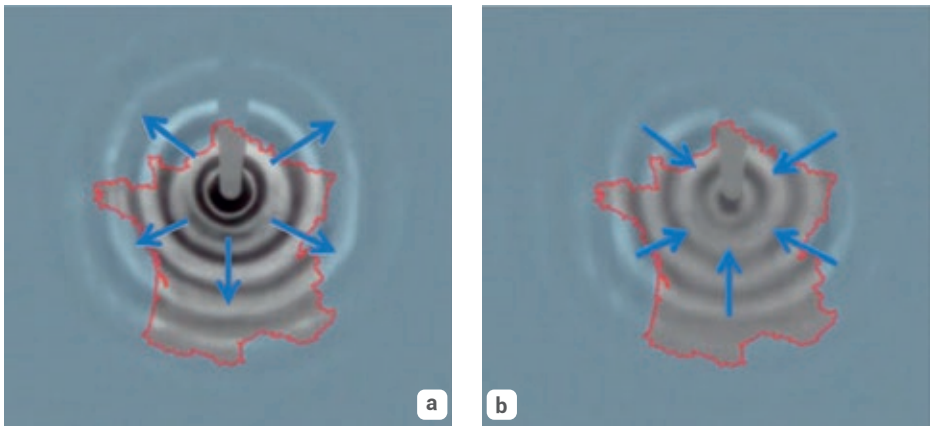


Et pour aller plus loin : des miroirs à conjugaison de phase

Si un choc d'accélération permet de réaliser un ITM, c'est-à-dire la génération d'ondes contra-propagatives dans une large bande spectrale, à quoi correspondent alors les ondes monochromatiques observées dans l'expérience initiale de la goutte rebondissante (fig. 1) ? La vibration périodique permet en fait de ne retourner qu'une fréquence unique qui correspond à la moitié de la fréquence d'excitation. Il s'agit d'un ITM monochromatique. En optique, ce type de miroir est communément appelé « miroir à conjugaison de phase » et il est réalisé à l'aide de cristaux non linéaires.

Ces miroirs à conjugaison de phase possèdent des propriétés étonnantes. Par exemple, l'image d'une source placée au voisinage d'un tel miroir vient se refocaliser sur la source, et ceci indépendamment de la géométrie du miroir. Cela est dû au fait que le miroir enregistre la phase spatiale de l'onde incidente et que cette information est retranscrite dans l'onde réfléchie (dite conjuguée de phase).

Pour des ondes de surface, il est possible d'obtenir un équivalent en confinant l'effet de la modulation dans une région particulière du bain [7]. La figure 4 montre la forme de la France entourée d'un tel miroir à conjugaison de phase : en pratique, on excite verticalement et sinusoïdalement un bain liquide dont la profondeur est variable – faible à l'endroit de la forme, profonde à l'extérieur. Les ondes sont peu affectées par la vibration dans la zone peu profonde, tandis que le seuil de l'instabilité de Faraday est plus faible hors des frontières. Lorsque la source émet quelques cycles monochromatiques à Paris, ces ondes sont « enregistrées » en dehors des frontières, générant des ondes contra-propagatives qui viennent se refocaliser au niveau du point source. Ces résultats montrent que l'instabilité de Faraday peut être revisitée comme un miroir à conjugaison de phase. L'oscillation verticale du bain induisant une modulation périodique de la vitesse des ondes, toute onde à la fréquence moitié de celle d'excitation génère une onde contra-propagative (retournée temporelle) ainsi qu'une onde co-propagative de même amplitude. Si cette amplification est suffisante pour compenser l'atténuation par la viscosité du bain, ce dernier se déstabilise (seuil de Faraday) et sa surface se couvre d'ondes stationnaires.



4. Expérience de miroir à conjugaison de phase en forme de carte de France.
Une zone peu profonde (en forme de France) dans laquelle les ondes sont peu affectées par la vibration est entourée par un bain profond plus susceptible de déclencher l'instabilité de Faraday. La frontière se comporte alors comme un miroir à conjugaison de phase. Un point source localisé à Paris (a) émet une onde circulaire. Grâce à la vibration verticale, cette dernière est une conjugaison de phase sur la frontière du miroir et se refocalise sur la source à Paris (b). Adapté de [7].

Les ondes qui entourent les gouttes rebondissantes peuvent ainsi être interprétées comme le résultat d'une source placée dans un miroir à conjugaison de phase, générant en permanence des ondes retournées temporellement qui viennent se refocaliser sur la source.

Conclusion et perspectives

L'utilisation de « frontières temporelles » basées sur des variations d'indices du milieu au cours du temps permettent d'introduire de nouvelles méthodes de contrôle et de manipulation de la propagation des ondes. Les chocs temporels créent des miroirs instantanés qui agissent simultanément en tout point de l'espace tout en s'affranchissant de l'utilisation d'émetteurs/récepteurs externes. Cette approche peut être généralisée afin de créer au sein du milieu des frontières spatio-temporelles, qui permettront d'obtenir un contrôle dynamique de la propagation des ondes. De ce point de vue, les ondes gravito-capillaires présentent des avantages uniques pour tester ces concepts fondamentaux. Elles permettent en effet une visualisation et une mesure quantitative en temps réel des ondes, mais aussi l'implémentation de contrôles efficaces. Nous avons ainsi récemment développé une excitation paramétrique des ondes à l'aide de champs électriques, qui apparait prometteuse pour réaliser des excitations complexes avec un contrôle spatio-temporel sub-longueur d'onde et une grande dynamique. ■

Références

1• Y. Couder *et al.*, "Walking and orbiting droplets", *Nature* **437** (2005) 208.

2• Y. Couder *et al.*, « Les gouttes marcheuses – Une forme de dualité onde-particule à échelle macroscopique ? », *Reflets de la physique*, **5** (2007) 20-24.

3• A. Eddi *et al.*, "Information stored in Faraday waves: the origin of a path-memory", *J. Fluid Mech.* **674** (2011) 433-463.

4• V. Bacot *et al.*, "Time reversal and holography with spacetime transformations", *Nature Physics* **12** (2016) 972.

5• M. Fink, "Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, **39** (5) (1992) 555-566.

6• M. Fink, "Time reversed acoustics", *Scientific American*, **281** (1999) 91-97.

7• V. Bacot *et al.*, *PNAS* **116** (18), (2019) 8809-8814.

8• M. Faraday, *Philos.Trans. Roy. Soc.* **121** (1831) 299-318.

9• M. Faraday, *Philos. Trans. Roy. Soc.* **121** (1831) 319–340.

10• S. Douady, *J. Fluid Mech.* **221** (1990) 383-409.

11• P.B. Umbanhovar *et al.*, *Nature*, **382** (1996) 793-796.

Remerciements
Ces travaux sont le fruit d'un travail collectif, et nous tenons en particulier à remercier nos collègues sans qui rien n'aurait été possible : Vincent Bacot, Guillaume Durey, Mathias Fink, Matthieu Labousse, et Yves Couder à qui nous voulons dédier cet article.

Comment des pédagogies alternatives peuvent aider à la réussite des étudiants de physique du 1er cycle universitaire

Raphaëlle Demeyer(1) **et Jérôme Margueron**(2) (j.margueron@ipnl.in2p3.fr)
(1) Chargée de mission « Évaluation innovation pédagogique » à l'Université de Lyon
(2) Institut de physique des 2 infinis de Lyon (UMR 5822), Université Claude Bernard Lyon 1, Bâtiment Paul Dirac, 4 rue Enrico Fermi, 69622 Villeurbanne Cedex

Paula Heron

Entretien avec Paula Heron, professeure de physique à l'Université de Washington, Seattle, USA. Elle nous présente les "Tutorials", méthodes pédagogiques novatrices développées au sein de l'équipe de recherche sur l'enseignement de la physique de l'Université de Washington, méthodes encore peu connues dans les universités françaises.

On discute ensuite une expérimentation de ces "Tutorials", effectuée dans le département de physique de l'Université Pierre et Marie Curie.

Biographie

Paula Heron a obtenu sa thèse en physique théorique à l'Université Western Ontario (Canada) avant de rejoindre l'équipe professorale de physique de l'Université de Washington à Seattle, où elle s'est passionnée pour les sciences de l'éducation.

Elle mène depuis plusieurs années un travail de recherche visant à trouver des solutions pour que les étudiants de licence *(undergraduate degree)* développent une connaissance plus fine et plus solide des concepts physiques fondamentaux.

Paula Heron est en particulier coauteure du rapport *Phys21: Preparing Physics Students for 21st Century Careers* [1], ainsi que de l'ouvrage *Tutorials in Introductory Physics* [2] (encadré 1, p. 35). Elle est coprésidente du cycle de conférences "Foundations and Frontiers in Physics Education Research", regroupant la communauté des chercheurs dans l'éducation à la physique en Amérique du Nord.

Jérôme Margueron (Q) : Bonjour, Paula. Pouvez-vous revenir sur ce qui motive, selon vous, l'intérêt de moderniser la pédagogie dans le domaine de l'enseignement supérieur en physique ?

Paula Heron (PH) : La physique est certes une science exacte, mais on s'aperçoit que les jeunes infèrent, à partir des phénomènes physiques qui les entourent, des connaissances intuitives qui peuvent ancrer des erreurs de compréhension plus tard dans leur cursus. Ainsi, les notions d'accélération et de vitesse sont quelquefois confuses, ce qui peut mener à des incompréhensions. Celles-ci peuvent se poursuivre lorsqu'on aborde les concepts de potentiel et d'énergie potentielle, par exemple.
Les cours magistraux classiques ne permettent que rarement de remettre en cause des préjugés bien ancrés, et ce malgré tous les efforts de clarification du message et d'apports de preuves expérimentales des enseignants.
Les professeurs de physique le savent bien, et ont depuis longtemps engagé d'autres façons d'enseigner, en particulier dans l'enseignement secondaire. Mais force est de constater que les difficultés persistent dans les premières années du supérieur. Le moindre point non traité – ou moins bien traité – dans les programmes du collège (*middle school*) et du lycée (*high school*) aboutit à de gros soucis d'apprentissage à l'université. Là, les cours s'accélèrent mais les incompréhensions s'enracinent et mènent, hélas, certains étudiants à l'échec. C'est un problème pour tous les étudiants, mais en particulier pour ceux qui sortent de milieux moins favorisés, de zones scolaires en difficulté. La réduction du "*gap*" social et culturel est un enjeu sur lequel nous travaillons beaucoup.

Q : Quels sont les concepts sur lesquels s'appuie votre méthode des "Tutorials" ?

PH : La recherche dans les sciences de l'éducation apporte de multiples éclairages sur la façon dont les étudiants apprennent, autant en matière de mémorisation à long terme qu'en ce qui concerne la capacité à appliquer leurs savoirs.
Ainsi, il a été prouvé par de nombreux travaux de recherche qu'amener l'étudiant à « reconstruire » le concept lui-même, pas-à-pas, est une méthode extrêmement efficace, très complémentaire des cours

1. Séance de "Tutorial". Petits groupes d'étudiants échangeant leurs idées autour d'une table.

magistraux et des travaux pratiques. Bien entendu, il faut que le chemin pour y arriver soit bien balisé, car l'étudiant doit réussir à raisonner de lui-même avec un niveau de difficulté « normal ». Les résultats de ces méthodes basées sur l'apprentissage actif (ILS, "*Interactive Learning Strategies*"), et plus spécifiquement sur les techniques de questionnement, d'investigation et d'auto-résolution ("*inquiry-based learning*"[(a)]), sont significatifs en termes de consolidation et de structuration des connaissances.

