reflets de la PHYSIQUE

n° 54
juillet-août 2017

www.refletsdelaphysique.fr

Revue de la Société Française de Physique

# Propagation des maladies foliaires par la pluie

*Avancées de la recherche*

- Le neutrino au service de la géophysique
- À la recherche de l'ultime atome
- Le point sur les exoplanètes

*Science et société*

- Un MOOC pour comprendre le monde à travers notre quotidien

www.sfpnet.fr

n° 54 - juillet-août 2017

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

# Société Française de Physique, Société Française d'Optique, un rapprochement nécessaire

L'année 2015 a vu la signature par les présidents de la SFP et de la SFO d'un accord-cadre dans le but de coordonner les activités des deux sociétés savantes (voir *Reflets de la physique* n°**43**, p. 54, et n°**46**, p. 37). Il s'agissait d'amplifier la visibilité de nos deux sociétés, d'augmenter l'impact des actions concertées auprès de nos interlocuteurs, pour la plupart communs, organismes de recherche, universités et partenaires industriels. Une cotisation globale réduite pour l'adhésion groupée à la SFP et à la SFO a été mise en place dès 2016, afin de donner aux membres des deux sociétés savantes le sentiment d'appartenir à une communauté élargie, capable de produire des actions communes. Au niveau de la gouvernance, chaque conseil d'administration accueille en son sein un membre du conseil d'administration de la société savante sœur.

Plusieurs actions concrètes ont été mises en place depuis lors.

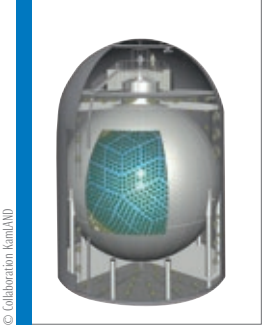
La première a porté sur la coordination des calendriers des deux congrès nationaux, afin d'éviter des concurrences passives qui desservent les communautés scientifiques concernées et les entreprises adhérentes soutenant leur dynamique. Ces congrès sont maintenant organisés en alternance, les années impaires pour la SFP et les années paires pour la SFO. Chaque société savante prend alors soin d'aménager un espace d'accueil visible, ouvert à la société sœur. Ce déphasage a été mis en place dès 2016 avec la tenue du congrès OPTIQUE Bordeaux 2016, qui a accueilli les sessions scientifiques de la division de Physique Atomique, Moléculaire et Optique (PAMO) de la SFP. Il en a été de même cette année, où les clubs Nanophotonique et Biophotonique de la SFO ont participé au congrès général de la SFP qui s'est tenu à Orsay du 3 au 7 juillet. À cette occasion, la SFO a également partagé son carnet d'adresses industrielles pour aider à l'organisation d'un salon d'exposants.

Une deuxième action a conduit à la création en 2017 d'une commission « Femmes et Physique » au sein de la SFO, analogue à celle de la SFP. L'idée est de travailler ensemble sur cette problématique des inégalités professionnelles hommes/femmes, mais aussi sur d'autres problématiques importantes en sciences dures, en élargissant les groupes de travail sur les deux sociétés. Dans cet esprit, les commissions de la SFP et les Clubs de la SFO travaillant sur des sujets voisins (jeunes chercheurs et chercheuses, enseignement, culture scientifique, entreprises, pays en voie de développement...) sont invités à se rapprocher. Des actions locales communes pourront aussi être envisagées.

Enfin, l'ouvrage *La lumière en lumière : du photon à l'Internet*, publié en 2016 par EDP Sciences et lauréat du Prix Roberval 2016, a été coordonné et coécrit par des membres de la SFP et de la SFO. Il en est de même des différentes brochures qui ont été réalisées dans le cadre de l'Année de la Lumière 2015.

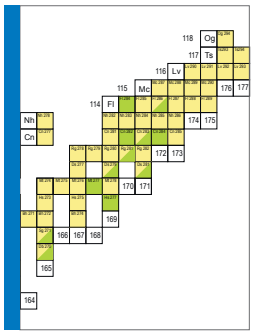
À l'image de toutes ces actions communes, il serait souhaitable que la lumière continuât à rayonner sur ce partenariat SFP-SFO.

**Benoît Boulanger**, président de la Société Française d'Optique
**Olivier Dulieu**, responsable de la division Physique Atomique, Moléculaire et Optique de la SFP
**Michel Spiro**, président de la Société Française de Physique

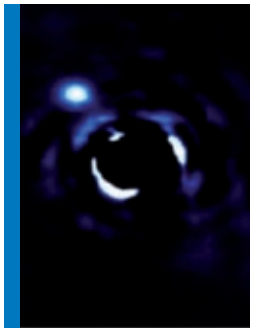


© Collaboration KamLAND

p. 12



p. 15



p. 22

p. 31

© Tristan GILET (Liège) and Lydia BOUROUIBA (MIT).

Séquence d'images illustrant le mécanisme de propagation des maladies foliaires par la pluie (voir article, p. 4).

# Sommaire


## Éditorial

**2** Société Française de Physique, Société Française d'Optique, un rapprochement nécessaire
Benoît Boulanger, Olivier Dulieu et Michel Spiro

## Images de la physique

**4** La physique de la pluie conditionne la propagation des maladies en agriculture
Tristan Gilet et Lydia Bourouiba

## Avancées de la recherche

**10** Le neutrino au service de la géophysique
Vincent Fischer et Thierry Lasserre

**14** À la recherche de l'ultime atome
Christelle Stodel, David Boilley, Julien Piot et Dieter Ackermann

**20** Le point sur les exoplanètes, une diversité inattendue
Anne-Marie Lagrange

## Science et société

**26** Quidquam : un MOOC grand public pour comprendre le monde à travers notre quotidien
Daniel Hennequin et Maxime Beaugeois

**31** La science pour les tout-petits : « La nature à la loupe »
Alexandra Petreto *et al.*

## Au sein et autour de la SFP

**32** Actualités de la SFP

**34** Prix scientifiques

**36** Olympiades de Physique France, XXIVe concours national

**38** La France toujours bien placée dans l'International Physicists' Tournament !
Maxime Harazi

**40** La Nuit des ondes gravitationnelles
Guy Wormser et Nicolas Arnaud

**42** Les Jardins de la physique
Marie Signoret

**43** Hommage à Cirano de Dominicis (1927-2017)
Roger Balian, Alain Billoire et François David

**44** Tribune libre : Cinquante ans de réformes de la physique scolaire
Bernard Julia

## Reflets de la physique et ses lecteurs

**46** Notes de lecture



**Comité de rédaction**
**Président :** Stefano PANEBIANCO
**Membres :** Michel BELAKHOVSKY - Jean-Marie BROM - David CÉBRON - Françoise COMBES - Nicolas DELERUE - Olivier DULIEU - Titaina GIBERT - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN - François JULIEN - Michèle LEDUC - Arnaud LE PADELLEC - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Laurence RAMOS - Sophie REMY - Pascale ROUBIN - Christiane VILAIN - Paul VOISIN

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

**Directeur de la publication :** Jean-Jacques BÉNATTAR
**Rédacteur en chef :** Charles de NOVION
**Conception :** Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR
**Réalisation graphique :** Lætitia MORIN - laetitiamorin-graphiste.fr
**Suivi de rédaction :** Agathe CYMER
**Service publicité :** Jessica EKON - publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 3e trimestre 2017 - ISSN : 1953-793X – e-ISSN : 2102-6777 -

© SFP - Édité à 3 910 exemplaires


**Imprimerie Jouve**
11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01
- Tél. : 01 44 76 54 40
**Société Française de Physique**
33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
- Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19
e-mail : contact@sfpnet.fr - Serveur : www.sfpnet.fr
**SFP Bulletin,** Institut Henri-Poincaré,
11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris
- e-mail : sfp-bulletin@ihp.fr
**Serveur :** www.refletsdelaphysique.fr

# La physique de la pluie conditionne la propagation des maladies en agriculture

**Tristan Gilet**[1] (Tristan.Gilet@ulg.ac.be) et **Lydia Bourouiba**[2] (lbouro@mit.edu)
(1) Microfluidics Lab., Bât. B52/3, Université de Liège, Quartier Polytech 1, Allée de la découverte 9, B-4000 Liège, Belgique
(2) The Fluid Dynamics of Disease Transmission Laboratory, Massachussets Institute of Technology, Cambridge, MA-02139, USA

Les maladies qui affectent le feuillage des plantes agricoles ont des impacts économique et humain considérables, que les pesticides et les modifications génétiques ne suffisent pas à éliminer. La transmission de ces maladies reste une zone d'ombre critique. Pourrions-nous comprendre à quelle vitesse les pathogènes passent d'une plante à l'autre ?

Nous nous sommes intéressés ici au mécanisme dominant la propagation des pathogènes : la pluie. Comment la pluie interagit-elle avec le feuillage ? Jusqu'où ses éclaboussures peuvent-elles transporter les pathogènes ? Les réponses à ces questions sont conditionnées par les lois de la physique, et en particulier par celles des liquides à l'échelle d'une goutte.

Les maladies des plantes agricoles restent responsables de la perte d'environ 15% de nos récoltes, en moyenne à l'échelle mondiale [1]. Virus, bactéries et champignons s'attaquent directement au feuillage et mettent en péril le développement de la plante. Si certains types de rouille (infections foliaires sous la forme de champignons) réapparaissaient maintenant, ils pourraient dévaster près d'un tiers des récoltes de blé [2]. Les épidémies foliaires ont souvent été observées juste après des épisodes de pluie, et une corrélation statistique a pu être établie entre ces deux phénomènes [3]. L'explication la plus plausible tient au fait que les pathogènes sont entourés d'un mucilage, une substance relativement visqueuse composée de glucides complexes solubles dans l'eau, que l'on retrouve à la surface des feuilles infectées. Le vent seul ne peut alors déloger les pathogènes. En revanche, la pluie peut dissoudre ce mucilage, et emporter les pathogènes logés sur les feuilles vers les plantes voisines, au rythme des éclaboussures.

Ces mécanismes d'éclaboussures sont très complexes à décrire, et font l'objet de nombreuses questions ouvertes pour les physiciens [4]. Les études entreprises jusqu'ici par les phytopathologistes (spécialistes des maladies des plantes) et les ingénieurs agronomes [3] ont toujours analysé la dispersion de pathogènes comme une boîte noire, à l'échelle d'une averse sur une plante. Elles ont quantifié la probabilité qu'une plante voisine soit infectée, notamment en fonction de l'intensité de l'averse, définie comme le volume de pluie tombant sur une surface donnée en un certain temps. Les lois empiriques découlant de ces études ne sont malheureusement pas robustes, et elles ne peuvent être valablement utilisées comme prédictions. En effet, les subtiles interactions entre la pluie, les feuilles et les pathogènes ne peuvent pas se résumer à ce seul paramètre d'intensité [5].

Dans cette étude, nous avons ouvert cette boîte noire, pour comprendre physiquement comment une goutte de pluie impacte sur une feuille, et jusqu'où celle-ci est capable d'éjecter les pathogènes délogés.