D'autre part, le travail collaboratif en petits groupes, basé sur des échanges et des confrontations d'idées, permet à l'étudiant de découvrir que ce qu'il pense avoir compris ne l'a pas été de la même façon par ses camarades. Ceci génère questionnement et remise en cause.

Plus globalement, l'enseignement de la physique s'est enrichi ces dernières décennies de méthodes pédagogiques complémentaires. À côté des travaux en laboratoire, on peut citer le système des "*clickers*" (petits terminaux permettant de répondre à chaud à des questions du professeur et d'en tirer des statistiques, puis, par exemple, de former des sous-groupes d'étudiants pour résoudre

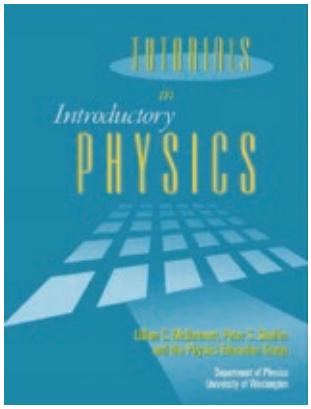
>>>

Encadré 1

Tutorials in Introductory Physics and Homework Package

Lilian C. McDermott, Peter S. Schaffer and the Physics Education Group

Pearson, 2 volumes (256 et 192 pages), 2002, 71,99 $.



Éditée en 1998, la première version avait été traduite en allemand et en espagnol.

Son principal auteur, Lilian McDermott, a été récompensée en 2001 par la médaille Oersted[(*)].

Cet ouvrage rassemble un ensemble de concepts et de ressources pédagogiques utilisés dans de nombreuses universités aux États-Unis.

Les domaines abordés sont la mécanique, l'électricité et le magnétisme, les ondes, l'optique, et quelques sujets sélectionnés de physique moderne.

La deuxième édition de l'ouvrage, qui sortira prochainement, est enrichie de douze années supplémentaires de résultats expérimentaux et d'avancées conceptuelles, de nouveaux tutoriels et d'anciens tutoriels modernisés.

(*) Prix de l'Association américaine des professeurs de physique, créé en 1936, qui récompense des contributions notables dans le domaine de l'enseignement de la physique. Son nom vient du physicien danois Hans Christian Œrsted. Lilian McDermott a été la deuxième femme à recevoir ce prix depuis sa création.

>>>
ensemble la question), les exercices en ligne avec retour immédiat, les vidéos préalables de découverte du cours, les techniques de résolution de problèmes coopératifs comme celles de l'Université du Minnesota [3]...

Q : Passons maintenant à la méthode elle-même, les "Tutorials". En quoi consistent-ils ?

PH : Nous nous focalisons sur la physique générale[b], car ce sont ces quelques concepts, relations et principes fondamentaux qui ne sont pas toujours bien compris par les étudiants entrant à l'université. Souvent, les étudiants n'ont pas conscience qu'ils ne maitrisent pas pleinement ces concepts, ce qui est un véritable risque pour leur apprentissage futur.
Les "Tutorials" viennent compléter les cours et les exercices donnés aux étudiants. Il s'agit d'un ensemble de modules aidant ces derniers à développer de façon méthodique une compréhension complète, approfondie et structurée des fondamentaux de physique.
Pour les étudiants, chaque module consiste en un atelier en groupe. Ils reçoivent un guide écrit précis, très structuré, qui repose sur le modèle « déclencher-confronter-résoudre ». Les étudiants doivent donc répondre en groupe à une suite de questions et de petits exercices qui peuvent être « piégeants » et qui se recoupent, mais avec de légères différences, ce qui oblige à revoir de façon détaillée chaque étape du raisonnement, réviser chaque relation, et finalement à « reconstruire » les concepts par eux-mêmes. Des devoirs individuels à la maison viennent compléter le dispositif.

Q : À part le cours et les "Tutorials", avez-vous d'autres rendez-vous avec les étudiants, comme des travaux dirigés ou bien des travaux pratiques ?

PH : Nous n'avons pas de travaux dirigés systématiques avec chaque cours comme vous les avez en Europe, mais nous avons bien sûr des séances d'expérimentation en laboratoire où les étudiants se familiarisent avec la mise en évidence expérimentale des phénomènes physiques et la confirmation des théories, ce qui est à la base de la physique.

Q : Comment s'intègrent les "Tutorials" dans le programme de l'université ?

PH : Nous fonctionnons comme les cours, à raison d'une séance réservée aux "Tutorials" chaque semaine. Les classes d'environ 200 étudiants sont fragmentées en groupes de 25. Les groupes forment des sous-groupes de trois ou quatre personnes (fig. 1), dont le mode de constitution est libre. Nous avons exploré divers formats, par niveaux homogènes, ou au contraire très hétérogènes, ou bien imposé certains critères, sans que cela s'avère plus efficace. Nous avons donc décidé de ne pas interférer dans la constitution de ces groupes, sauf quand nos encadrants détectent des dysfonctionnements. Les quelques étudiants exceptionnels se voient proposés un parcours "*honor*" un peu différent.

Q : Comment déterminez-vous les sujets qui posent difficulté aux étudiants et donc les "Tutorials" à créer et à mettre en place ?

PH : Bien entendu, nous travaillons beaucoup avec les enseignants. Ils connaissent bien les difficultés que rencontrent leurs étudiants. Mais cela peut être une connaissance transversale qui est trop faible, ou un acquis traité en cours plusieurs semaines ou années en arrière qui manque.
Il n'est pas toujours facile de détecter les idées préconçues derrière les erreurs des étudiants aux examens classiques, même si, comme aux États-Unis, ils ont lieu très régulièrement toutes les trois ou quatre semaines.
Aussi avons-nous systématisé une démarche d'analyse scientifique de pré et post-tests (avant et après les "Tutorials") qui balaient de nombreux sujets, abordés les années précédentes ou enseignés lors d'un cours récent. Les pré-tests sont réalisés en ligne le week-end, les post-tests sont intégrés dans les évaluations du cours co-écrits avec le professeur.
Nous élaborons soigneusement des batteries de questions, avec de nombreuses déclinaisons et formulations différentes pour un même sujet. Vous seriez étonné de voir ce qu'on peut détecter en posant une question *a priori* simple comme : « Deux ampoules sont raccordées à une même source d'énergie, l'une est plus éloignée que l'autre de la source ; l'une d'entre elles est-elle moins brillante ? ». Hélas, l'erreur est fréquente et assez prévisible. Et quand une erreur est systématique, elle recoupe parfois une autre incompréhension.

Q : À quels types d'étudiants vous adressez-vous ?

PH : Tous ! En pratique, nous nous adressons prioritairement aux étudiants de niveau « moyen », autant dire une grande majorité, pour leur permettre de renforcer leur socle de connaissances. Cependant, nous remarquons que les bons étudiants, les plus motivés, apprécient beaucoup les "Tutorials", car c'est une façon pour eux de se tester et de discuter physique avec les copains !
Au début, certains professeurs avaient l'intuition que les "Tutorials" allaient surtout aider les élèves en grande difficulté ; mais avec le temps, ils découvrent que ce n'est pas le cas, que les "Tutorials" sont rarement trop faciles, loin de là, et qu'ils aident vraiment tout type d'étudiant.
Cependant, les étudiants qui n'ont pas su ou pu acquérir un niveau minimum de connaissances (étudiants ayant maitrisé tard la langue anglaise, provenant de secteurs défavorisés...) ne peuvent pas juste être aidés avec cette méthode. La remise à niveau doit être plus ciblée.

Q : Une fois les groupes constitués, que se passe-t-il durant une séance de "Tutorials" ?

PH : C'est là que se situe la nouveauté. Les étudiants réfléchissent en groupe et peuvent demander l'aide des encadrants présents, mais nous ne donnons pas de réponse toute faite pendant la séance, ni de corrigé à la fin. Nous pensons que le plus important, c'est le processus de réflexion autour des exercices, l'échange entre les étudiants et leur argumentation, voire leur autocritique, qui leur permet de savoir s'ils sont sur la bonne voie ou bien s'ils se trompent.

Q : Qui sont les encadrants et que font-ils concrètement pendant ces séances ?

PH : Les encadrants sont pour la plupart des étudiants "*post-graduate*" (niveau master) ou en thèse dans un domaine de la physique. Certains d'entre eux sont déjà passés par notre système, mais d'autres le découvrent. Nous avons donc chaque semaine une formation préparatoire avec tous les encadrants pour les confronter au "Tutorial" qu'ils devront encadrer. Ils jouent donc le jeu d'être étudiant, car ils ne peuvent pas se contenter de lire le "Tutorial". Ils apprennent à guider, reformuler, sans donner d'indices trop évidents ou de réponses toutes faites, même si les étudiants les réclament parfois à corps et à

cri ! Ils vont s'aider de phrases types comme « pouvez-vous m'expliquer votre raisonnement ? » ou « comment en êtes-vous arrivé à cette conclusion ? ».

Q : Les "Tutorials" se concentrent-ils sur le cours qui a eu lieu juste avant ?

PH : Non, pas forcément. Les "Tutorials" abordent l'ensemble des notions qui doivent être comprises par l'étudiant à l'issue du cours, mais il peut s'agir de connaissances vues des mois auparavant. Nous cherchons la mémorisation et la compréhension sur des temps longs, pour consolider l'apprentissage.

Q : Réalisez-vous une évaluation à la fin de ces séances ?

PH : Non, car d'abord les "Tutorials" ne sont pas obligatoires. Ils sont proposés aux étudiants, qui ont le choix de les suivre ou non. Dans les faits, la plupart, sinon tous, viennent aux ateliers. Ensuite, l'important n'est pas que les étudiants sachent répondre aux mêmes questions que celles de l'atelier quelques minutes ou heures après qu'il soit terminé, mais bien l'ancrage et la mémorisation à long terme des concepts, ce que nous vérifions grâce aux post-tests. Nous obtenons des améliorations de performances, qui sont de l'ordre de 15% de réponses justes lors du pré-test à 70-75% pour le post-test.

Q : Les "Tutorials" amènent-ils d'autres améliorations de l'apprentissage que la solidité des connaissances en physique ?

PH : Bien entendu, nous espérons contribuer à améliorer la capacité à apprendre par soi-même et le potentiel de raisonnement autonome des étudiants, mais nous n'avons pas encore trouvé les mesures fiables pour les évaluer. Nous savons que les étudiants exposés aux "Tutorials" réclament leur mise en place pour des cours plus avancés, d'une part parce qu'ils en reconnaissent l'efficacité, mais aussi parce qu'ils ont appris à apprécier le travail en groupe. Par exemple, ils nous en ont réclamé pour accompagner leur apprentissage de la mécanique quantique, ce sur quoi nous travaillons actuellement. Nous avons aussi noté que la plupart des étudiants sont plus autonomes après plusieurs "Tutorials", et que la dépendance au professeur diminue. En tout cas, ils ont compris l'utilité du travail collaboratif, ce qui peut leur être utile dans leur future activité professionnelle.

>>>

Encadré 2

Expérimentation de "Tutorials" à l'Université Pierre et Marie Curie

Sous l'impulsion d'un groupe d'enseignants motivés, et avec le soutien du directeur de la faculté de l'époque, Patrick Boissé, un projet de test et d'implémentation d'innovations pédagogiques fondées sur l'apprentissage interactif (méthodes ILS, *"Interactive Learning Strategies"*) a démarré à l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) au printemps 2012 dans le département de physique. Les motivations pour innover provenaient avant tout du constat fait, en particulier lors des travaux dirigés, d'une relative passivité des étudiants.

Qu'est-ce qui a été expérimenté ?