## Des éclaboussures d'eau contaminée

Les impacts successifs de la pluie sur une même feuille peuvent laisser des perles d'eau (encadré 1), qui ont alors le temps de dissoudre le mucilage et de déloger les pathogènes. Que leur arrive-t-il ensuite ?

La caméra rapide sous le bras (encadré 2, p. 7), nous avons affronté l'averse pour filmer des impacts de pluie sur des plantes agricoles. Invariablement, des perles d'eau sont laissées sur les feuilles par les premiers impacts. Ces perles, potentiellement contaminées, sont ensuite expulsées et fragmentées dès qu'une autre goutte impacte à proximité, sur la même feuille [8]. Pour plus de confort, nous avons reproduit ce scénario en laboratoire, en concevant un modèle expérimental. Nous avons placé une perle de liquide coloré sur une feuille (le colorant représente ici la contamination), et nous avons lâché dans son voisinage une goutte d'eau pure, similaire aux plus

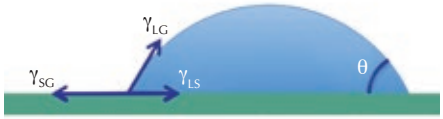
>>>

**Une goutte de pluie impactant sur une feuille** (à l'endroit désigné par la flèche dans la partie gauche de l'image) **peut éjecter de l'eau contaminée vers la plante voisine**. La partie droite de l'image correspond à une superposition d'instantanés capturés toutes les 5 millisecondes, où l'on voit apparaître les trajectoires balistiques des gouttelettes éjectées.

## Pourquoi l'eau forme-t-elle de petites perles sur les feuilles ?

encadré 1

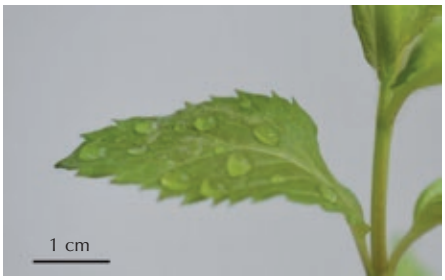
Chaque interface entre deux milieux (solide/liquide/gaz) a un coût énergétique proportionnel à son aire. Ainsi, la tension de surface de l'eau dans l'air, $\gamma = 0{,}072$ J/m$^2$, indique qu'il faut 0,072 joules pour former une interface de 1 m$^2$ entre l'eau liquide et l'air. Si ce coût nous semble dérisoire, il est nettement plus significatif (et donc influent) aux échelles submillimétriques, et il permet ainsi à certains insectes de marcher sur l'eau[(a)]. Lorsqu'une goutte d'eau est déposée sur une feuille, son énergie résulte des contributions des trois interfaces : liquide/solide $\gamma_{LS}$, liquide/gaz $\gamma_{LG}$ et solide/gaz $\gamma_{SG}$. Sur une surface dite parfaitement mouillante, l'énergie de l'interface solide/gaz est plus élevée que la somme des deux autres. Il est ainsi énergétiquement avantageux que l'eau s'étale de tout son long, sous forme d'un mince film liquide. Sur des surfaces moins mouillantes, le liquide prend plutôt la forme d'une perle. L'angle avec lequel l'interface liquide/air rejoint la surface solide, appelé angle de contact $\theta$, résulte de l'équilibre énergétique des trois interfaces (fig. E1) [6].




E1. Définition de l'angle de contact $\theta$. Les tensions de surface $\gamma_{SG}$, $\gamma_{LG}$ et $\gamma_{LS}$ qui sont des forces par unité de longueur (et donc des vecteurs), sont orientées tangentiellement aux interfaces.

L'expérience quotidienne nous apprend que les feuilles de plantes ne sont généralement pas très mouillantes, certaines étant même recouvertes de cire. Dans ces conditions, il est improbable que des films d'eau puissent se développer sur les feuilles, et les résidus d'eau prennent plus fréquemment la forme de perles [7]. En effet, nous avons mesuré les angles de contact sur une dizaine de plantes communes choisies au hasard : ils étaient systématiquement compris entre 40° et 130°.

Les perles de dimensions inférieures au millimètre sont des calottes sphériques. Les plus grosses sont davantage aplaties. Si les perles s'accumulent pendant une averse, ne peuvent-elles pas former une perle géante sur la feuille ? Non ! Les perles ont une taille maximale de quelques millimètres (fig. E2). En effet, à moins que la feuille ne soit parfaitement horizontale et infiniment rigide, les perles risquent toujours de la dévaler, victimes de leur propre poids. C'est à nouveau la tension de surface qui les en empêche : elle agit ici comme une force par unité de longueur qui équilibre le poids et maintient la perle en place. Une perle de rayon $R_1$ générera donc une force d'adhésion de l'ordre de $\gamma.R_1$, alors que le poids est de l'ordre de $\rho.g.R_1^3$ ($\rho$ est la masse volumique de l'eau). Ainsi, seules les perles de taille inférieure à environ $\lambda = (\gamma / \rho g)^{1/2}$ éviteront de glisser. Cette longueur caractéristique maximale $\lambda$, appelée longueur capillaire, est égale à 2,7 mm pour l'eau [6]. Voilà pourquoi il n'y a pas de perle d'eau de 4 cm !




E2. À la suite d'une averse simulée sur une feuille de menthe poivrée, l'eau résiduelle prend la forme de perles de quelques millimètres de diamètre au plus.

(a) Si l'insecte s'enfonçait dans l'eau, il diminuerait son énergie potentielle de gravitation en abaissant son centre de masse. Mais il augmenterait également l'énergie de surface en déformant l'interface eau/air lors de la pénétration de ses pattes hydrophobes. À l'échelle de l'insecte, l'énergie de surface domine le bilan énergétique. Ainsi, pour que l'énergie totale soit minimale, il faut que l'insecte ne s'enfonce quasiment pas.

**1. Interaction directe : une perle d'eau contaminée (colorée en rouge) sur une feuille de palmier Areca est fragmentée directement par l'impact d'une goutte de pluie juste à côté.** La première image est prise 2 ms avant impact. Les autres images sont prises à 2 ms, 4 ms, 7 ms et 11 ms après impact.

›››

grosses gouttes de pluie en taille et en vitesse (encadré 2). Nous avons enfin considéré plusieurs feuilles de plantes différentes, ainsi que des feuilles artificielles en plastique, de mouillabilité constante, à la géométrie et aux propriétés mécaniques (module de flexion) mieux contrôlées [9].

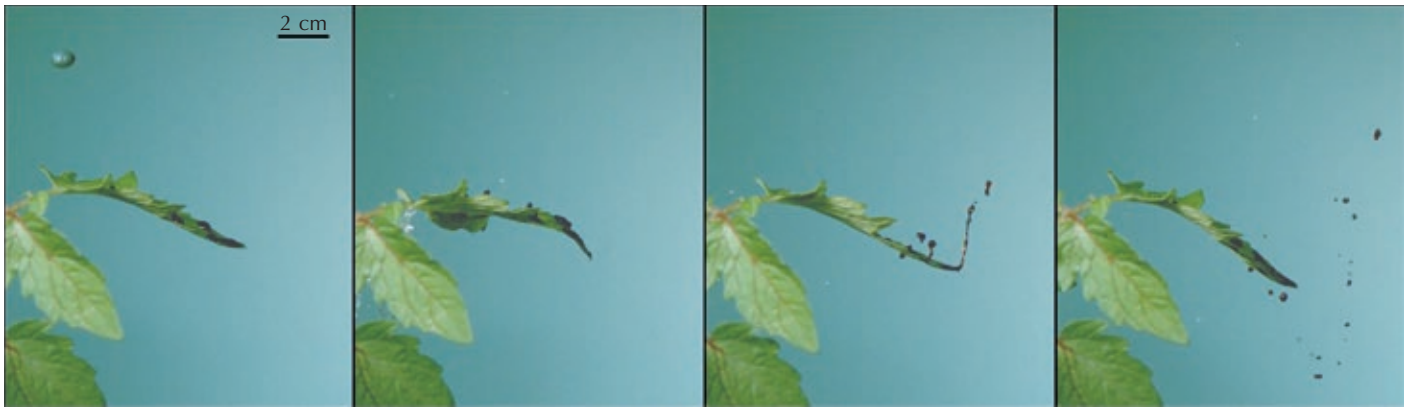
Une goutte qui impacte près d'une autre goutte sur une feuille qui peut se plier, cela représente beaucoup de paramètres physiques à considérer. Et malheureusement, dans les champs Dame Nature les varie quasiment tous en même temps. Les éclaboussures sont donc éjectées d'une multitude de façons. Seuls les scénarios d'éjection fréquents et efficaces ont retenu notre attention. On en distingue deux types : l'interaction directe, et l'interaction indirecte, *via* le feuillage.

Lors d'une interaction directe, la goutte de pluie impacte juste à côté de la perle, et la chasse en s'étalant (fig. 1). Percutée, la perle s'étire alors sous la forme d'une nappe liquide, qui se fragmente en petites gouttelettes éjectées à grande vitesse.

L'interaction indirecte se produit typiquement lorsque la goutte de pluie impacte trop loin de la perle pour la toucher (fig. 2). Si la feuille est suffisamment petite et flexible, elle fléchit en réponse à l'impact. La perle doit suivre ce mouvement, et subir les accélérations qui en résultent. Si ces dernières sont suffisantes, la perle peut se détacher de la feuille par inertie. Elle s'étire sous forme d'un filament qui finit par se fragmenter.

## Limite physique des éclaboussures

Jusqu'où peuvent aller les éclaboussures ? Pour déterminer cette limite, nous avons enregistré la vitesse u et le rayon r des gouttelettes éjectées lors des scénarios direct et indirect explicités ci-dessus. Nous avons considéré une dizaine de feuilles aux propriétés différentes (géométrie, masse, flexibilité). Nous avons systématiquement fait varier la distance entre le point d'impact de la goutte de pluie et la position initiale de la perle contaminée, cette dernière étant placée entre le point d'impact et le bord de la feuille. Les rayons de la perle ($R_1$ = 1,4 mm) et de la goutte de pluie ($R_0$ = 2,4 mm), ainsi que la vitesse de cette dernière quand elle impacte la feuille




**2. Interaction indirecte : une goutte de pluie impacte au bord d'une feuille de tomate ; à l'autre bout de cette feuille, une perle d'eau contaminée répond aux oscillations de la feuille en se fragmentant.** La première image est prise 5 ms avant impact. Les autres images sont prises à 10 ms, 30 ms, et 50 ms après impact.

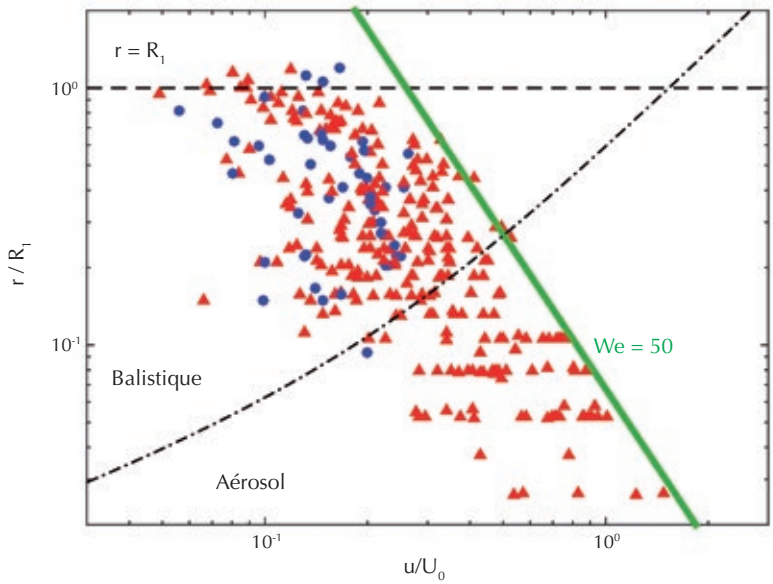
($U_0$ = 6 m/s) ont été maintenues constantes. La figure 3 illustre nos résultats, et prouve qu'il existe en effet une vitesse maximale d'éjection diminuant de façon inversement proportionnelle à la racine carrée de la taille des gouttelettes éjectées. Ainsi, cette borne correspond à un nombre de Weber de 50, défini cette fois sur la base de la taille et de la vitesse de la gouttelette éjectée : $We = (\rho\, u^2\, r)/\gamma$.

La figure 3 illustre également la distinction entre gouttelettes balistiques et aérosols, basée sur l'influence relative du poids ($\sim \rho\, g\, r^3$) et des frottements de l'air. Ces frottements comprennent une contribution due à l'inertie de l'air et une contribution due à sa viscosité. Le rapport de ces contributions est approximativement donné par le nombre de Reynolds $Re = 2\, \rho_a\, u\, r / \mu_a$, où $\mu_a$ et $\rho_a$ sont respectivement la viscosité dynamique et la densité de l'air. Ici, pour toutes les gouttelettes observées, le nombre de Reynolds est compris entre 5 et 100, et les frottements sont donc légèrement dominés par l'inertie de l'air. Il existe une loi empirique [10] dans ce régime de nombre de Reynolds, qui prédit une force de frottement égale à $\mu_a\, r\, u\, (1 + 0{,}15\, Re^{0{,}687})$. L'importance des frottements par rapport au poids est donc déterminée par le rapport sans dimension

$$\rho\, g\, r^2 / [\mu_a\, u\, (1 + 0{,}15\, Re^{0{,}687})].$$

Cette formule est utilisée pour estimer l'importance des frottements dans les données de la figure 3. Les plus grosses gouttelettes sont dites balistiques, car elles sont dominées par leur poids. Elles sont relativement insensibles aux frottements de l'air, et elles rejoignent donc les feuilles voisines en suivant des trajectoires presque paraboliques. Par opposition, les gouttelettes d'aérosol sont si petites que les frottements de l'air dominent leur trajectoire dès l'éjection. En atmosphère calme, ces gouttes sont freinées et elles ne se propagent pas au-delà de 20 cm. En revanche, la moindre brise peut les emporter. Leur taille inférieure à 200 µm leur permet de s'évaporer très vite en vol, jusqu'à ce qu'il ne reste que le résidu pathogénique. Les aérosols peuvent ainsi amener les pathogènes directement dans le champ voisin, voire bien au-delà. Par contre, le nombre de pathogènes arrivant sur une même plante risque d'être extrêmement faible, et il est peu probable que la plante n'arrive à s'en défendre. À ce sujet, les gouttelettes balistiques sont probablement plus dangereuses, car elles expédient un plus grand nombre de pathogènes au même endroit.

En connaissant la vitesse maximale d'éjection possible (correspondant à We = 50), on peut utiliser les lois de Newton pour calculer la distance maximale x que des gouttelettes de rayon r peuvent parcourir avant d'atterrir 50 cm plus bas, et ce en considérant les frottements de l'air. Pour des gouttes de 500 µm de rayon, cette distance atteint un maximum de plus de 70 cm ; de quoi transporter de nombreux pathogènes sur la plante voisine. Sur la figure 4, nous avons comparé cette prédiction à la distribution des éclaboussures collectées au sol après une centaine d'impacts sur une même feuille. Les gouttelettes ne se propagent pas au-delà de cette distance maximale prédite.




**3. Vitesse limite d'éjection des éclaboussures.** Rayon des gouttelettes éjectées r (normalisé par le rayon de la perle $R_1$) en fonction de leur vitesse d'éjection u (normalisée par la vitesse de la goutte de pluie $U_0$). (▲) : éjections directes. (●) : éjections indirectes. Toutes les expériences (différentes feuilles, différentes distances entre les deux gouttes initiales) sont représentées. La ligne en tiret-point correspond à la vitesse à laquelle les forces de frottement dans l'air sont de même intensité que le poids. La ligne verte épaisse représente la limite We = 50.

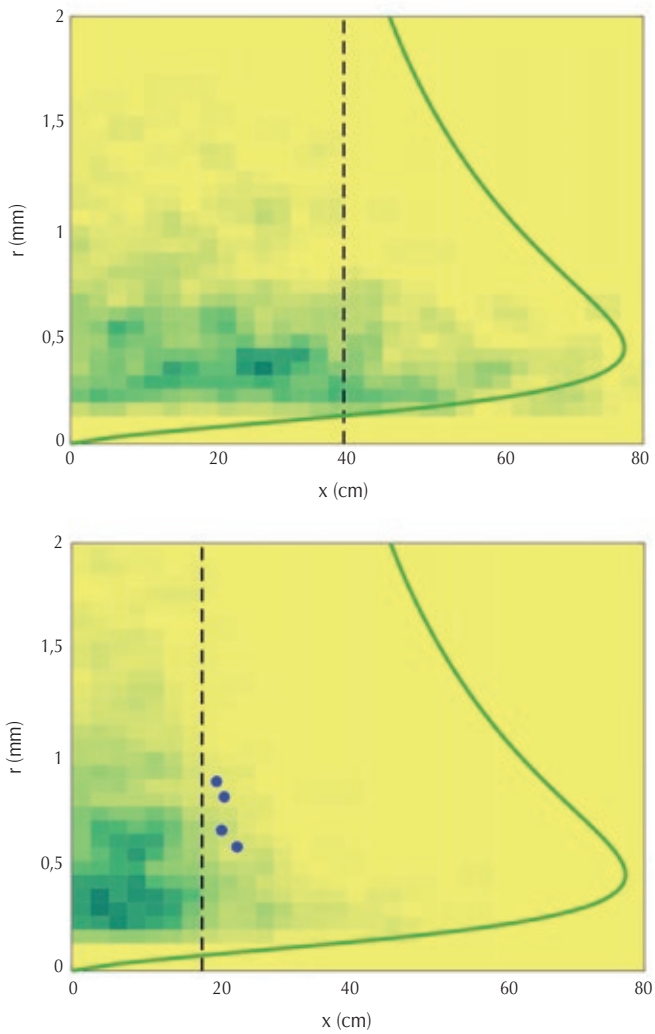
## Échelles caractéristiques d'un impact

encadré 2

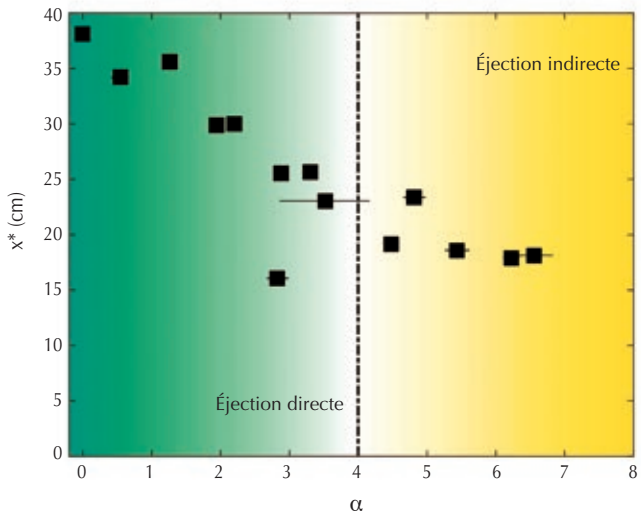
Lorsqu'une goutte de pluie de rayon $R_0$ et de vitesse $U_0$ s'écrase sur un substrat, son énergie cinétique est en partie transformée en énergie de surface [6]. Pour quantifier la force de l'impact, on définit le nombre sans dimension de Weber : $We_0 = (\rho\, U_0^2\, R_0 / \gamma)$. Il s'agit du rapport entre l'énergie cinétique ($\sim \rho\, U_0^2\, R_0^3$) et l'énergie de surface initiale ($\sim \gamma\, R_0^2$) de la goutte de pluie. Si ce nombre est beaucoup plus grand que l'unité, la goutte se déforme fortement et peut se fragmenter en de multiples gouttelettes. En supposant que N gouttelettes de même volume soient créées, leur surface totale est égale à la surface de la goutte initiale multipliée par $N^{1/3}$. Fragmenter une goutte crée donc de l'énergie de surface. Plus le nombre de Weber est grand, plus la goutte initiale peut s'offrir le coût énergétique de cette fragmentation avec son budget d'énergie cinétique initiale. Les plus grosses gouttes de pluie font environ 3 mm de rayon et elles atteignent le sol à 9 m/s, ce qui correspond à $We_0 \sim 3400$. Ces gouttes ont donc toutes les chances d'engendrer des éclaboussures.

Le nombre de Weber peut aussi se définir comme $We_0 = (U_0 / U_\gamma)^2$, où apparait alors une vitesse caractéristique liée à la tension de surface, la vitesse capillaire $U_\gamma = (\gamma / \rho\, R_0)^{1/2}$. Cette vitesse est caractéristique de l'évolution des nappes et filaments liquides lors de la fragmentation ; elle est ici de l'ordre de 0,15 m/s. Le temps caractéristique $R_0/U_\gamma$ de fragmentation à l'échelle de la goutte (3 mm) est donc environ 20 ms. Ceci explique pourquoi il est nécessaire de recourir aux caméras rapides (plusieurs milliers d'images par seconde) pour capturer ce phénomène.

>>>




**4. Distribution de probabilité de la distance parcourue par les gouttes éjectées depuis une feuille horizontale rigide (a) et depuis une feuille flexible (b).** Le niveau de vert représente la probabilité qu'une goutte éjectée de rayon r puisse se déposer à une distance x de la feuille, 50 cm plus bas. La ligne verte représente la limite hydrodynamique We = 50 discutée ci-dessus. Les points bleus sur la figure 4b représentent les gouttes éjectées indirectement qui se propagent le plus loin. Les lignes verticales en tirets représentent la distance x* que seul 10% du volume éjecté parvient à dépasser.