- La méthode *"think-pair-share"* (réfléchir-discuter-restituer) utilisant un *"clicker"* (voir p. 35) pendant les cours. Avant le cours, les étudiants doivent le lire et réaliser des recherches personnelles. Le temps du cours est animé avec des questions pour tester leur apprentissage. Le *"clicker"* permet d'évaluer les réponses avant et après les discussions en sous-groupes. À l'issue de la question, l'enseignant ne détaille que les points incompris, s'ils subsistent.
- La méthode *"peer-to-peer"* (pair à pair) *via* les "Tutorials" à la place de certains travaux dirigés, en particulier en première année de licence (L1).

La venue à l'UPMC en 2012 d'un professeur américain, Alexander Rudolph, a permis à cette équipe de se former aux méthodes développées par l'Université de Washington, dont les "Tutorials" en mécanique ont été traduits.

Le premier semestre de cette expérimentation a été résumé dans un article de recherche [6]. Les cours de L1 de mécanique et de L2 d'électromagnétisme sont ceux qui ont été concernés par cette expérimentation.

Témoignages sur l'expérimentation

Les résultats indiquent que les méthodes ILS conduisent à une amélioration significative d'un facteur 2 ou plus de la compréhension des concepts de base par les étudiants. Avec ces méthodes, les étudiants deviennent plus actifs, renforcent le travail collaboratif, et prennent un meilleur contrôle de leur propre apprentissage.

En conséquence, une nouvelle maquette de l'unité d'enseignement (UE) mécanique, intégrant les principes de l'enseignement interactif, a été réalisée en 2013/2014. D'autres UE ont rejoint le mouvement, comme la thermodynamique.

Michael Joyce, responsable de l'UE de mécanique en 2012, intimement convaincu par l'efficacité de ces méthodes, nous donne son avis sur les trois clefs du succès de l'implémentation des techniques ILS comme celles mises en place à l'UPMC [6] :

- un usage régulier de la méthode du *"clicker"*, car le « retour sur investissement » (motivation et apprentissage des étudiants) est rapide et excellent ;
- un bon équilibre entre les cours, les "Tutorials" et les travaux dirigés classiques, à penser en fonction du niveau des étudiants et de la motivation des professeurs.

Il est indispensable que les formateurs aux "Tutorials" soient motivés et surtout formés, car cette méthode est éloignée des fonctionnements habituels. La formation doit en particulier porter sur deux points : expliquer la méthode aux étudiants, assez déroutante pour certains, et maintenir leur curiosité tout au long du "Tutorial".

Yannis Zouganelis, qui a testé à la fois les "Tutorials" et la méthode *"think-pair-share"*, en a apprécié les bénéfices, « en particulier lors des cours magistraux où la méthode des *clickers* permet d'aller assez loin sur les concepts ». Il regrette cependant que « les Tutorials laissent peu de place à l'apprentissage des techniques de calcul ».

Les résultats de l'expérimentation

L'étude publiée [7] montre des résultats très positifs des méthodes ILS sur l'apprentissage des concepts, les résultats aux examens finaux, et les relations entre enseignants et étudiants, grâce à une amélioration de la motivation et de l'assiduité de ces derniers.

Cette étude a été cependant limitée à une seule année d'expérimentation.

Brahim Lamine a participé à l'expérimentation de 2012 et poursuit l'utilisation des méthodes "*think-pair-share*" en amphi à l'université Paul Sabatier de Toulouse, dans un contexte de massification des effectifs. L'analyse complète d'une expérimentation menée en 2014-2015 a été effectuée [8].

>>>

Q : Avez-vous rencontré des résistances au début de la mise en place de votre méthodologie ?

PH : Je suis arrivée dans l'équipe quelques années après le démarrage des "Tutorials". Ce que j'ai constaté à l'époque, et que je constate encore parmi les étudiants des premières années, c'est que ceux-ci sont habitués à recevoir la réponse toute faite par le professeur, et n'entrevoient pas l'intérêt d'y réfléchir par eux-mêmes.
Certains étudiants n'aiment pas travailler en groupe, d'autres pensent que travailler avec des étudiants qui sont plus lents dans leur travail va les ralentir, et enfin quelques-uns restent persuadés qu'ils ont tout compris. Mais ils déchantent après plusieurs "Tutorials" ! Globalement, les résistances disparaissent après quelques séances.

Q : Depuis combien de temps avez-vous mis en place ces nouvelles méthodes d'enseignement ?

PH : Lilian McDermott en est à l'origine, il y a plus de trente ans [4]. Elle a été pionnière dans ce domaine qui a progressivement essaimé dans de nombreuses autres universités américaines. Elle a créé le groupe de recherche sur l'enseignement de la physique à l'Université de Washington dans les années 1980. Elle a lancé l'ouvrage *Tutorials in Introductory Physics* (encadré 1, p. 35), ainsi que les *Physics by Inquiry*[c].

Q : Comment votre groupe s'intègre-t-il dans le paysage universitaire américain ?

PH : Nous avons une longue tradition de formation des jeunes, et encadrons actuellement sept étudiants en thèse. Nous avons conduit plus de 25 thèses depuis les années 1980, et nos étudiants ont par la suite formé d'autres groupes dans d'autres universités avec lesquelles nous sommes en contact. Ces dernières années ont donc vu naitre une dizaine de groupes de recherche sur l'enseignement de la physique, en particulier dans les universités du Maryland, de l'Illinois, du Michigan, de l'Ohio, l'Université Colorado Boulder ou encore Cornell. Ce sont de grands pôles, où vous pouvez passer une thèse en physique avec une spécialisation « recherche en éducation de la physique ». Nous sommes maintenant en concurrence avec eux pour les meilleurs étudiants !
Plus largement, il y a maintenant un réseau américain constitué autour de la méthode des "Tutorials", appliquée dans de très nombreuses universités, dont la plupart n'ont d'ailleurs pas de groupe de recherche sur l'enseignement. Plus globalement, nous espérons contribuer à ce que plus d'étudiants en physique aient la fibre de l'enseignement, ce qui n'est pas une tâche facile.

Q : Comment font ces universités pour se former à vos méthodes ?

PH : Nous accueillons les enseignants et chercheurs à l'université de Washington pendant plusieurs semaines. Ils participent aux réunions avec les encadrants et aux séances de "Tutorials". Une fois qu'ils comprennent comment cela fonctionne, ils peuvent retourner dans leurs universités respectives et nous continuons à interagir avec eux régulièrement.

Q : Votre méthode commence-t-elle à se diffuser en Europe ?

PH : Je vais tous les ans à la conférence du GIREP (Groupe international de recherche sur l'enseignement de la physique). Nous avons des relations avec des groupes de recherche dans diverses universités en Irlande, Écosse, Finlande, Espagne, Italie et Allemagne, qui traitent de l'enseignement de la physique dans le supérieur. L'Université de Hambourg utilise beaucoup les "Tutorials" pour former les futurs ingénieurs ; elle a assuré la traduction et la parution de notre ouvrage.
En France, la recherche en éducation à la physique est bien développée, mais plutôt orientée sur le secondaire [5]. Cependant, une expérimentation des plus intéressantes a été initiée en 2012 à l'Université Pierre et Marie Curie avec la méthode des "Tutorials" (voir l'encadré 2, p. 37). ■

Les cours magistraux classiques ne permettent que rarement de remettre en cause des préjugés bien ancrés...

Le travail collaboratif en petits groupes, basé sur des échanges et des confrontations d'idées, permet à l'étudiant de découvrir que ce qu'il pense avoir compris ne l'a pas été de la même façon par ses camarades.
Ceci génère questionnement et remise en cause.

(a) L'"inquiry-based learning", souvent traduit en français par « enseignement par investigation », suppose que l'étudiant devienne actif dans son apprentissage. Ce type d'enseignement est particulièrement mis en avant dans l'éducation des sciences, car il s'apparente à la démarche suivie par les scientifiques. Il implique un changement profond du rôle du professeur, qui passe de l'enseignant partageant son savoir à l'accompagnateur de la démarche et de la réflexion de l'étudiant. En France, la « démarche d'investigation », généralisée dans l'enseignement des sciences au lycée, est une illustration de l'intégration de ces nouvelles pédagogies dans l'enseignement secondaire [5].

(b) Pour découvrir les "Tutorials" sur les 2e et 3e lois de Newton au niveau équivalent L1, et des conseils d'utilisation de l'Université de Colorado Boulder : https://cutt.ly/physport-methods

(c) "Physics by inquiry" est un ensemble de modules basés sur des montages de laboratoires, pour préparer les enseignants du primaire et du secondaire à enseigner les sciences de façon pratique et à en dégager les concepts utiles pour leur enseignement.

Références

1• www.aps.org/programs/education/undergrad/jtupp.cfm

2• https://phys.washington.edu/tutorials-introductory-physics

3• http://groups.physics.umn.edu/physed/Research/CGPS/CGPSintro.htm

4• L.C. McDermott, Oersted Medal Lecture 2001, "Physics Education Research – The Key to Student Learning", *Am. J. Phys.* **69** (2001) 1127-1137.

5• www.education.gouv.fr/cid54197/l-enseignement-des-sciences.html

6• A.L. Rudolph *et al.*, "Introduction of interactive learning into French university physics classrooms", *Phys. Rev. Spec. Top.* 10.010103 (2014).

7• http://video.upmc.fr/differe.php?collec=E_rencontres_pedagogiques_2017&video=7

8• www.fsi.univ-tlse3.fr/enseignements-interactifs-bilan-de-l-experience-de-la-fsi-633019.kjsp

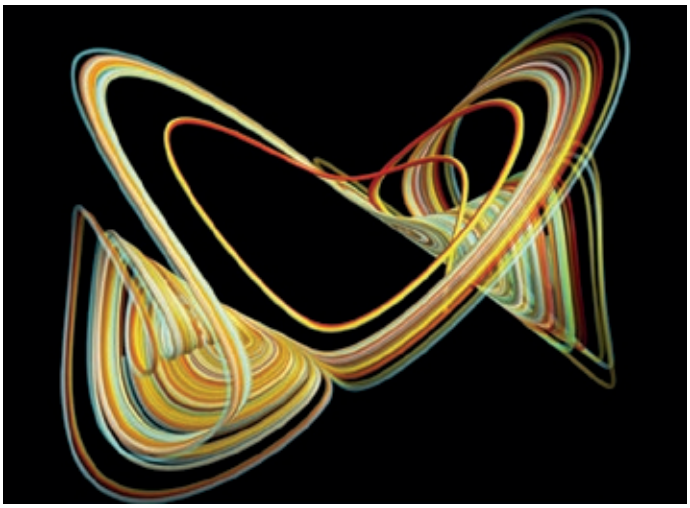
Création de la division Physique Non Linéaire de la SFP

La division Physique Non Linéaire de la Société Française de Physique vient de voir le jour au début de l'année 2021. Cette division a pour vocation de regrouper des communautés qui travaillent dans des domaines scientifiques différents, mais qui utilisent des outils et des concepts communs pour mettre en évidence des phénomènes et des mécanismes universels, indépendants du système particulier étudié.

Parmi les phénomènes étudiés, on peut citer les comportements au voisinage d'instabilités, les processus de transferts et cascades d'énergie dans des systèmes hors de l'équilibre, les scénarios de transition vers le chaos…

Sans être exhaustifs, les domaines abordés au sein de la division sont aussi divers que la dynamique des fluides, l'optique, la physique des plasmas, la mécanique, la matière molle, la physico-chimie, la biophysique… Outre la physique, le non linéaire s'étend à de nombreuses autres disciplines : les mathématiques, l'informatique, les sciences de l'ingénieur, les sciences de l'univers, la chimie et la biologie.