**5. Variation de la distance de propagation x*** (mesurée sur les diagrammes de la figure 4) **avec le paramètre α, pour une dizaine de feuilles différentes.** La région verte est dominée par l'éjection directe, et la jaune par l'éjection indirecte. La ligne en tiret-point représente le seuil d'apparition des éjections indirectes.

>>>

En revanche, sur les feuilles les plus à même de fléchir et d'osciller, elles n'atteignent pas la moitié de cette distance ! Dans ce cas, ce sont les gouttelettes éjectées indirectement qui vont le plus loin. Le mouvement des feuilles joue donc un rôle primordial sur les éclaboussures.

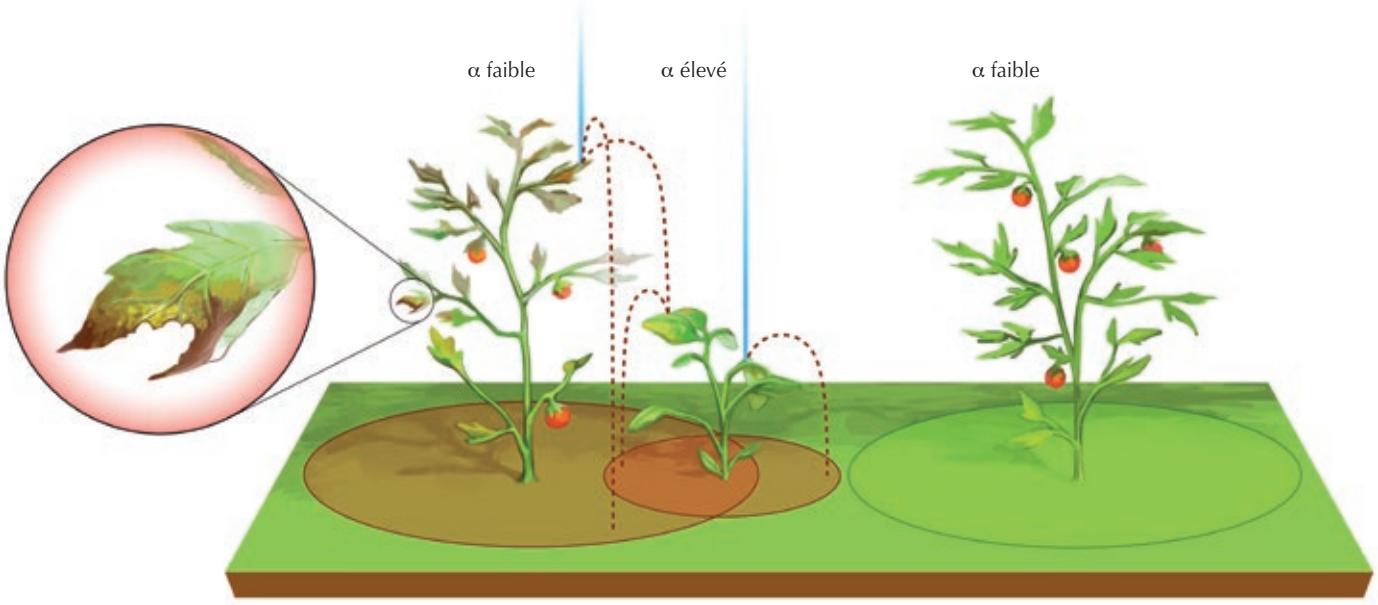
## Effets des mouvements de la feuille

Pour quantifier l'effet des mouvements de la feuille, nous définissons le paramètre sans dimension α comme le rapport entre la vitesse locale de la feuille (où se situe la perle) et la vitesse de fragmentation $U_\gamma$ basée sur le rayon $R_1$ de la perle (encadré 2). Cette vitesse de fragmentation est ici de l'ordre de 0,4 m/s, alors que la vitesse locale peut être estimée entre 0,2 et 2,9 m/s selon la feuille, sur la base d'un modèle mécanique de la feuille qui considère la conservation du moment angulaire lors du choc. Le paramètre α varie donc ici de 0,5 à 7. Les grandes valeurs de α correspondent à des feuilles petites et flexibles, qui bougent vigoureusement lors d'un impact.

L'effet de α sur les éclaboussures peut être quantifié par l'intermédiaire de la distance x★ au-delà de laquelle on observe moins de 10% du volume total éjecté. La figure 5 montre que cette distance décroît de plus d'un facteur 2 lorsque α augmente. Pour $\alpha < 4$, les éjections indirectes sont absentes, alors que l'éjection directe disperse les pathogènes très efficacement. En revanche, pour $\alpha > 4$, l'éjection directe perd fortement en vigueur alors que l'éjection indirecte, rendue possible, domine la dispersion.

## Perspectives

Les éclaboussures de la pluie sont donc responsables de la propagation des maladies foliaires, notamment en agriculture. Les lois physiques régissent ce mécanisme d'épidémie et en imposent les limites. De nombreux paramètres physiques ont un effet significatif qui doit être finement caractérisé. En particulier, nous avons ici montré que la géométrie et les propriétés mécaniques (flexibilité) des feuilles conditionnent fortement la dispersion des pathogènes [9]. La distance parcourue peut varier de 30 cm à près de 80 cm ! Pour un champ en monoculture intensive, où les plantes sont très peu espacées, cela fait plus que doubler la vitesse de propagation de l'épidémie de proche en proche.




**6. Un feuillage dont le paramètre α est élevé peut faire écran et empêcher le transport des pathogènes entre deux plantes de paramètre α plus faible.**

Ceci veut dire également que le risque épidémique est plus faible pour de jeunes plantes aux petites feuilles (α grand) que pour des plantes matures (α petit). Ce résultat pourrait être considéré dans le cadre d'une planification plus raisonnée des épandages de pesticides. De plus, si l'on peut mélanger les cultures, il est alors possible que des plantes dont le feuillage propage peu (α grand) soient utilisées comme écrans entre des plantes plus à risque (α faible), afin de confiner naturellement toute épidémie (fig. 6). Serait-ce en partie pour cette raison que la polyculture semble afficher une meilleure résistance aux maladies que la monoculture intensive ? [11] ▮

## Bibliographie


1• P.E. Hulme, "An Introduction to Plant Biosecurity: Past, Present and Future", Chapter 1 in *The handbook of Plant Biosecurity* (eds. G. Gordh et S. Mckirdy), pp. 1-27, Springer (2014).

2• "Rust in the bread basket", *The Economist*, 1er juillet 2010, pp. 4-7. (www.economist.com/node/16481593).

3• L. Huber, H.A. Mccartney et B.D.L. Fitt, "Environmental biophysics applied to the dispersal of fungal spores by rain-splash", Chapter 16 in *The epidemiology of plant diseases* (eds B.M. Cooke, D. Gareth-Jones et B. Kaye), pp. 417-444, Springer (2006).

4• E. Villermaux et B. Bossa, "Drop fragmentation on impact", *J. Fluid Mech.* **668** (2011) 412-435.

5• S. Saint-Jean *et al.*, *Agric. Forest Meteorol.* **141** (2006) 257-262.

6• P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart et D. Quéré, *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*, Belin (2002)

7• S. Vogel, *The life of a leaf*, University of Chicago Press (2012).

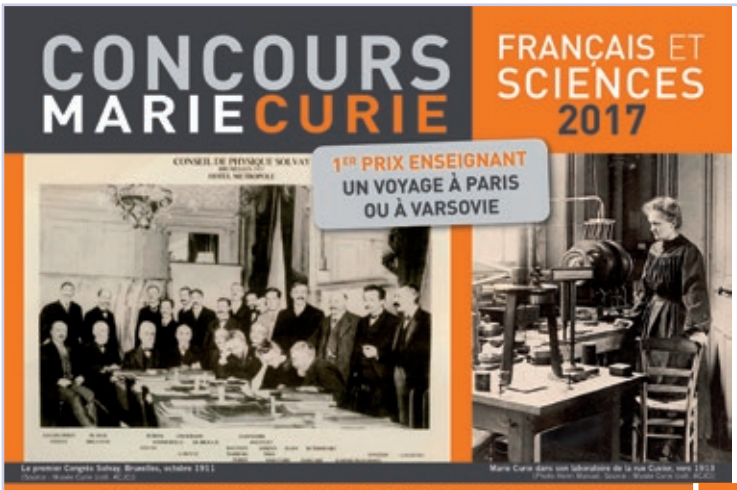
8• T. Gilet et L. Bourouiba, *Integr. Comp. Biol.* **54** (2014) 974.

9• T. Gilet et L. Bourouiba, "Fluid fragmentation shapes rain-induced foliar disease transmission", *J. R. Soc. Interface* **12** (2015) 20141092.

10• R. Clift, J.R. Grace et W.E. Weber, *Bubbles, drops and particles*, New York Academic (1978).

11• M.S. Wolfe, "Crop strength through diversity", *Nature* **406** (2000) 681-682.






« HOMMAGE EN FORME DE LETTRE A MARIE CURIE, LA FEMME SCIENTIFIQUE LA PLUS CÉLÈBRE DU MONDE ».

Ce concours international, doté au total de 50 prix, est ouvert aux enseignants de français et de sciences en français, ainsi qu'aux formateurs et médiateurs de langue française.

**Pour y participer, il faut rédiger une « lettre à Marie Curie », écrite en français, de trois pages maximum.**

La lettre et le bulletin d'inscription devront être adressés d'ici le **7 novembre 2017** par courriel à : **concours-cst.curie@sfr.fr .**

Le règlement complet, le formulaire d'inscription, et des informations supplémentaires incluant une aide, une méthode et des sources documentaires, peuvent être téléchargés sur le site :

**www.fipf.org/actualite/concours-marie-curie-francais-et-sciences-2017**

# Le neutrino au service de la géophysique

**Vincent Fischer*** (vfischer.physics@gmail.com) et **Thierry Lasserre**
Service de Physique des Particules, Irfu, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
* Adresse actuelle : Université de Californie à Davis (vfischer@ucdavis.edu)

La structure interne de la Terre cache encore de nombreux secrets que les géophysiciens tentent de percer.

Afin de pouvoir collecter des informations sur les couches les plus profondes du Globe les plus difficiles d'accès, un nouvel outil est maintenant au service de la géophysique : le neutrino. Cette particule est émise lors des désintégrations β d'éléments radioactifs, présents dans les couches terrestres et à l'origine d'une partie de la chaleur interne de la Terre.

La détection de ces neutrinos d'origine géologique, confirmée en 2015, peut permettre une compréhension plus détaillée du passé, du présent et du futur de notre planète.

## Le neutrino

Le neutrino est la particule élémentaire la plus abondante de l'Univers. Cependant, il n'interagit que très peu avec la matière et sa détection est un défi pour les physiciens. Son existence, proposée de façon purement théorique par Wolfgang Pauli en 1930, fut finalement expérimentalement avérée en 1956 par une équipe de chercheurs américains dirigée par Clyde Cowan et Frederick Reines. Pendant les soixante dernières années, les innovations dans les domaines de la technologie des détecteurs et de l'analyse des données ont permis la détection des neutrinos émis par de nombreuses sources telles que les réacteurs nucléaires, le Soleil, les accélérateurs de particules et bien d'autres, entraînant la découverte de nombre de leurs propriétés.