La division mènera différentes actions. Elle prendra part à l'organisation des Rencontres du Non Linéaire (RNL), qui rassemblent chaque année, mi-mars, à Paris, depuis 1998, près de 200 chercheurs et étudiants. Les RNL sont un lieu d'échange et le moteur d'une synergie transversale et interdisciplinaire propre au non linéaire, comme le reflète la répartition thématique de la centaine de communications qui y sont présentées chaque année. La 24e édition des RNL a eu lieu du 24 au 26 mars 2021. Son programme et les comptes rendus des contributions peuvent être trouvés sur le site des RNL (http://nonlineaire.univ-lille1.fr/).



Simulation des renversements chaotiques des pôles nord et sud du champ magnétique terrestre au cours du temps.

La division prévoit de contribuer à des minicolloques ciblés lors du Congrès général de la SFP, et d'animer des conférences nationales et internationales *via* des actions communes à différents groupements de recherche (GDR) du CNRS. D'autres actions seront annoncées prochainement, telles que la création d'une médaille du non linéaire ou des actions spécifiques destinées aux jeunes.

Les contours de ces actions seront définis par les membres du premier bureau de la division : *Axelle Amon (Université de Rennes), Médéric Argentina (Université Côte d'Azur), Mickaël Bourgoin (ENS Lyon / CNRS), Bérengère Dubrulle (CEA Saclay / CNRS), Éric Falcon (Université de Paris / CNRS), Stéphan Fauve (ENS), Marie-Christine Firpo (École Polytechnique), Marc Lefranc (Université de Lille), Chi-Tuong Pham (Université Paris-Saclay), Stéphane Randoux (Université de Lille) et Benoît Roman (ESPCI / CNRS).*

Actuellement, les membres d'une division de spécialité de la SFP travaillent tous dans un même domaine de recherche : matière condensée, champs et particules, physique atomique, optique, etc. La division Physique Non Linéaire est une division transversale qui regroupe, quant à elle, des physiciens travaillant sur des objets différents (et couvrant ainsi plusieurs divisions de la SFP), mais en utilisant des outils et des concepts communs.

J'invite donc les membres de ces divisions, s'ils le souhaitent, à rejoindre la division Physique Non Linéaire de la SFP en cochant dans leur espace membre l'image ci-contre.

Éric Falcon (eric.falcon@univ-paris-diderot.fr)
Directeur de recherche CNRS
Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université de Paris
Président de la division de Physique Non Linéaire de la SFP

L'Université Paris-Saclay, gagnante du French Physicists' Tournament 2021

Les 12 et 13 février derniers se tenait la 8e édition du French Physicists' Tournament, le tournoi français des physiciens[(a)]. À cette occasion, une centaine d'étudiants de licence et de master, représentant dix établissements de l'enseignement supérieur français, se sont réunis pour cette édition exclusivement virtuelle. Afin de préparer cet évènement, les participants ont travaillé pendant cinq mois sur onze problèmes ouverts à fort caractère expérimental, abordant différents thèmes de la physique.

Voici de manière sommaire quelques-uns des sujets qu'ils ont étudiés.

- Reproduire en laboratoire le fascinant phénomène naturel qu'est la formation d'une stalagmite de glace sous-marine, communément appelé une « brinicle ».
- Mettre en évidence l'analogie entre un système de gouttelettes interagissant avec sa propre onde créée par ses rebonds, système classique répondant aux lois de l'hydrodynamique, et la théorie quantique de l'onde pilote. Quelles sont les limites d'une telle analogie ?
- Un laser traversant un film de savon se délie en une multitude de filaments de lumière aléatoires. Est-il possible de produire des motifs spécifiques en utilisant ce phénomène *a priori* hasardeux, *via* la confection d'un médium particulier ?
- Un glaçon situé à l'interface d'une huile végétale et d'une huile pour bébé va se mettre à osciller entre les deux phases, à mesure qu'il relâche des bulles d'air et qu'il fond. Quelle serait la précision d'une horloge fabriquée à partir de ce phénomène ?
- L'ingénierie est mise à l'épreuve afin d'optimiser le moteur ainsi que l'allure de l'iconique bateau jouet « pop-pop », pour qu'il puisse traverser la plus grande distance possible.

Plusieurs sujets sont plus ludiques, comme l'étude de la dynamique de recroquevillement d'un spaghetti qui se réhydrate sur un chiffon trempé, ou bien la confection d'une lampe à partir d'une mine de crayon. Enfin, d'autres sujets abordent des thèmes plus classiques comme l'étude des frottements d'une balle sur une surface recouverte de sable mouillé, ou bien la formation fractale de dendrites lors de l'électrolyse de solutions aqueuses de sels de métaux.

Affiche des FPT 2021

© Université Paris-Saclay

L'équipe lauréate des FPT 2021.

Chaque sujet a été l'occasion pour les étudiants de s'immerger dans le monde de la recherche. Aiguillés par un doctorant ou un chercheur semaine après semaine, les participants ont démontré de réelles aptitudes à élaborer un travail de recherche et ont mis au point leur expérience en allant à la rencontre de chercheurs ou de toute personne qualifiée pouvant les aider au sein des laboratoires, permettant ainsi une approche innovante du milieu scientifique. Lors du tournoi en ligne, les équipes ont ainsi présenté à un jury de chercheurs et de professeurs des résultats d'une qualité remarquable lors de face-à-face en langue anglaise, reprenant les codes du débat contradictoire scientifique, et ce en dépit de l'obstacle de la distance.

Après deux jours d'échanges intensifs et d'émulation scientifique, l'équipe de l'Université Paris-Saclay s'est hissée à la première place du podium, devenant ainsi la première université à remporter le tournoi depuis sa création. Elle ira représenter la France cet été lors de l'IPT, le tournoi international des physiciens.

Site du French Physicists' Tournament :
https://france.iptnet.info

Lorenzo Périssé (lorenzo.perisse@cea.fr)
Doctorant au CEA-Saclay
Vice-président du comité d'organisation du French Physicists' Tournament

(a) Créé en 2014, le French Physicists' Tournament est organisé par le réseau « Jeunes » de la Société Française de Physique, soutenu par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et parrainé par l'Académie des sciences.

Les prochaines Rencontres Physique-Entreprise-Recherche

Rapprocher l'industrie et le monde académique

La première édition de ces rencontres s'était tenue le 10 mars 2017 dans les salons de l'Hôtel de ville de Paris. Soutenue par 56 partenaires (grands groupes, PME, *start-ups*), elle avait rassemblé 600 participants.

La Société Française de Physique organise une nouvelle édition des Rencontres Physique Entreprise Recherche (RPER), qui se tiendra le 17 septembre 2021 à Sorbonne Université (campus Jussieu) à Paris. Cette journée s'adresse aux doctorants et post-doctorants de toute la France et a pour but de :

- leur faire découvrir la belle physique réalisée dans les grandes industries, les PME et les *start-ups* ;
- valoriser le diplôme de doctorat auprès des entreprises en leur offrant l'accès à un vivier de jeunes docteurs en physique ;
- favoriser les échanges croisés entre entreprises, organismes et jeunes, afin de rapprocher les secteurs industriels et académiques.

Cette seconde édition est organisée en partenariat avec la Société Européenne de Physique (EPS) et l'ESPCI-Paris PSL, avec un programme élaboré sous la présidence de Didier Roux, académicien des sciences, des technologies et ancien directeur de la recherche et de l'innovation chez Saint-Gobain.

Les thèmes abordés couvriront un large éventail de domaines scientifiques dans lesquels les docteurs en physique peuvent apporter leur contribution. Des interventions sous forme de conférences et de tables rondes sont prévues sur la stratégie européenne dans le numérique, les télécommunications, les technologies quantiques, l'intelligence artificielle, la production d'énergie, la mobilité, l'agroalimentaire, ou encore la santé. Des ateliers interactifs permettront aux participants de mieux comprendre l'entrepreneuriat ou de tester un ordinateur quantique ! Ils donneront également l'occasion à celles et ceux qui le souhaitent de contribuer à l'élaboration de solutions ou de pistes de recherche sur les questions posées préalablement par certaines des sociétés présentes. Enfin, un lieu de rencontre (*meeting place*) permettra des échanges privilégiés entre des docteurs en activité dans des entreprises françaises et les participants, avec un "English corner" de l'EPS qui pourra offrir un éclairage plus ouvert sur l'Europe. Une conférence de clôture abordera plus généralement le thème de l'emploi des docteurs.

Afin d'attirer un maximum de jeunes de toute la France, l'hébergement, le diner et le petit déjeuner seront offerts aux participants non franciliens, comme lors de la première édition de ces rencontres.

Programme et inscriptions sur : www.rper.fr

Visionner la vidéo de la première édition : https://cutt.ly/rper2017

Lire l'article sur les RPER 2017 paru dans le journal *Le Monde* : https://cutt.ly/presseRPER2017

Une soirée digitale consacrée au Temps

Commencée en septembre 2020 avec différents concours lancés à l'intention du public scolaire et étudiant, la *Nuit des Temps 2021* s'est conclue le 10 mars 2021 par une soirée digitale pendant laquelle le palmarès a été dévoilé. Cet évènement, organisé par le CNRS, la SFP et le CEA, s'inscrit dans la continuité des précédentes « Nuits » festives que furent la *Nuit de la Lumière* en 2015, la *Nuit des ondes gravitationnelles* en 2017 et la *Nuit de l'Antimatière* en 2019. Le format de cette édition a dû être remodelé pour tenir compte des contraintes sanitaires : toutes les manifestations simultanées et interconnectées prévues en 2021 en présentiel dans vingt-six sites en France ont dû être reportées en 2022 – en espérant que les conditions le permettront à nouveau.

Pour cette soirée digitale, l'auditorium Pierre Lehmann du Laboratoire Irène Joliot-Curie (ICJLab) de l'Université Paris-Saclay et du CNRS a donc été transformé en plateau-télévision. Une table ronde sur l'irréversibilité du temps, le palmarès des concours, ainsi qu'un reportage intitulé « Big Bang sur Seine » ont été diffusés en direct sur la chaine *Youtube* de la Société Française de Physique et le *Facebook live* du magazine *Science & Avenir La Recherche*, partenaire de l'évènement. La soirée a été bien suivie (plus de 18 000 connexions).

La table ronde, menée par Fabrice Nicot, journaliste chez *Science & Avenir La Recherche*, a permis de croiser les points de vue sur les différents aspects que revêt l'irréversibilité du temps dans les domaines respectifs de Yasmine Amhis, physicienne des particules (ICJLab, CNRS), Emmanuel Trizac, physicien théoricien (Université Paris-Saclay), Christophe Bouton, philosophe (Université Bordeaux--Montaigne) et Arturo Londono-Vallejo, biologiste (Institut Curie). Deux enseignements peuvent en être tirés : à chaque échelle, de la physique subatomique aux échelles plus macroscopiques régies par la mécanique statistique, jusqu'à la vie d'une cellule, la nature a fixé une direction – ou une flèche – bien définie au temps, mais par des mécanismes différents et apparemment indépendants les uns des autres. De plus, même quand les lois décrivant les phénomènes sont exactement les mêmes quel que soit le sens du temps, le cours du temps n'en est pas pour autant aboli.

Le reportage « Big Bang sur Seine » était consacré à la mesure du bruit de fond cosmologique. Lors du refroidissement qui a suivi le Big Bang initial, au bout de 380 000 ans, les électrons et les protons se sont recombinés en atomes d'hydrogène électriquement neutres, ce qui a permis à la lumière de voyager librement. Ce moment où l'Univers est devenu transparent marque véritablement la fin de la « Nuit des temps ». Le rayonnement émis à ce moment-là peut encore être détecté de nos jours. Le premier volet de ce reportage, réalisé à Paris depuis le toit du laboratoire Astroparticules et Cosmologie, montre comment y parvenir avec un équipement aussi banal qu'une antenne télévision, et le deuxième volet comment la recherche de pointe en ce domaine s'effectue depuis le pôle Sud.