Il est désormais connu que le neutrino et son équivalent d'antimatière, l'antineutrino, sont présents dans la nature en trois types ou « saveurs », chacune associée à un lepton élémentaire (électron, muon et tau). L'une de leurs propriétés les plus remarquables est leur capacité à se transformer entre ces différentes saveurs lors du phénomène d'oscillation, qui est d'origine purement quantique. Par exemple, un neutrino émis en tant que neutrino électronique peut ainsi se transformer en neutrino muonique lors de sa propagation. La découverte de ce phénomène, qui met en évidence l'existence d'une masse non nulle pour les neutrinos, par les expériences Super-Kamiokande au Japon et SNO au Canada, a été récompensée en 2015 par le prix Nobel de physique [1].

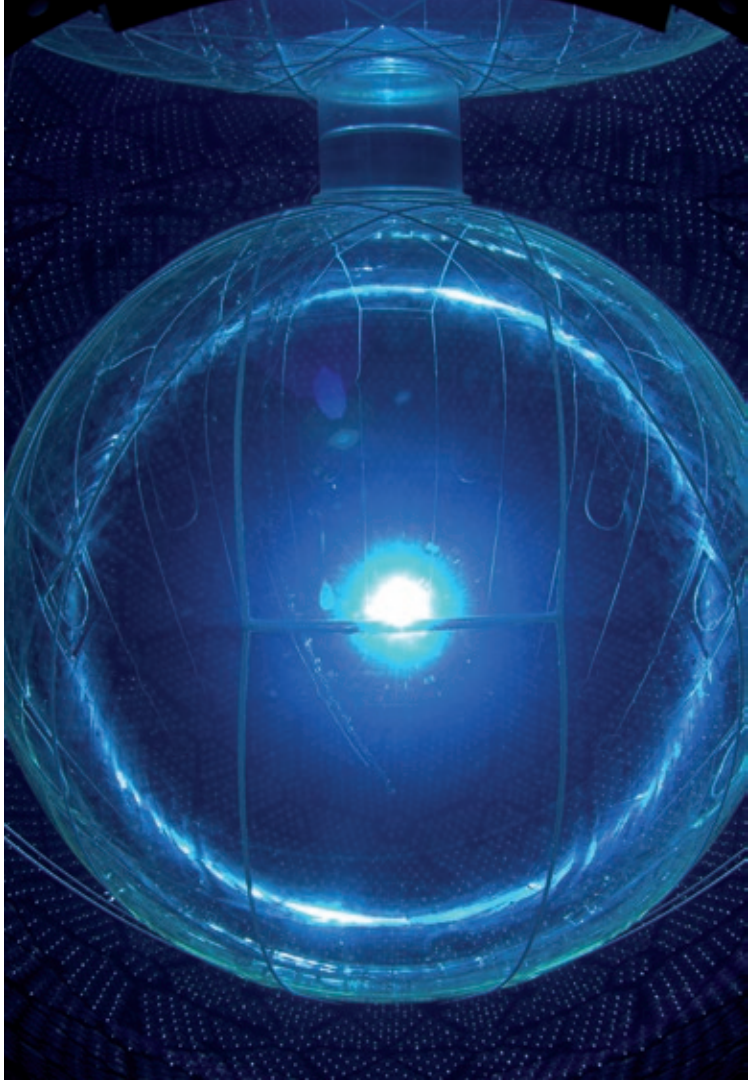
Alors que son application à la surveillance des réacteurs nucléaires a été récemment prouvée, le neutrino, ou plutôt l'antineutrino dans ce cas précis, devient un outil d'un intérêt particulier pour les sciences de la Terre. Les avancées expérimentales récentes dans la traque des antineutrinos résultant de la radioactivité bêta dans les chaînes de désintégrations de l'uranium, du thorium et du potassium 40 contenus dans la croûte et le manteau terrestre, promettent un avenir radieux à la détection de ces « géoneutrinos », désormais un des objectifs avérés des physiciens des particules et des géophysiciens, avec pour ultime but d'améliorer la compréhension des entrailles de notre planète.

## Terre et géoneutrinos

Le globe terrestre possède une structure en couches désormais bien caractérisée. La couche la plus externe, la croûte, d'une épaisseur d'environ 35 km sous les continents et 8 km sous les océans, entoure le manteau, qui se sépare en deux zones, supérieure et inférieure, la seconde s'étendant jusqu'à une profondeur de 2900 km, au contact du noyau terrestre.

La composition chimique de chacune de ces couches est globalement connue. Alors que celle des parties externes, la croûte et le manteau supérieur, est accessible respectivement par l'analyse des roches issues de forages ou de remontées de lave, la composition des couches internes peut être extrapolée à partir de l'étude de météorites, dites chondrites carbonées, dont l'époque de formation dans le système solaire est similaire à celle de la Terre. Ces informations ont permis aux géophysiciens et géochimistes de développer certains modèles de la Terre, dits BSE ("Bulk Silicate Earth" en anglais, soit « Terre silicatée »), décrivant les concentrations des couches terrestres en silicium, oxygène et fer, les trois éléments les plus abondants. Cependant, d'importantes incertitudes, allant (en valeur relative) jusqu'à plusieurs dizaines de pourcents, demeurent sur la concentration en éléments radioactifs, communément appelés radioéléments.

(a) Le flux de géoneutrinos émanant des désintégrations du potassium est plus intense d'un facteur 4 environ que celui provenant des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium ; mais, à cause de leur faible énergie (< 1,5 MeV), leur détection étant hors de portée des détecteurs en opération, ces géoneutrinos ne sont pas pris en compte dans les bilans actuels.



© Collaboration SNO+.

Photo de l'intérieur du détecteur souterrain de neutrinos SNO+ (Sudbury, Ontario, Canada), rempli d'eau ultra-pure.

Or, bien que leurs concentrations ne soient que de l'ordre de la partie par milliard, on estime qu'environ 50 % de la chaleur interne dégagée par la Terre est induite par les désintégrations radioactives passées et présentes de ces éléments ; l'autre moitié a pour origine les impacts de météorites à l'époque de la Terre primitive, ainsi que la contraction gravitationnelle. La dynamique interne de notre planète, dont dépendent la tectonique des plaques et le champ magnétique terrestre, est donc fortement affectée par la présence de ces radioéléments, dont les principaux sont des isotopes issus des désintégrations de l'uranium 238 ($^{238}$U) et du thorium 232 ($^{232}$Th), ainsi que le potassium 40 ($^{40}$K).

Bien que, par le biais de nombreux forages à la surface du globe, le flux de chaleur surfacique terrestre ait été évalué à 47 ± 2 terawatts (TW) [2], la fraction de ce flux provenant des désintégrations successives de ces trois radioéléments, appelée chaleur radiogénique, demeure mal connue. Les trois principaux groupes de modèles BSE, géochimique, cosmochimique et géodynamique, chacun proposant des concentrations différentes en radioéléments, ne sont pas en accord dans leurs prédictions, parfois au sein du même groupe, et anticipent respectivement 20 ± 4, 11 ± 2 et 33 ± 3 TW de quantités de chaleur radiogénique, dont 6,8 $^{+1,4}_{-1,1}$ dégagée par la croûte. Les radioéléments se concentrant de préférence dans les matériaux silicatés, leur présence dans le noyau terrestre est considérée comme négligeable. Par soustraction, le flux de chaleur dégagé par les radioéléments présents dans le manteau terrestre pourrait donc être compris dans une fourchette allant de 3 à 30 TW. D'où l'intérêt d'utiliser d'autres moyens que les forages pour obtenir une estimation plus précise de cette quantité, afin de trouver le modèle BSE représentant le plus fidèlement possible la mécanique interne de la Terre.

Les radioéléments possèdent la caractéristique d'être instables et de se désintégrer en émettant de nombreuses particules, dont des neutrinos. Il est utile de faire la distinction entre le potassium, qui émet directement des neutrinos par désintégration bêta, et l'uranium et le thorium, qui se désintègrent par radioactivité alpha, et dont certains descendants émettent des neutrinos par radioactivité bêta. Alors que les autres sous-produits de ces désintégrations, principalement des électrons, des particules alpha et des rayons gamma, interagissent fortement avec la matière et contribuent ainsi à la génération de chaleur radiogénique, ces élusifs « géoneutrinos » parviennent à s'échapper des couches terrestres sans y interagir. Cependant, au vu de la masse importante de radioéléments dans la croûte et le manteau terrestre et grâce aux progrès instrumentaux et dans l'analyse des données, la détection de ces géoneutrinos est devenue possible, fournissant ainsi une nouvelle technique pour pouvoir sonder dans sa globalité l'inaccessible manteau.

Alors que la mesure du flux absolu de géoneutrinos donne une indication de l'activité radioactive de notre planète et donc du flux de chaleur radiogénique, la compréhension du spectre en énergie de ces neutrinos permettrait d'isoler les contributions des différents radioéléments. En effet, les descendants de l'uranium 238 et du thorium 232, ainsi que le potassium 40, émettent chacun des géoneutrinos d'énergies différentes et dont le spectre peut être mesuré de façon relativement précise par les détecteurs actuels dans les deux premiers cas. La mesure absolue du flux total de géoneutrinos, quant à elle, dépend directement du nombre d'événements observés dans les détecteurs. Les modèles BSE prédisent un flux total de géoneutrinos provenant des désintégrations de l'uranium et du thorium d'environ 4 millions par centimètre carré et par seconde[(a)]. Bien qu'élevé en apparence, ce flux est très inférieur aux 66 milliards de neutrinos solaires qui traversent la même surface dans le même intervalle de temps, et dont seulement une poignée est détectée chaque jour dans les détecteurs les plus performants actuellement en opération.

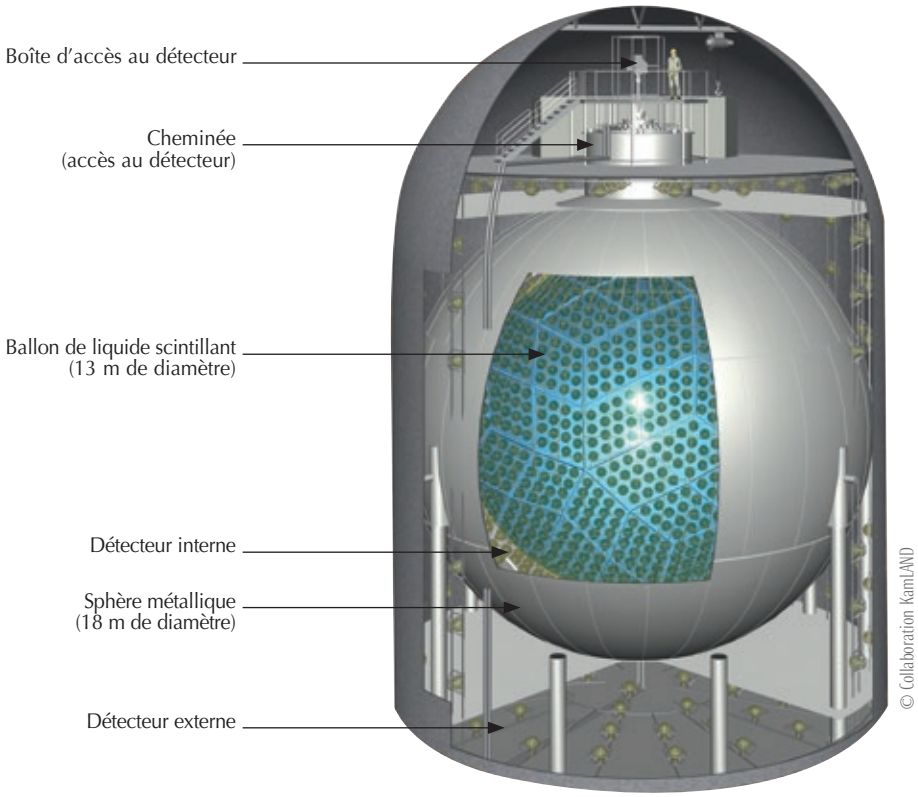
›››

## Techniques expérimentales

Les antineutrinos émis par les désintégrations successives du thorium et de l'uranium étant de saveur électronique, leur détection s'effectue principalement à travers la réaction dite « bêta inverse » avec un noyau d'un atome d'hydrogène ($\nu$ + proton $\rightarrow e^+$ + neutron). La section efficace, que l'on peut traduire par la probabilité d'occurrence, de cette réaction est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle des autres réactions de neutrinos aux mêmes énergies, ce qui en fait la plus prisée pour détecter des antineutrinos électroniques de basses énergies. Les détecteurs les plus sensibles à cette réaction, tel que KamLAND au Japon (fig. 1), sont dits « à liquide scintillant » et consistent le plus souvent en de grandes cuves remplies d'huiles minérales à base d'hydrocarbures, mélangées à des molécules aromatiques carbonées. Ces liquides organiques étant riches en noyaux d'hydrogène, ou protons libres, ils sont tout indiqués comme cibles de choix pour la réaction bêta inverse. Les produits de cette réaction, un positron et un neutron, vont déposer leur énergie dans le liquide qui, grâce à l'action des molécules aromatiques, va émettre de la lumière bleue et ultraviolette. Les deux impulsions lumineuses, corrélées en temps (de l'ordre de la centaine de microsecondes) et en distance (moins d'un mètre), et dont l'intensité est proportionnelle à l'énergie de la particule, sont finalement détectées par des photodétecteurs disposés sur les parois de la cuve.

À l'origine de nombreuses observations d'antineutrinos émis par des réacteurs nucléaires, des accélérateurs et même des explosions d'étoiles, cette méthode de détection a récemment permis aux physiciens de mettre en évidence le flux de géoneutrinos nous traversant à chaque instant. C'est ainsi qu'en juin 2015, l'expérience Borexino, dans le Laboratoire National du Gran Sasso en Italie centrale, fut la première à détecter des géoneutrinos avec une certitude de plus de cinq déviations standard, signe d'une découverte en physique des particules. Cette découverte est le fruit d'une traque de plus de quinze ans de la part des deux expériences parmi les plus sensibles au monde : KamLAND au Japon et Borexino.

De conceptions similaires, ces deux détecteurs à liquide scintillant se différencient par leurs tailles et les signaux parasites perturbant leurs mesures. Avec 1000 tonnes d'huile scintillante, le détecteur KamLAND est trois fois plus volumineux que Borexino, ce qui augmente significativement son taux de détection. Mais étant situé en plein milieu de l'archipel japonais, KamLAND fut, jusqu'en 2011, date de l'accident nucléaire de Fukushima et de l'arrêt de la production nucléaire au Japon, sujet à un important flux de neutrinos de réacteurs. Or, bien qu'à l'origine d'importantes découvertes en physique du neutrino, les neutrinos de réacteurs sont un bruit de fond pour la détection des géoneutrinos, car leur gamme d'énergie s'étend de 0 à 10 MeV et se confond donc en partie avec celle des géoneutrinos (de 0 à 3,3 MeV). D'où l'importance d'évaluer leur contribution avec précision, à défaut de ne pas pouvoir limiter leur nombre en se plaçant à l'écart des réacteurs nucléaires voisins. On notera que les neutrinos solaires ainsi que les neutrinos atmosphériques issus du rayonnement cosmique ne contribuent pas au bruit de fond pour la détection des géoneutrinos. En effet, les neutrinos solaires sont des neutrinos électroniques et non pas des antineutrinos électroniques, et ne peuvent pas interagir par désintégration bêta inverse. Les neutrinos atmosphériques, majoritairement de saveur muonique et donc également non sensibles à la désintégration bêta inverse, ont une énergie moyenne d'environ 1000 MeV, mille fois supérieure à celle des géoneutrinos.

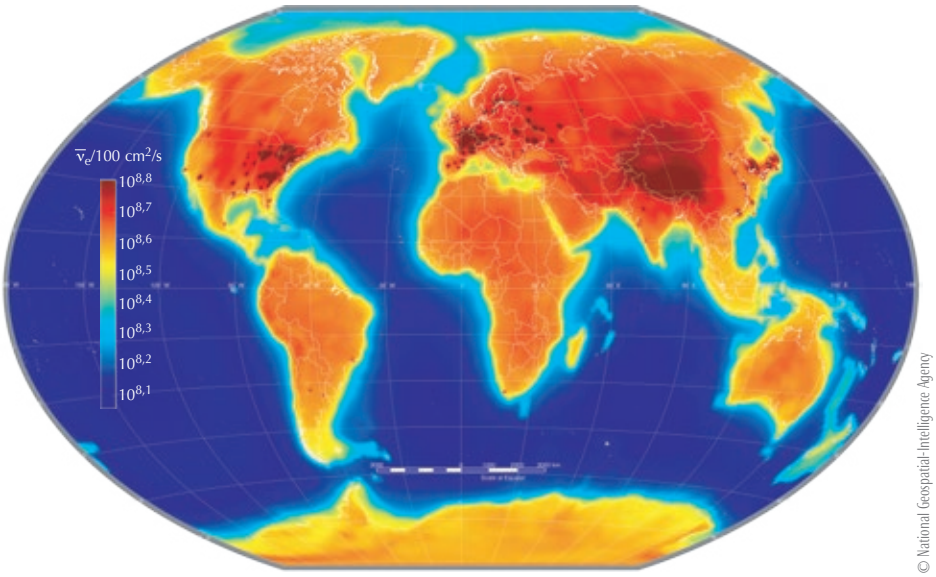



**1. Le détecteur KamLAND, situé dans la mine de Kamioka au Japon**. La partie la plus sensible du détecteur, le ballon de liquide scintillant, est protégée des événements parasites de bruit de fond extérieurs par les couches d'huile et d'eau qui l'entourent. Afin de pouvoir être sensible au minuscule flash de lumière émis par l'interaction d'un neutrino, chaque composant du détecteur doit être analysé et doit respecter des normes très strictes de compatibilité chimique, de radioactivité et de propreté. Le seul accès au détecteur s'effectue par le haut dans une boîte continuellement sous atmosphère protectrice d'azote. (www.kamland.stanford.edu/Pictures/Pictures.html)

## Résultats actuels

C'est donc en partie grâce à sa position géographique, située à plus de 500 km des réacteurs nucléaires de la vallée du Rhône, que le détecteur Borexino a rapporté en juin 2015 la détection de 24 candidats géoneutrinos après un temps de mesure d'environ 2000 jours [3]. La probabilité que ce résultat soit purement dû au hasard étant de 1 sur 300 millions, il s'agit donc d'une découverte, signant ainsi la fin de l'ère de recherche des géoneutrinos et le début de celle de leur utilisation pour la physique des particules et la géophysique. Ce résultat permet déjà d'obtenir des informations sur la chaleur émise par la

Terre en se basant sur des modèles géologiques existants, extrapolés à partir de mesures et de sondages. En supposant une masse totale de thorium quatre fois supérieure à celle de l'uranium, la chaleur totale émise par ces deux chaînes de désintégration serait comprise entre 11 et 52 TW. Si on estime que la masse totale de potassium est dix mille fois supérieure à celle de l'uranium, la chaleur radiogénique émise par ces trois radioéléments serait de $33\ ^{+28}_{-20}$ TW, un résultat en accord avec la valeur de 47 ± 2 TW citée plus tôt. Il est encore trop tôt pour émettre une hypothèse, même avec un niveau de confiance faible, sur le meilleur modèle BSE par rapport à un autre. La marge d'erreur sur les mesures étant directement liée aux nombres de géoneutrinos détectés, il est certain que des résultats de plus en plus précis seront annoncés prochainement.




© National Geospatial-Intelligence Agency

**2. Modélisation du flux d'antineutrinos à la surface du globe**. Seuls les antineutrinos de réacteurs et les géoneutrinos provenant des différentes couches terrestres sont pris en compte. L'échelle de couleur indique le nombre d'antineutrinos par 100 cm² et par seconde. Les points intenses (de couleur rouge foncé) observés en Europe, en Amérique du Nord et en Asie de l'Est représentent les réacteurs nucléaires en activité. www.nga.mil/MediaRoom/PressReleases/Pages/Antineutrino.aspx.

## Perspectives

Maintenant que leur existence est formellement établie, les géoneutrinos sont devenus un signal à part entière et leur détection est l'un des objectifs principaux de tous les gros détecteurs à liquide scintillant, en opération ou futurs. Alors que Borexino et KamLAND continuent à accumuler des données, le détecteur SNO+ au Canada (voir la photo de la p. 11) vient d'entrer en service et, grâce à son faible taux de bruit de fond et à sa forte taille (néanmoins légèrement inférieure à celle de KamLAND), apportera prochainement une troisième mesure du flux de géoneutrinos. Cette troisième mesure est très attendue par les géophysiciens, car elle permettra de mieux évaluer les concentrations en radioéléments de la croûte et du manteau à différents endroits du globe terrestre. En effet, la composition de la croûte n'est pas identique sur chaque plaque ni en chaque position de celle-ci, ce qui entraîne des disparités de flux de géoneutrinos observés (fig. 2).

Les détecteurs Borexino, KamLAND et SNO+ offriront aux physiciens trois mesures différentes, mais ils auront en commun le fait que les flux de géoneutrinos mesurés proviendront à la fois de la croûte et du manteau terrestres, sans possibilité de distinguer les deux. Or il sera crucial d'isoler la fraction de géoneutrinos venant du manteau afin de raffiner les modèles de la dynamique interne de notre Terre, une détermination difficilement atteignable par les moyens actuels tels que les sondages géologiques. En utilisant les résultats de récentes modélisations de la croûte proche du détecteur, les résultats de Borexino permettent de rejeter l'hypothèse que tous les géoneutrinos détectés proviennent de la croûte seule avec une certitude de 98%, malheureusement insuffisante pour être considérée officiellement comme une découverte.