Le palmarès a été dévoilé pour les quatre concours *Nuit des Temps* : scientifique, littéraire, philosophique et artistique. Il faut tout d'abord féliciter l'ensemble des participants, tant la pandémie a compliqué l'année scolaire pour les élèves comme pour les professeurs. Se réjouir ensuite que le thème retenu ait permis de très bons travaux dès le niveau collège et même primaire (premier prix artistique pour une classe de CM2 de l'école Clément-Lalo de Lille et un second prix scientifique pour une classe de CM1 de l'école Aimé Césaire d'Auzeville Tolosane (31320)). Le palmarès complet et les œuvres primées sont disponibles sur le site de la Société Française de Physique (www.sfpnet.fr/la-nuit-des-temps-2021).

Cette édition 2021 s'est terminée par un aperçu de ce que sera la *Nuit des Temps 2022* : une grande soirée festive et joyeuse, fidèle à l'esprit des *Nuits* précédentes, qui se déroulera sur plus de vingt-six sites en France. Durant cette soirée, dont la date reste à déterminer, sera notamment désignée la « Meilleure chanson de tous les temps ». Un sondage est déjà ouvert. Vos nominations de chansons contenant le mot « temps » sont attendues d'ici là (voir www.sfpnet.fr).

Pour terminer, il convient de remercier l'ensemble des partenaires de l'évènement : la Société Française d'Optique, la Société Chimique de France, l'Université Paris-Saclay, la Graduate School de Physique de Paris-Saclay, le labex P2IO et le laboratoire IJCLab, ainsi que le magazine *Science & Avenir La Recherche*.

La *Nuit des Temps* en différé et les conférences ressources associées sur le temps sont disponibles sur la chaine *Youtube* de la SFP : https://cutt.ly/playlistNuitdesTemps .

Guy Wormser
Laboratoire ICJLab (Orsay)

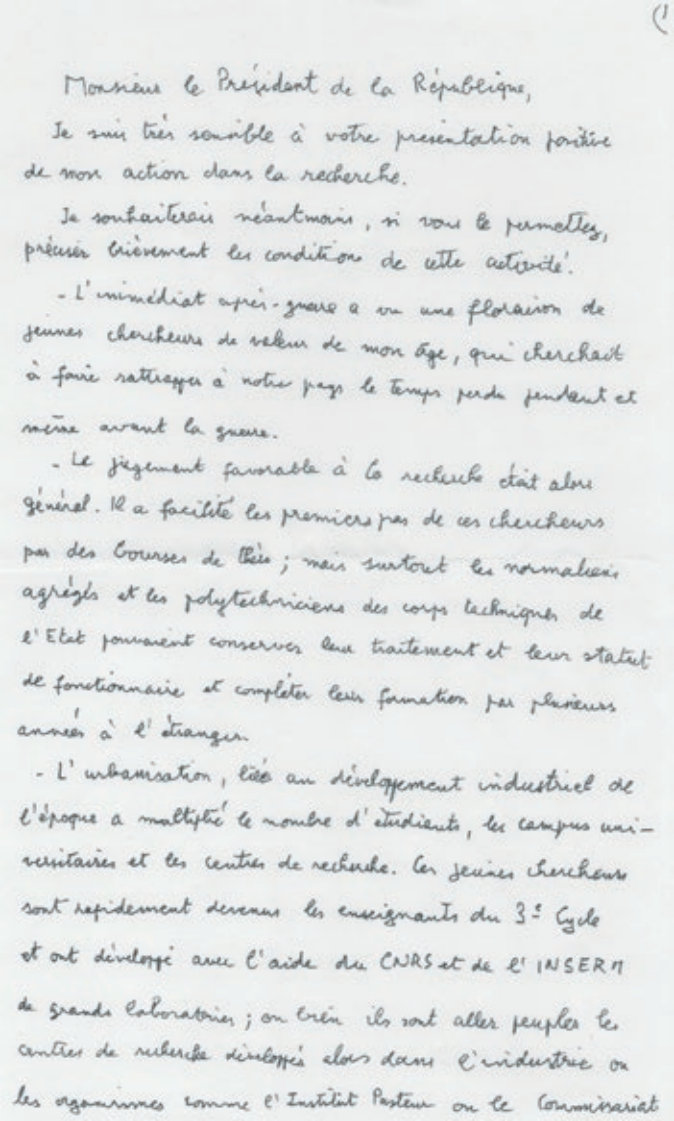
Jacques Friedel, homme des XXe et XXIe siècles

Jacques Friedel, le père de la physique des solides et de la métallurgie physique en France, aurait eu cent ans cette année. Sans revenir sur les témoignages académiques qui ont suivi sa disparition [1], et à l'initiative de Denis Jérome et Yves Bréchet [2], membres de l'Académie des sciences, *Reflets de la physique* présente un ultime message sur ses engagements.

Une écriture ferme et précise ainsi que son contenu, c'est tout Friedel, homme fidèle et rigoureux. Cette lettre au président Hollande, qui lui remit la grand'croix de la Légion d'honneur en 2013, en est le témoignage.

Le texte ci-dessous est un testament. On y voit défiler des images d'un homme simple : la grande table à l' École des Mines, partagée avec Émile Daniel et André Blandin ; le bâtiment 210 d'Orsay, où il faisait vivre un jeune labo de physique des solides lors des réunions hebdomadaires avec André Guinier, Pierre-Gilles de Gennes, Raymond Castaing et les jeunes ; le bâtiment 510, duquel sortait le *Journal de Physique*, qu'il concevait avec Odette Jancovici ; enfin, l'amphi Blandin, qui garde la mémoire de ces savants.

Étienne Guyon, pour le Comité de rédaction de *Reflets de la physique*



(1

Monsieur le Président de la République,

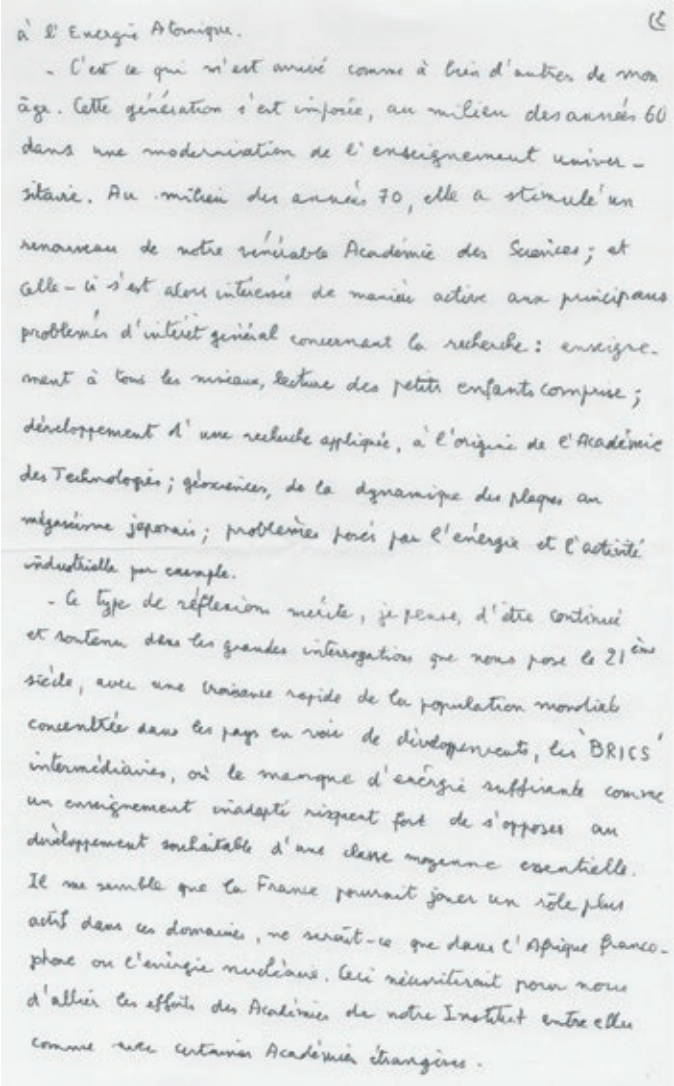
Je suis très sensible à votre présentation positive de mon action dans la recherche.

Je souhaiterais néanmoins, si vous le permettez, préciser brièvement les conditions de cette activité.

- L'immédiat après-guerre a vu une floraison de jeunes chercheurs de même âge, qui cherchait à faire rattraper à notre pays le temps perdu pendant et même avant la guerre.

- Le jugement favorable à la recherche était alors général. Il a facilité les premiers pas de ces chercheurs par des bourses de thèse ; mais surtout les normaliens agrégés et les polytechniciens des corps techniques de l'Etat pouvaient conserver leur traitement et leur statut de fonctionnaire et compléter leur formation par plusieurs années à l'étranger.

- L'urbanisation, liée au développement industriel de l'époque a multiplié le nombre d'étudiants, les campus universitaires et les centres de recherche. Ces jeunes chercheurs sont rapidement devenus les enseignants du 3e cycle et ont développé avec l'aide du CNRS et de l'INSERM de grands laboratoires ; ou bien ils sont allés peupler les centres de recherche développés alors dans l'industrie ou les organismes comme l'Institut Pasteur ou le Commissariat



à l'Energie Atomique.

(2

- C'est ce qui m'est arrivé comme à bien d'autres de mon âge. Cette génération s'est imposée, au milieu des années 60 dans une modernisation de l'enseignement universitaire. Au milieu des années 70, elle a stimulé un renouveau de notre vénérable Académie des Sciences ; et celle-ci s'est alors intéressée de manière active aux principaux problèmes d'intérêt général concernant la recherche : enseignement à tous les niveaux, lecture des petits enfants comprise ; développement d'une recherche appliquée, à l'origine de l'Académie des Technologies ; géoscences, de la dynamique des plaques au magmatisme japonais ; problèmes posés par l'énergie et l'activité industrielle par exemple.

- Le type de réflexion mérite, je pense, d'être continué et soutenu dans les grandes interrogations que nous pose le 21ème siècle, avec une croissance rapide de la population mondiale concentrée dans les pays en voie de développement, les BRICS intermédiaires, où le manque d'énergie suffisante comme un enseignement inadapté risquent fort de s'opposer au développement souhaitable d'une classe moyenne essentielle. Il me semble que la France pourrait jouer un rôle plus actif dans ces domaines, ne serait-ce que dans l'Afrique francophone ou l'énergie nucléaire. Ceci renforcerait pour nous d'abord les efforts des Académies de notre Institut entre elles comme avec certaines Académies étrangères.

[1] « Hommage à Jacques Friedel », *Reflets de la physique* **43** (2015) 4-13.

[2] Retrouvez l'article de D. Jérome et Y. Bréchet sur le site www.sfpnet.fr

Prix scientifiques

Prix Jeune chercheur **Saint-Gobain 2019** : **William Legrand**

Titre (français) de la thèse : *Élaboration de skyrmions magnétiques à température ambiante : taille, stabilité et dynamique dans les multicouches*, préparée au sein de l'Unité Mixte de Physique CNRS-Thalès sous la direction de Vincent Cros et Nicolas Reyren, et soutenue le 29 mars 2019 à l'Université Paris-Saclay.

Les skyrmions magnétiques sont des enroulements bidimensionnels et nanométriques de la configuration de *spin*, pouvant être stabilisés dans des multicouches magnétiques.
Pour comprendre et maitriser les propriétés physiques de ces objets, William Legrand a développé un modèle numérique original très générique permettant de prédire les profils adoptés par les skyrmions multicouches. Il a ensuite étudié expérimentalement les propriétés physiques influençant leur déplacement. L'optimisation des multicouches a abouti à l'observation expérimentale de la propagation de skyrmions de 50 nm de rayon à des vitesses atteignant 40 m/s.

Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives vers l'obtention de skyrmions qui pourraient être utilisés dans la conception de composants de calcul et de stockage d'information plus compacts et plus efficaces.

Le travail de thèse de William Legrand, à la frontière entre recherche fondamentale et applications à l'électronique de *spin*, est exceptionnel par son étendue, sa qualité et son impact. Il mérite sans réserve l'obtention du Prix Saint-Gobain de la SFP.
William Legrand est actuellement postdoctorant au Laboratoire de physique statistique de l'ENS Paris.

Prix Jeune chercheur **Daniel Guinier 2019** : **Claire Guépin**

Titre (français) de la thèse : *Recherche des sources cosmiques accélérant les astroparticules de haute énergie*, préparée à l'Institut d'Astrophysique de Paris sous la direction de Kumiko Kotera, et soutenue à Sorbonne Université le 14 juin 2019.

L'origine des particules de haute énergie dans notre univers est très controversée. Claire Guépin a formulé de nouvelles propositions théoriques quant à leur origine. Sa première proposition soutient que les magnétosphères des pulsars constituent des candidats attrayants pour l'accélération des rayons cosmiques.
Sa seconde proposition, très originale, se focalise sur les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie qui pourraient avoir comme origine des ruptures d'étoiles soumises aux forces de marées au voisinage de trous noirs supermassifs. Proposition qui pourrait expliquer le spectre et la composition des rayons cosmiques extragalactiques mesurés par l'Observatoire Auger en Argentine.

Claire Guépin impressionne par sa maîtrise profonde à la fois de la modélisation théorique de la production et des interactions des rayons cosmiques, et des nouvelles techniques de détection des particules d'ultra-haute énergie.

À travers sa thèse, Claire Guépin a révélé une maturité scientifique exceptionnelle que la SFP a souhaité récompenser avec le Prix Daniel Guinier.
Elle effectue actuellement un postdoctorat à l'Université de Maryland et au Centre de vol spatial Goddard de la NASA.

Prix Jeune chercheur **René Pellat 2019** (physique des plasmas) : **Elmar Slikboer**

Titre (français) de la thèse : *Étude des interactions plasma-surface à l'aide de la polarimétrie de Mueller*, effectuée dans les laboratoires de physique des plasmas (LPP) et de physique des interfaces et des couches minces (LPICM) de l'École polytechnique, sous la direction de A. Sobota (Université de technologie d'Eindhoven), O. Guaitella et E. Garcia-Caurel, et soutenue le 26 novembre 2018 à l'Université Paris-Saclay.

La thèse d'Elmar Slikboer porte sur la mise au point et le développement d'une nouvelle méthode optique de caractérisation de l'interaction de plasmas froids avec des surfaces diélectriques, méthode qui repose sur un polarimètre imageur de Mueller. En caractérisant les propriétés optiques de cibles exposées à des jets de plasma froids, cette approche élégante donne accès à des informations résolues en temps et dans l'espace inédites jusqu'à ce jour, telles que les composantes du champ électrique ou les gradients de température induits dans ces cibles.
Cette étude fondamentale adresse des problématiques essentielles dans l'industrie, pour le développement des applications récentes des plasmas froids à pression atmosphérique, qu'il s'agisse de traitements de surface, d'applications biomédicales ou encore de production de nanomatériaux.

Les travaux de M. Slikboer ont séduit le jury du prix René Pellat par leur incontestable qualité et leur originalité, et parce qu'ils ouvrent la voie à de nombreuses avancées aussi bien fondamentales qu'appliquées.
Elmar Slikboer poursuit actuellement ses activités de chercheur en physique des plasmas, en qualité de postdoctorant à l'Université de Liverpool.

Prix **Louis Ancel 2019** (matière condensée) **: Étienne Brasselet** et **Denis Bartolo**

À l'unanimité, le jury du prix Ancel a émis le souhait que le prix 2019 soit attribué conjointement à deux lauréats : Étienne Brasselet et Denis Bartolo.

Étienne Brasselet

Après une thèse soutenue en 2001 en cotutelle entre l'Université Paris-Sud et l'Université Laval de Québec, suivie de deux postdoctorats à l'ENS de Cachan et à l'Université Laval, Étienne Brasselet a été recruté au CNRS en 2006 au Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (LOMA) à Talence. Depuis 2016, il y est directeur de recherche CNRS.

Les recherches d'Étienne Brasselet portent sur l'interaction de la lumière avec la matière condensée. L'originalité de sa démarche consiste à explorer les couplages entre des singularités matérielles (défauts topologiques des cristaux liquides) et optiques (vortex de phase et de polarisation). Il a remarquablement ouvert la voie à de nouvelles techniques de mise en forme de vortex optiques, à l'aide de cristaux liquides soumis à des champs de différentes natures (électrique, magnétique...).
Parmi ses résultats récents, citons l'idée (2019) de séparer des gouttes énantiomères cholestériques au moyen d'un faisceau laser possédant un gradient d'hélicité orienté perpendiculairement à la direction de propagation de la lumière. Les gouttes se déplacent alors selon l'axe du gradient, mais dans une direction ou l'autre en fonction de leur chiralité. Cet effet présente une belle analogie avec la célèbre expérience de Stern et Gerlach réalisée avec un gradient de champ magnétique.
Le jury du prix Ancel s'est montré particulièrement admiratif de la démarche d'Étienne Brasselet basée sur d'ambitieuses interrogations de nature fondamentale, qu'il utilise par ailleurs pour élaborer des projets innovants.

Denis Bartolo

Denis Bartolo est né en 1974. Après une thèse sur les forces de Casimir dans les membranes, soutenue en 2003, et un postdoctorat à l'ENS Paris, il a été maitre de conférences à l'Université Paris Diderot au laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes de l'ESPCI. Depuis 2012, il est professeur à l'École normale supérieure de Lyon.

Initialement théoricien, Denis Bartolo s'est progressivement rapproché des expériences, voire de problématiques industrielles, en s'intéressant à l'hydrodynamique en milieu confiné. C'est ainsi qu'il a été co-inventeur de plusieurs brevets, dont un sur la production de microcanaux.
Denis Bartolo a étudié des suspensions de colloïdes actifs, avec notamment l'émergence de mouvements macroscopiques polaires de particules colloïdales mises en rotation par effet de Quincke et transformés en mouvements de translation spontanés à proximité d'un substrat. Il s'agit actuellement de l'expérience la mieux contrôlée au monde sur les systèmes actifs artificiels. Son travail théorique sur l'hydrodynamique des systèmes de fluides actifs polaires a débouché sur un résultat très original publié en 2019 sur la modélisation de mouvements de foules, basée sur l'analyse précise d'ondes de densité dans des films de marathons.
Avec une solide base de physique théorique associée à une bonne dose de curiosité intellectuelle, en interaction directe avec l'expérience, Denis Bartolo est devenu l'un des plus grands spécialistes de la matière active et de la physique hors équilibre, ce qui justifie largement l'attribution du prix Ancel de la SFP.

Prix **Joliot-Curie 2019** (physique des particules) : **Vincent Tisserand**

Vincent Tisserand a 50 ans. Après une thèse au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire à Orsay, il est entré en 1998 au CNRS au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, où il a été responsable du groupe LHCb. Depuis trois ans, il est directeur de recherche au Laboratoire de Physique de Clermont.

Vincent Tisserand a mené des recherches approfondies, d'abord dans l'expérience BaBar à Stanford, puis dans l'expérience LHCb du CERN à partir de 2010. Les deux expériences sont consacrées à l'étude des saveurs lourdes (particules composées de quarks lourds). La contribution de Vincent Tisserand a été remarquable à tous les stades des études : travail sur l'instrumentation ; analyses complexes, variées et complémentaires de canaux de désintégration des mésons beaux. Il s'est particulièrement illustré avec l'observation de la violation de CP dans les mésons B0, un résultat majeur.

Vincent Tisserand est un expert français reconnu au meilleur niveau international en physique expérimentale des saveurs lourdes. Sa contribution essentielle aux études de désintégrations de mésons beaux (comportant un quark lourd dit de beauté) permet de mieux contraindre et éprouver la description de l'asymétrie matière-antimatière du modèle standard de la physique des particules. Cette démarche est primordiale pour comprendre l'écart entre la prédiction du modèle et les observations faites en cosmologie.
Ces résultats justifient amplement que le prix Joliot-Curie 2019 de la SFP lui soit accordé.

Marc Lefort (1922-2021) **nous a quittés**

Nombreux sont les chercheurs ou enseignants qui sont très attristés par ce départ, car Marc Lefort a été un pionnier. Après avoir travaillé sur la chimie des radiations à l'Institut du radium à Paris, il a joué un rôle primordial dans le développement de la chimie nucléaire à Orsay. Ce furent d'abord des études de radiochimie permettant de comprendre les productions de noyaux radioactifs par réactions de spallation induites par les protons du synchrocyclotron qui venait de démarrer à l'Institut de Physique Nucléaire. Puis, il a fortement contribué à marier chimie et physique nucléaires, en particulier au niveau des méthodes expérimentales. Son rayonnement à l'international lui a permis d'attirer sur le site d'Orsay de nombreux chercheurs américains, canadiens, belges, israéliens et russes. Il a écrit plusieurs livres permettant de décrire les progrès de la recherche.

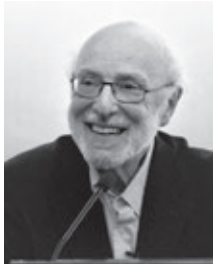
Marc Lefort a initié au niveau mondial la physique des ions lourds, en positionnant la France comme leader de cette discipline dans les années 1970. Il a été à l'origine du premier accélérateur mondial d'ions *très* lourds : Alice, à Orsay. C'est à cette période qu'il a été un acteur incontournable de la recherche des noyaux super-lourds et que son groupe a mis en évidence de nouvelles réactions nucléaires qui dominaient les collisions noyau-noyau.

L'évolution à plus haute énergie de ces mécanismes de réaction a été le premier objectif du GANIL. Marc Lefort a conduit la construction de cet ensemble, qui est le plus grand accélérateur actuel en France. Il a en été le premier directeur, de 1975 à 1982.

Pour l'ensemble de ses travaux, le prix Félix Robin lui a été décerné en 1982 par la SFP. En 1995, il a reçu la Légion d'honneur des mains d'Hubert Curien.

Marc Lefort a aussi été un enseignant brillant : il a su créer un enseignement de troisième cycle qui a attiré de nombreux jeunes. Son enthousiasme et sa pédagogie ont marqué toute une génération qu'il a su entrainer dans cette aventure, aussi bien en physique nucléaire qu'en physique atomique. Nous gardons tous le souvenir d'un excellent scientifique, animé aussi de profondes qualités humaines. Il restera un grand monsieur, qui pourtant savait rester modeste.

René Bimbot, Daniel Guerreau et **Bernard Tamain**



Maurice Kléman (1934-2021)

Maurice Kléman, grand nom de la physique, est décédé le 29 janvier à l'âge de 86 ans. Ancien élève de l'École polytechnique et ingénieur du Corps des mines, il était directeur de recherches honoraire au CNRS.

Esprit d'une envergure étonnante, excellent physicien, mathématicien, mécanicien, cristallographe, expérimentateur soigneux autant que théoricien brillant, Kléman a apporté des contributions considérables dans de nombreux champs de la physique. Il a, en particulier, fondé une approche topologique unificatrice des défauts dans la matière condensée.