Il faudra donc installer un détecteur près du plancher océanique et loin des côtes, afin de s'affranchir du signal de l'épaisse croûte continentale. Ce sera l'objectif de la prochaine génération de détecteurs de neutrinos à liquide scintillant.

Le projet HanoHano, un projet de détecteur sous-marin de plus de 10 000 tonnes, déployé au large de l'archipel d'Hawaï, a été proposé. Outre sa taille imposante, ce détecteur bénéficierait d'un des taux de bruit de fond les plus bas imaginables, grâce à son principe de déploiement qui lui permettrait d'être protégé du rayonnement cosmique par plusieurs kilomètres d'eau, mais également grâce à sa position géographique, éloignée de tout réacteur nucléaire. En plus d'être un détecteur polyvalent pour la physique du neutrino, HanoHano, installé sur la croûte océanique épaisse de seulement 8 km, serait donc tout particulièrement sensible aux géoneutrinos du manteau terrestre, contrairement aux autres détecteurs qui sont situés sur la croûte continentale, épaisse d'environ 35 km.

À plus courte échéance, le projet Jinping en Chine, d'une construction similaire aux trois détecteurs existants et d'une masse de 4000 tonnes, est en cours d'étude et pourrait voir le jour dans les années à venir, offrant une quatrième mesure du flux de géoneutrinos à un endroit où ce flux est dominé par la croûte continentale.

Imaginée dans les années 1960, la détection des géoneutrinos s'est concrétisée en juin 2015 et est maintenant en passe d'être utilisée pour contraindre les modèles de notre Terre [4, 5]. L'élusif neutrino va ainsi dans les années à venir être le maillon reliant deux domaines de la science autrefois distants, la physique des particules et la géophysique. ▮

## Références

1• S. Lavignac et M. Zito, *Reflets de la physique* n°**50** (2016) 4-9.

2• L. Ludhova et S. Zavatarelli, *Advances in High Energy Physics* **2013** (2013) ID 425693.

3• M. Agostini *et al.* (Borexino collaboration), *Phys. Rev. D* **92** (2015) 031101.

4• T. Lasserre, « L'exploration souterraine des cieux », *l'Astronomie* **121** (juillet-août 2007) 334-342.

5• T. Lasserre et P. Pajot, « L'intérieur de la Terre en direct », *La Recherche* **401** (octobre 2006) 50-53.

# À la recherche de l'ultime atome

## La dernière ligne du tableau de Mendeleïev est complétée. La physique des éléments superlourds aborde de nouveaux défis.

**Christelle Stodel**[1] (christelle.stodel@ganil.fr), **David Boilley**[1,2], **Julien Piot**[1] et **Dieter Ackermann**[1]
(1) GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), CNRS/IN2P3 et CEA/DRF, Bvd Henri Becquerel, 14076 Caen Cedex 5
(2) Université Caen-Normandie (UNICAEN), 14032 Caen Cedex 5

La dernière ligne du tableau périodique de Mendeleïev est maintenant complète et l'élément le plus lourd, l'oganesson, compte 118 protons. Il s'agit là de la limite atteinte avec les technologies actuelles, mais pas la limite d'existence des éléments chimiques.

Une nouvelle génération d'instruments est en construction pour aller plus loin et pour synthétiser en plus grand nombre les derniers éléments découverts, afin de pouvoir étudier leurs propriétés.

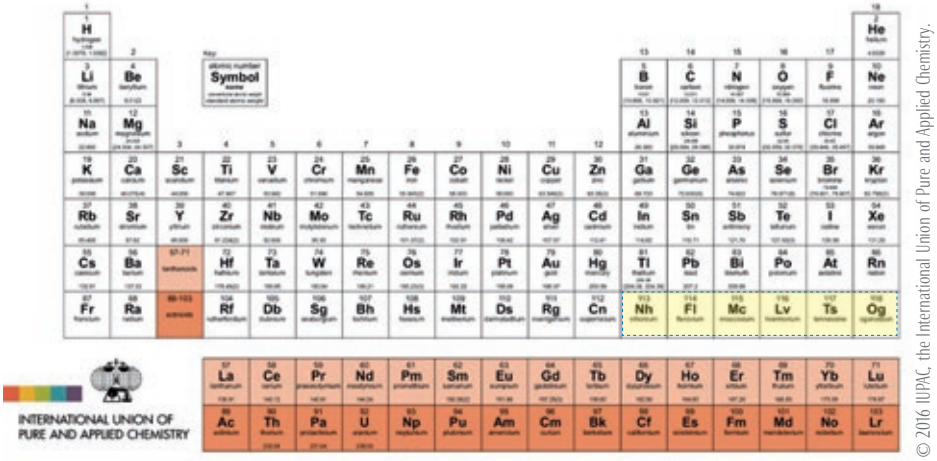
Nous remercions Jean-Charles Thomas pour sa relecture attentive.

### La limite d'existence des éléments chimiques

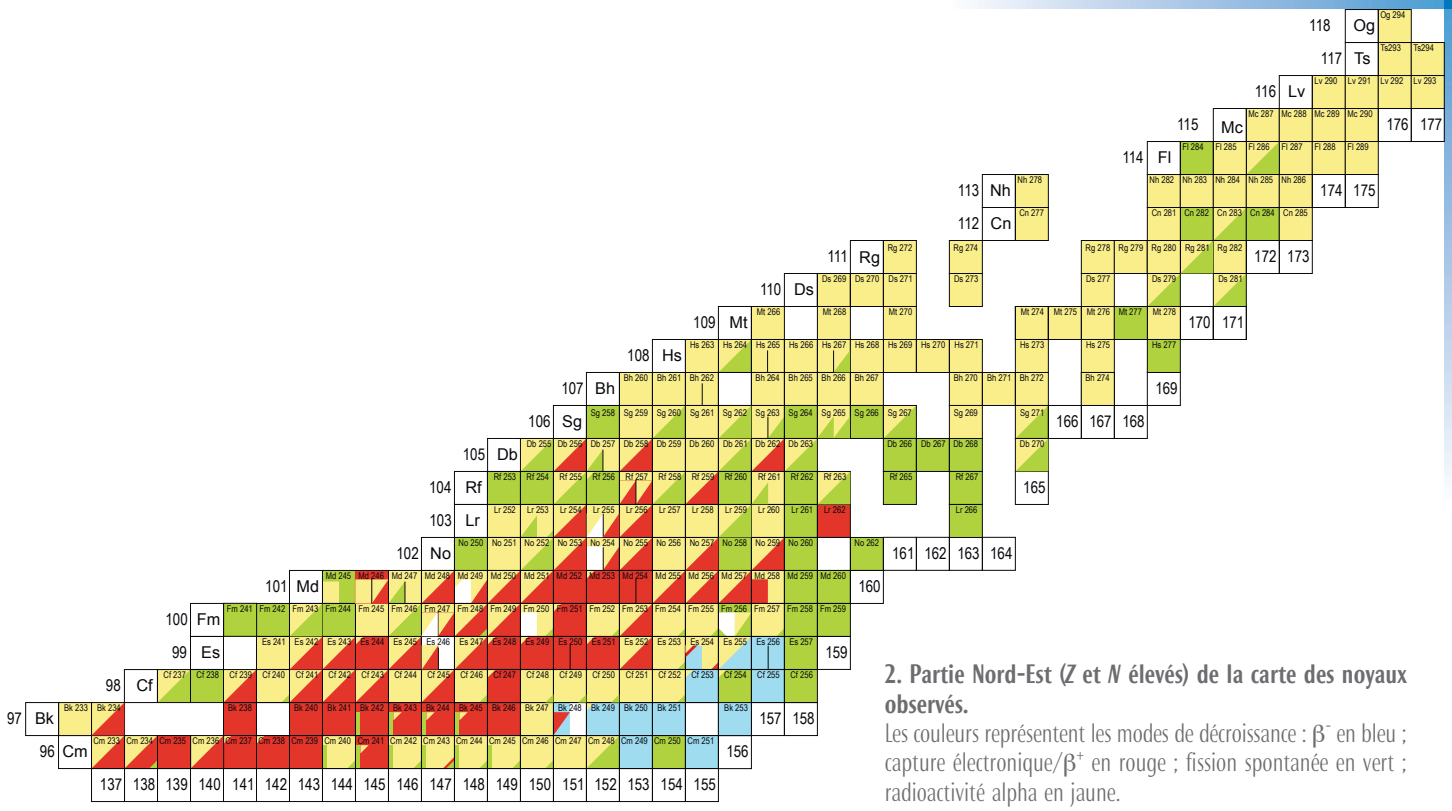
La dernière ligne du tableau périodique des éléments est maintenant remplie : les derniers entrants s'appellent nihonium[a] (Nh), moscovium[b] (Mc), tennessine[c] (Ts) et oganesson[d] (Og) et ont les numéros atomiques respectifs $Z$ = 113, 115, 117 et 118 [1] (fig. 1). Le tennessine est dans la colonne des halogènes qui ont une terminaison en -ine en anglais, et l'oganesson dans celle des gaz rares dont le nom se termine par -on, à l'exception de l'hélium. Il s'agit, bien évidemment, des éléments les plus lourds connus actuellement. Ils ont été formés lors d'une collision entre deux ions lourds et se sont rapidement désintégrés par émission radioactive alpha.

Les entrées précédentes, le flerovium (Fl, $Z$ = 114) et le livermorium (Lv, $Z$ = 116) datent de 2012. Il y a eu le copernicium (Cn, $Z$ = 112) en 2010. Y en aura-t-il d'autres dans un proche avenir ? La réponse est négative, car il n'y a plus de nouvel élément formé en attente de validation. Nous avons probablement atteint la limite de ce que l'on peut synthétiser avec les instruments actuels, mais pas la limite d'existence des éléments. Une nouvelle génération d'instruments est en construction pour aller plus loin et pour étudier plus en détail les derniers entrés dans la classification périodique, grâce à une plus grande statistique.

Du point de vue de la physique atomique, la limite d'existence des atomes a été évaluée à $Z$ = 172. Les modèles relativistes qui décrivent leur structure électronique en




**1. Version complète du tableau périodique des éléments chimiques,** validée par l'IUPAC en 2016. Les derniers éléments découverts (Z = 113 à 118) sont colorés en jaune..



**2. Partie Nord-Est (*Z* et *N* élevés) de la carte des noyaux observés.**
Les couleurs représentent les modes de décroissance : $\beta^-$ en bleu ; capture électronique/$\beta^+$ en rouge ; fission spontanée en vert ; radioactivité alpha en jaune.