La liste des domaines qu'il a marqués de sa rigueur et de son originalité est impressionnante. L'étude expérimentale et théorique des défauts dans les cristaux liquides constitue une des contributions majeures de Maurice Kléman, qui a créé, en ce domaine, une école de brillants chercheurs. Il a appliqué ses concepts aux quasi-cristaux et aux matériaux d'intérêt biologique, et particulièrement à l'arrangement de l'ADN dans les chromosomes. Dans les toutes dernières années de sa vie, il s'est intéressé à la cosmologie, et a proposé des conjectures originales et séduisantes sur la formation de l'Univers.

Impressionnante aussi était sa culture aux multiples facettes. Émouvante fut la jeunesse de Maurice Kléman sous l'occupation, passée en grande partie dans ce havre cévenol pour enfants juifs que fut Le Chambon-sur-Lignon, un épisode qui l'a profondément marqué.

Maurice Kléman avait reçu le prix Jean Ricard de la Société Française de Physique, le grand prix du CEA de l'Académie des sciences, et il était International Honorary Member de la prestigieuse American Academy of Arts and Sciences.

Premier générateur de signaux pour un contrôle complet de qubits

Zurich Instruments lance le SHFSG, premier générateur de signaux spécialement conçu pour les supraconducteurs et les qubits de *spin*. Le SHFSG supporte des fréquences de sortie allant du courant continu jusqu'à 8,5 GHz sans qu'il soit nécessaire de calibrer le mélangeur, et fournit un signal propre et à bas bruit dans une bande passante de 1 GHz.

Description

Le SHFSG tire parti de la technique de conversion de fréquence super-hétérodyne pour assurer une meilleure linéarité et moins de tonalités parasites qu'avec les méthodes standard basées sur un mélangeur IQ. Il peut également servir à programmer des séquences avancées d'impulsions. Ainsi, le SHFSG génère des signaux propres et stables sans que l'utilisateur ait besoin d'étalonner le mélangeur ou de passer du temps à la maintenance du système. Les synthétiseurs internes contribuent à accroitre la fidélité des opérations sur portes quantiques, grâce à leur faible bruit de phase et à leur faible *jitter* de synchronisation sur toute la gamme de fréquences de sortie. Le SHFSG est disponible en deux variantes, à 4 ou 8 canaux.

Le logiciel LabOne, la compatibilité des pilotes avec Labber et QCoDeS et la prise en charge des API pour Python, C/C++, MATLAB®, LabVIEW™ et .NET assurent un haut niveau d'intégration avec les niveaux supérieurs du *stack* quantique.

Applications

Le SHFSG s'intègre de manière transparente à tous les dispositifs du système de contrôle de l'informatique quantique de Zurich Instruments ; il est ainsi prêt à exécuter des protocoles de rétroaction et de correction d'erreurs rapides. Un seul SHFSG permet de réduire la complexité des systèmes à quelques qubits ; quelques instruments synchronisés ensemble permettent de passer à des systèmes de 100 qubits et plus.

Index des articles publiés dans Reflets de la physique en 2020
(n°64 à n°67)

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

Éditoriaux

- Le 13 novembre 2019, EDP Sciences est devenue filiale à 100% de CSPM Europe (*Communiqué*), ***64***, p. 2.
- La physique face au défi du coronavirus et du confinement Langlais C., ***65***, p. 3.
- Les priorités actuelles de la Société Française de Physique Langlais C., Wormser G., ***66***, p. 2.
- Contribuer au débat public : l'exemple de la loi de programmation de la recherche Langlais C., Wormser G., ***67***, p. 2.

Images de la physique

- Les résultats cosmologiques de la mission Planck Aghanim N., Dole H., ***64***, p. 4.
- Le *spin* des électrons se comporte-t-il comme leur charge ? Cadiz F., Rowe A.C.H., Paget D., ***65***, p. 4.
- Universalité de la saveur leptonique : les trois leptons ont-ils réellement les mêmes propriétés ? Becirevic D., Leroy O., Polci F., Wormser G., ***66***, p. 6.
- Peut-on parler de suprématie quantique ? Le Bellac M., ***67***, p. 4.

Avancées de la recherche

- Imagerie sismique par corrélation de bruit ambiant : du laboratoire à l'échelle globale Boué P., Paul A., ***64***, p. 12.
- Érosion et accrétion de matériaux granulaires humides Sauret A., Saingier G., Jop P., ***64***, p. 17.
- Première image d'un trou noir Combes F., ***64***, p. 23.
- Des météorites nous éclairent sur les tout débuts du Système solaire (*Brève*), ***64***, p. 25.
- Pourquoi et comment peser l'antimatière ? Sacquin Y., Hilico L., ***65***, p. 12.
- SESAME, un laboratoire d'excellence multidisciplinaire au service des scientifiques du Moyen-Orient Nadji A., Tadjeddine A., ***65***, p. 19.
- Quand un superfluide passe le mur du son (*Brève*), ***65***, p. 25.
- Les physiciens face à la pandémie de Covid-19 ***66***, p. 4.
- Convection dans les planètes « molles » : du laboratoire à Vénus Davaille A., Di Giuseppe E., Mittelstaedt E., Smrekar S., ***66***, p. 10.
- La spectrométrie de masse par accélérateur : une technique de physique nucléaire appliquée à la reconstitution des variations passées du champ magnétique terrestre Bourlès D.L., Simon Q., Thouveny N., ***66***, p. 16.
- Congélation d'émulsions : de la mayonnaise à la métallurgie Deville S., Monteux C., ***66***, p. 22.
- Le Square Kilometre Array (SKA) : un radiotélescope géant pour étudier l'aube et l'évolution du cosmos Ferrari C., ***67***, p. 16.
- Détecter l'état électronique d'un atome en mesurant sa masse (*Brève*), ***67***, p. 15.
- La croissance des villes vue par la physique statistique Barthélémy M., ***67***, p. 16.

Physique et innovation

- Accélérer la cicatrisation des plaies chroniques grâce à des pansements à base de graphène : la *start-up* GRAPHEAL Interview de V. Bouchiat par M. Belakhovsky, ***65***, p. 26.
- Des respirateurs artificiels grâce à des physiciens spécialistes de matière noire ! (*Brève*), ***66***, p. 5.
- Comment un jeune chercheur italien devient-il auto-entrepreneur en France ? Interview de N Somaschi par M. Leduc, ***66***, p. 28.

Histoire des sciences

- Jocelyn Bell Burnell, découvreuse des pulsars Combes F., Durret F., ***64***, p. 30.
- La tour Eiffel : le premier laboratoire d'aérodynamique en France. De la crise de Panama à la crise de trainée Wesfreid J. E., ***65***, p. 30.
- Noether était-elle physicienne ? Kosmann-Schwarzbach Y., ***65***, p. 34.
- Il y a cinquante ans : les premières réactions de fusion nucléaire induites par laser Bobin J.-L., ***67***, p. 21.
- La (dis-)simulation FPU : une Femme Physicienne Underground – Mary Tsingou et l'histoire de la première expérience numérique Dauxois T., ***67***, p. 26.

Prise de position de la Société Française de Physique

- Lettre sur le projet de loi de programmation de la recherche, adressée le 5 juin 2020 par un collectif de sociétés savantes à la ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation ***67***, p. 38.

Vie de la SFP

- Évolutions du site *web* de la Société Française de Physique Verguin M., ***64***, p. 33.
- L'assemblée générale du 25 janvier 2020 ***65***, p. 40.

Culture scientifique

- Les membres de la Société Française de Physique et la culture scientifique Hennequin D., Vedel F., ***64***, p. 26.
- Pour se déconfiner par les sciences Petites expériences de physique à réaliser chez soi Simonin G., ***65***, p. 4.
- Quelques liens pour faire de la physique malgré le confinement ***65***, p. 5.
- Faire des bulles, tout un art, toute une science Fusier P.-Y., Graner F., Restagno F., Rio E., Shoaib U., Vallet O., ***66***, p. 31.
- Le Palais de la découverte : un avenir incertain. L'héritage de Jean Perrin remis en question Hennequin D. et la commission Culture scientifique de la SFP, ***67***, p. 31.

Édition scientifique, publications

- Revues de l'American Physical Society : la qualité pour un juste prix ! *(Prise de position SFP-SFO)*, *67*, p. 42.

Enseignement

- Les Olympiades internationales de physique, quinze ans après Remy S., Vandenbrouck F., *65*, p. 45.
- Olympiades de Physique France : XXVIIe concours national Le comité national des OdPF, *66*, p. 38.

Colloques, journées scientifiques

- Le Congrès général 2019 de la SFP *64*, p. 36.
- Le concours *Beautiful Science* de la SFP *64*, p. 38.
- Climat, énergie, environnement : où va-t-on ? Bonhomme G., *64*, p. 42.
- Journées 2019 de la division Accélérateurs de la Société Française de Physique *66*, p. 42.
- Retour sur la Soirée Jean Perrin au Palais de la découverte Wormser G., *67*, p. 40.

Portraits

- Astrid Lambrecht, la curiosité en partage Grousson M., *64*, p. 40.
- Guy Wormser, vice-président entrant de la SFP *66*, p. 34.

Prix scientifiques de la SFP

- Prix Louis Ancel 2017 (matière condensée) : Éric Collet *64*, p. 34.
- Prix Aimé Cotton 2017 (phys. atomique, optique) : Patrice Genevet *64*, p. 34.
- Prix Joliot-Curie 2017 (phys. des particules) : Sylvie Rosier-Lees *64*, p. 34.
- Prix Louis Ancel 2018 (matière condensée) : Anna Minguzzi *64*, p. 35.
- Prix Aimé Cotton 2018 (phys. atomique, optique) : Nicolas Sisourat *64*, p. 35.
- Prix Joliot-Curie 2018 (physique nucléaire) : Stéphane Grévy *64*, p. 35.
- Grand prix Jean Ricard 2018 : Hubert Saleur *65*, p. 42.
- Prix Émilie du Châtelet 2018 : Marcelo Rozenberg *65*, p. 42.
- Grand prix Jean Ricard 2019 : Xavier Marie *65*, p. 43.
- Prix Félix Robin 2019 : François Nez *65*, p. 43.
- Prix Jean Perrin 2018 (popularisation de la science) : Azar Khalatbari *66*, p. 36.
- Prix Jean Perrin 2019 (popularisation de la science) : Hélène Fischer *66*, p. 36.
- Prix Jeune chercheur Saint-Gobain 2018 : Samuel Beaulieu *66*, p. 37.
- Prix Jeune chercheur Daniel Guinier 2018 : Nancy Paul-Hupin *66*, p. 37.
- Prix Jeune chercheur René Pellat 2018 (physique des plasmas) : Anna Grassi *66*, p. 37.
- Prix Jean-Louis Laclare 2019 (physique des accélérateurs) : Hélène Felice *66*, p. 42.
- Prix Friedel-Volterra 2018 (conjoint SIF-SFP) : Francisco Sette *67*, p. 43.
- Prix Holweck 2019 (conjoint IoP-SFP) : Xavier Garbet *67*, p. 43.

Biographies

- Bernard Cagnac (1931-2019) *65*, p. 44.
- Georges Saada (1932-2019) *65*, p. 44.
- Eugène Cremmer (1942-2019), un des pères de la supergravité à onze dimensions Julia B., *66*, p. 40.
- Sydney Leach, une insatiable curiosité (1924-2019) Roueff É., Tchang-Brillet F., Horani M., Bourguignon B., *66*, p. 41.
- Hommage à Robert Klapisch (1932-2020) *67*, p. 44.

Tribune libre

- La recherche, un droit mondial Leduc M., Piuzzi F., Spiro M., Suzor-Weiner A., *67*, p. 46.

Courriers des lecteurs

- Des sociétés savantes unies dans un contexte qui change Leduc M., Guyon É, Subran C., *64*, p. 43.
- Réponse au courrier des lecteurs « Remarques et compléments sur le numéro de *Reflets de la physique* sur l'électricité nucléaire », paru dans le numéro 61, page 53 Brom J.-M., *64*, p. 44.

Livres – Notes de lecture

- *Le temps des neurones. Les horloges du cerveau,* par D. Buonomano Brézin É., *64*, p. 45.
- *Big Bang. Comprendre l'univers depuis ici et maintenant,* par J.-P. Uzan Vilain C., *64*, p. 46.
- *L'insoutenable gravité de l'Univers,* par G. Chardin Le Padellec A., *64*, p. 47.
- *La Nouvelle Physique de l'Univers – Mode, Croyance, Imaginaire,* par R. Penrose Le Padellec A., *65*, p. 46.
- *Savant cherche refuge – Comment les grands noms de la science ont survécu à la Seconde Guerre mondiale,* par S. Balibar Guyon É., *65*, p. 47.
- *À l'aube de la théorie des quanta. Notes inédites d'Emile Borel sur un cours de Paul Langevin au Collège de France,* par M.T. Bustamante de la Ossa *(Présentation du livre par l'auteur)*, *66*, p. 43.
- *Savantes nébuleuses. L'origine du monde entre marginalité et autorité scientifique,* par V. Fages Vilain C., *66*, p. 46.
- *Faut-il sortir du nucléaire ?,* par G. Woessner Livet F., *66*, p. 46.
- *Les lois d'échelle – La physique du petit et du grand,* par T. Séon Le Padellec A., *66*, p. 47.
- *L'apprentissage de la critique. Développer l'analyse critique en physique,* par L. Viennot et N. Décamp Veyssié M., *67*, p. 47.

Comment fait le gecko pour marcher au plafond ?

À la découverte des nanostructures naturelles

Serge Berthier

Belin, collection Bibliothèque scientifique (2016, 240 pages, 26 €)

Mais comment donc fait le gecko pour marcher au plafond ? Quel est le secret des espadons pour nager aussi vite ? Pourquoi les scarabées restent-ils impeccablement propres au milieu du désert si poussiéreux ? Comment expliquer les nuances changeantes de bleu des beaux papillons tropicaux ?
Ces questions, issues des observations du monde vivant qui nous entoure, ont dû attendre le développement de technologies d'imagerie à l'échelle nanométrique pour trouver des réponses.

Serge Berthier, physicien à l'Institut des nanosciences de Paris, nous guide grâce à de magnifiques images, à travers les échelles d'observation, du macroscopique jusqu'à la centaine de nanomètres, en passant par les échelles intermédiaires millimétriques et micrométriques, chaque niveau d'observation révélant d'incroyables structures pour des fonctions bien précises. Grâce aux nanostructures, la Nature atteint le triple objectif de multifonctionnalité, économie et efficacité, tout cela avec une complexité maitrisée, pour une adaptation au plus près des conditions de vie.

L'ouvrage s'articule autour de quatre thématiques rattachées aux quatre éléments : l'air, l'eau, la terre et le feu.
L'auteur rappelle en début de chaque partie, les principes physiques sur lesquels s'appuient les explications : majoritairement issus de l'optique et des ondes électromagnétiques, mais aussi des interactions dipolaires de van der Waals et autres forces de surface. La chimie n'est jamais non plus très loin.

La partie la plus fournie est celle consacrée à l'air, pour laquelle les phénomènes optiques sont prépondérants, afin d'expliquer bien des aspects du monde animal : couleurs bien sûr, mais aussi transparences, voire même invisibilité ! Nous découvrons aussi comment certains invertébrés utilisent la polarisation de la lumière pour communiquer de façon cryptée.

Même si les trois autres parties présentent moins d'exemples, ils n'en sont pas moins spectaculaires ou essentiels : survie en milieu très inhospitalier, efficacité de déplacements sur des surfaces parfois insolites, résistance aux chocs, communications très particulières.
Une cinquième partie s'interroge sur les fonctions de certaines structures observées et pas encore bien comprises. Elle souligne aussi la difficulté à reproduire dans nos laboratoires ces fabuleuses créations de la Nature, et certains enjeux des cristaux protoniques, souvent bio-inspirés. Par exemple, aucun détecteur artificiel ne surpasse pour l'instant le système de détection moléculaire des antennes de papillons !

Cet ouvrage a toute sa place dans une bibliothèque familiale. Il se feuillette aisément, et les nombreux encadrés captent l'attention du lecteur. La grande qualité de son iconographie et les surprenants exemples présentés raviront les profanes et aiguiseront la curiosité des jeunes et des moins jeunes. Les scientifiques apprécieront la mise en relation des phénomènes observés et des concepts fondamentaux. Les enseignants pourront y puiser bon nombre d'illustrations pour de nombreux cours, à tout niveau.
Il montre enfin à quel point la physique est bien une science de la Nature et, de ce fait, c'est incontestablement un beau livre de physique.

Sophie Remy
Professeure de physique en classe préparatoire MPSI, Limoges

Les Étincelles du Palais de la découverte

© A. Robin / Universcience

Informations pratiques
Jardin Caroline Aigle – 186, rue Saint Charles, Paris, 15e - Métro : ligne 8, station Balard
Public : âge minimum autorisé 6 ans.

Réservation obligatoire
www.palais-decouverte.fr/

Actuellement fermé pour rénovation, le Palais de la découverte poursuit ses activités hors les murs pendant les travaux, avec les « Étincelles du Palais », sa structure éphémère située dans le 15e arrondissement de Paris, qui a ouvert ses portes le 9 juin 2021.

Cette construction spectaculaire, retenue à l'issue d'un appel d'offre, a séduit par ses qualités durables (bâtiment tout en bois) et son parti pris architectural.

Trois salles, réunissant six disciplines (chimie et géosciences, physique et informatique, sciences de la vie et mathématiques) sont actuellement ouvertes au public. Les médiatrices et médiateurs du Palais de la découverte vous y réserveront l'essentiel de leur savoir-faire et vont vous surprendre sur de nouveaux terrains d'expérimentations et d'exploration.

Le dispositif de médiation « Un chercheur, une manip » revient également.

Une quatrième salle, consacrée à l'astronomie et au Planétarium, ouvrira prochainement.

Une histoire de flou – Miroirs, trous noirs et autres mondes

Pierre Léna

Le Pommier, collection Impromptus (2019, 392 pages, 20 €)

Pierre Léna, infatigable pédagogue, nous offre – à nouveau – un excellent ouvrage en huit chapitres. Chacun est émaillé de notes, systématiquement placées en fin de texte, dans un agencement très efficace et très lisible.

Une annexe, un glossaire, une table des instruments astronomiques ainsi qu'une bibliographie complètent le tout. Le livre est amené progressivement, avec comme fil directeur la brillante carrière scientifique de l'auteur, mêlant tour à tour histoire, démarche scientifique, méandres politiques – eh oui ! –, tout ceci dans la perspective de décrire le fonctionnement mais également l'apport scientifique du VLT-I (Very Large Telescope Interferometer) avec ses quatre géants de 8,2 m Antu (le Soleil), Kueyen (la Lune), Melipal (la Croix du Sud) et Yepun (Sirius), tous fixes sur une base trapézoïdale, et ses satellites mobiles curieusement nommés « coquetiers ». Pour simplifier, au risque d'être quelque peu réducteur, l'ouvrage a deux versants principaux, l'un technique autour des optiques adaptative et interférométrique, l'autre autour des applications ayant trait à l'étude du trou noir galactique et autres exoplanètes.

L'optique adaptative est l'astucieuse réponse technologique au flou – le *seeing* –, l'effet de scintillation généré par l'agitation des couches de l'atmosphère à différentes températures, qui provoque une perturbation du trajet de la lumière. Il s'agit alors de décabosser, à l'aide de miroirs déformables, les fronts d'ondes préalablement analysés, ce qui requiert en rétroaction d'importantes capacités de calcul. L'interférométrie optique, elle, permet d'améliorer de façon spectaculaire la résolution angulaire, en particulier d'objets en champ lointain. Cette dernière est limitée par la diffraction – tache d'Airy ; plus le collecteur est grand et meilleure est la résolution, avec cependant l'inconvénient qu'il se déforme alors sous son propre poids. L'astuce consiste en la synthèse d'ouvertures, avec des collecteurs travaillant en réseau interférométrique ; l'on obtient ainsi un miroir géant sans augmenter la surface. Grâce aux travaux pionniers de Joseph Fourier, on peut alors reconstituer une véritable image de la source observée à partir des interférences entre ondes lumineuses collectées par chacun des télescopes, du moins tant que l'on dispose de franges dans toutes les directions du plan d'une image donnée. La durée pour que la lumière atteigne deux collecteurs en configuration interférométrique étant généralement différente, il faut compenser ce déphasage indu à l'aide d'un « trombone optique », dispositif constitué de miroirs sur chariots mobiles pilotés par ordinateur. Enfin, mentionnons une ruse d'astronome : la méthode dite de « double champ ».

Le VLT-I, ce fabuleux instrument interférométrique couplé à l'instrument GRAVITY, a grandement contribué à l'observation systématique de notre centre galactique et du trou noir supermassif SgrA★ (voir l'article p. 21). Ainsi, les orbites elliptiques des étoiles proches ont pu être cartographiées, ce qui a permis d'évaluer la masse de ce trou noir, objet également très étudié par le consortium Event Horizon Telescope, un télescope virtuel radio de très large base. Le VLT-I est également incontournable pour l'étude des planétésimaux progéniteurs des planètes ou des systèmes planétaires extrasolaires, pour laquelle une résolution d'une dizaine de millisecondes d'arc est la clé. Ainsi, par détection indirecte de l'effet gravitationnel sur le mouvement de l'étoile hôte qui subit alors un léger zigzag, l'instrument fétiche de Pierre Léna a largement contribué au catalogue des quelques 4000 exoplanètes détectées à ce jour, dans la lignée de la découverte historique d'octobre 2015 de 51 Peg b par Mayor et Queloz, lauréats du prix Nobel de physique en 2019.

J'ai eu grand plaisir à lire cet ouvrage que je recommande vivement, et dans lequel l'auteur fait preuve d'une extrême modestie en citant abondamment ses collègues, sans chercher à mettre en avant ses propres contributions qui sont pourtant majeures.

Arnaud Le Padellec

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse

Le saviez-vous ?

Suite à l'article de José-Eduardo Wesfreid sur la tour Eiffel (*Reflets* n°65, pp. 30-33), Hubert Schaff* et Étienne Guyon** (guyon@pmmh.espci.fr) posent à nos lecteurs la question suivante :

Quel est le savant, prix Nobel de physique, qui a effectué la mesure de la hauteur de la tour Eiffel, et de quelle façon ?

La réponse sera donnée dans le prochain numéro de *Reflets de la physique*.

* Ancien président de la Société Française de Métallurgie et des Matériaux (2015-2016). **Ancien président de la Société Française de Physique (2001-2002).

Détection synchrone

... et bien plus, de DC à 600 MHz

À partir de
EUR 5.500,-

- Détection optimisée pour les impulsions brèves: **Boxcar averager**
- Acquisition d'images lors du balayage laser: **Enregistreur d'images**
- Une offre tout-en-un pour le verrouillage et la stabilisation du laser: **PID/PLL**
- Contrôle natif depuis les APIs de votre choix: **Python, C, MATLAB®, LabVIEW™ et .NET**

Zurich Instruments

Retrouvez-nous sur
www.zhinst.com