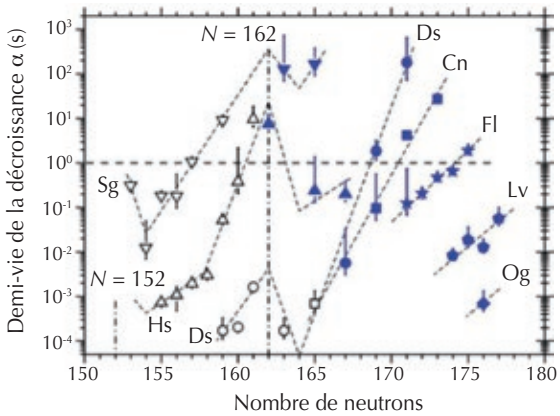
prenant en compte l'électrodynamique quantique (QED) montrent qu'au-delà les orbitales électroniques pénètrent dans le noyau et l'énergie de l'électron 1s devient négative. On en est loin, car le noyau correspondant n'existe pas et aucun modèle actuel ne prévoit son existence. C'est donc bien du côté du noyau atomique et de la physique nucléaire qu'il faut aller chercher la limite d'existence des éléments chimiques.

Comme les noyaux naturels les plus lourds, tous les noyaux artificiels sont radioactifs. Mais leur durée de vie doit être suffisamment longue (> $10^{-14}$ s) pour qu'ils puissent former des atomes, avec leur cortège électronique. Une autre limite d'existence vient de la fission spontanée. L'énergie de liaison qui maintient les nucléons ensemble, permet de quantifier la stabilité des noyaux : elle est assez bien décrite par le modèle dit de la goutte liquide. Face à la déformation du noyau, ce sont les termes dus à la répulsion coulombienne entre les protons et à la tension de surface, liée à l'interaction forte entre les nucléons, qui dominent. Quand on augmente la taille des noyaux, le terme de surface grandit moins vite que le terme coulombien et, au-delà de $Z = 100$, la barrière de potentiel qui empêche que le noyau se casse en deux spontanément (barrière de fission) disparaît. C'est ainsi que John A. Wheeler a proposé une première limite d'existence des noyaux et donc des éléments chimiques en 1955, sans pour autant donner un nombre de protons précis. Il introduit aussi le terme « noyaux superlourds ».

C'est toutefois sans compter les effets quantiques : à l'instar des électrons autour du noyau, les nucléons sont ordonnés en niveaux d'énergie discrets, également appelés couches. Dans le cas des électrons des atomes, les couches entièrement remplies correspondent aux gaz rares. De même, lorsque les protons ou les neutrons remplissent totalement leurs propres couches, les noyaux correspondants sont dits « magiques » (ou « doublement magiques » lorsque les couches sont entièrement remplies aussi bien par les protons que par les neutrons). Les noyaux correspondants sont plus stables. Le noyau doublement magique le plus lourd connu dans la nature est le plomb-208, avec 82 protons et 126 neutrons. Quels sont les noyaux magiques suivants ? Si les modèles s'accordent sur le fait qu'il devrait y avoir une zone de la carte des noyaux (fig. 2) avec un regain de stabilité significatif lié à la magicité, sa localisation n'est pas la même pour toutes les prévisions. Pour les neutrons, c'est $N = 184$ qui est généralement proposé, mais pour les protons, cela va de $Z = 114$ à $Z = 126$ suivant les modèles.

La demi-vie de certains isotopes superlourds atteint des dizaines de minutes (par exemple le $^{267}$Rf ($Z = 104$) avec une demi-vie de 1,1 h), soit 16 ordres de grandeur plus long que celui prédit sans la stabilisation due aux effets quantiques. Les demi-vies de décroissance alpha d'autres isotopes sont représentées sur la figure 3 en fonction du nombre de neutrons. Elles augmentent jusqu'à un maximum situé à $N = 162$, identifié comme un nombre

›››




**3. Demi-vies partielles des décroissances alpha des isotopes dont le nombre de protons est pair, à partir du seaborgium (*Z* = 106).**
D'après Yu.Ts. Oganessian *et al.* [2].

›››
magique en neutrons pour noyaux déformés. Ensuite, une nouvelle augmentation semble indiquer l'approche d'une prochaine couche fermée située au-delà de $N = 180$.

En physique nucléaire, le terme « noyaux superlourds » désigne les isotopes dont le nombre de charge est supérieure à $Z = 100$. Les chimistes, quant à eux, préfèrent adopter le terme « superlourd » pour les éléments à partir du rutherfordium ($Z = 104$) où la couche 5f électronique est complète.

## Nouveaux éléments, nouvelles questions

Les interrogations sur la matière sont très anciennes. La conception d'un objet insécable qui constituerait toute matière, l'atome, date au moins de l'époque antique (voir encadré 1). Compléter le tableau périodique de Mendeleïev est donc d'une grande importance, même si les éléments les plus récents ne survivent pas longtemps et que les trouver sur Terre est ainsi mission impossible. En revanche, ils pourraient apparaître lors d'évènements extrêmement violents dans l'Univers comme les supernovas ou lors de collisions entre étoiles à neutrons.

Une fois l'existence d'un nouvel élément vérifiée, il est tout aussi important d'étudier ses propriétés physiques et chimiques. Par exemple, les effets relativistes influent sur la structure atomique des éléments de la sixième ligne du tableau de Mendeleïev ($Z = 55$ à 86). Ils deviennent primordiaux pour ceux de la septième ligne ($Z = 87$ à 118) et donc pour les éléments superlourds. On peut alors se demander si le principe actuel de périodicité gouvernant les groupes et périodes du tableau de Mendeleïev sont toujours valides pour les derniers entrés.

Du côté du noyau, les nombres magiques ont tendance à s'effacer dans la région des superlourds, pour être remplacés par des zones magiques où plusieurs noyaux proches bénéficient d'un regain de stabilité lié aux effets quantiques. Alors que les noyaux « magiques » plus légers sont préférentiellement sphériques, des indices permettent de supposer que certains noyaux superlourds sont plutôt déformés, acquérant ainsi un surcroît de stabilité. On pourrait également expliquer leur relative stabilité par une configuration interne des nucléons en agrégats. Tout cela doit être vérifié expérimentalement.

## La synthèse des éléments superlourds

Si les premiers éléments transuraniens ont été formés par capture neutronique suivie de décroissances radioactives (voir encadré 2), les noyaux superlourds sont principalement synthétisés à l'aide de réactions nucléaires dites de fusion-évaporation. Pour cela, on envoie, grâce à un accélérateur, un noyau projectile sur une cible mince de matière. On choisit une énergie suffisante pour combattre la répulsion coulombienne qui est de l'ordre de 5-6 MeV par nucléon, soit une vitesse du projectile de l'ordre de 10% de la célérité de la lumière. Les réactions sont alors diverses : elles vont de la simple diffusion élastique sans modification des noyaux cible et projectile, ou diffusion Rutherford, à des réactions de fusion complète.

Dans ce dernier cas, le noyau composé ainsi formé est dans un état excité et a une énergie résiduelle, dite d'excitation, qui doit être évacuée. Par ailleurs, cette énergie d'excitation a tendance à laver les effets de couches qui confèrent aux noyaux superlourds un regain de stabilité. Le noyau se comporte alors comme une simple goutte liquide et aura majoritairement tendance à se séparer de nouveau en deux fragments, autrement dit fissionner. Ce processus, qui dure environ $10^{-21}$ s, est trop rapide pour qu'un cortège électronique ait le temps de se former autour du noyau éphémère afin d'obtenir un atome complet et donc prétendre avoir formé un nouvel élément chimique.

Toutefois, dans une très faible minorité des cas, le noyau composé va émettre un ou plusieurs neutrons qui emportent chacun une quantité définie d'énergie, jusqu'à ce que le noyau résiduel soit suffisamment « refroidi » pour pouvoir être stabilisé par les effets de couches quantiques. On qualifie ce processus de fusion-évaporation.

Décrire précisément la réaction reste un défi, car le mécanisme de formation diffère de celui observé pour des noyaux plus légers. La fusion est entravée, c'est-à-dire que la probabilité de fusion observée est bien plus faible que ce que pourraient prédire les modèles habituels. L'origine de ce phénomène est bien comprise : deux noyaux légers en contact vont fusionner automatiquement grâce à la tension de surface. Une forme en ∞ a une énergie de surface beaucoup plus élevée que celle d'un noyau composé sphérique. Mais pour les noyaux plus lourds, la répulsion coulombienne est telle que même au contact, les deux noyaux vont avoir tendance à se reséparer plutôt que de fusionner : on appelle ce processus la quasi-fission. Augmenter l'énergie de la collision afin d'avoir une impulsion suffisante pour fusionner n'est pas une option, car le noyau superlourd composé est extrêmement fragile. Pour accroître ses chances de survie, il est préférable que l'énergie résiduelle du noyau ainsi formé soit la plus faible possible. Ces deux tendances opposées expliquent

### Histoire de la notion d'élément chimique

encadré 1

Alors que l'hypothèse atomique, au sens indivisible, a été émise par Leucippe puis Démocrite, il s'agissait pour ces auteurs d'une spéculation philosophique plutôt que d'un résultat issu d'une démarche scientifique. L'idée fut contestée par leur contemporain Aristote dont la représentation du monde, basée sur quatre substances élémentaires (l'eau, l'air, la terre et le feu), a prévalu pendant plus de 2100 ans.

Au 17e siècle, la « science moderne » se développe avec des techniques de chimie et permet de ressortir des cartons le concept d'élément chimique introduit par Robert Boyle en 1664 ; suite à ses expériences sur les gaz, il l'avait défini par un « nombre limité de corps simples et primitifs ne pouvant être fabriqués par aucun autre corps ». À la fin du 18e siècle, Antoine-Laurent Lavoisier précise alors la définition de l'élément chimique par l'impossibilité de le décomposer à l'aide de moyens chimiques en substances plus simples. Ensuite, John Dalton, en 1808, introduit l'idée que le poids atomique est une caractéristique utile d'un élément chimique. Cela a motivé les chimistes à chercher des relations entre le poids atomique et les propriétés chimiques des éléments, et a ainsi conduit Dimitri Mendeleïev en 1869 à ordonner périodiquement les éléments et à prédire l'existence de certains.

Suite à la découverte des rayonnements X par Roentgen et aux travaux de H.G.J. Moseley en 1913, on a préféré caractériser un élément par sa charge atomique ou son numéro atomique Z plutôt que par son poids atomique.

## Historique de la découverte des transuraniens

encadré 2

L'uranium ($Z$ = 92) est le dernier élément chimique existant à l'état naturel sur Terre, sa demi-vie étant de l'ordre de grandeur de l'âge de cette dernière. Au-delà, les éléments sont formés artificiellement.

Dans les années 1940, les premiers éléments transuraniens ont été produits par décroissance $\beta^-$ d'isotopes riches en neutrons d'uranium puis de plutonium, créés par la capture successive de neutrons dans les réacteurs nucléaires (et plus tard dans les explosions nucléaires). Cependant cette méthode ne peut permettre d'accéder aux éléments au-delà du fermium ($Z$ = 100), car la décroissance alpha ou la fission spontanée deviennent prépondérants. La production d'éléments plus lourds n'est possible que par des réactions de fusion-évaporation complète. De 1944 à 1974, les éléments du curium ($Z$ = 96) au seaborgium ($Z$ = 106) furent ainsi produits par irradiation de cibles d'actinides avec des projectiles légers appropriés, disponibles et faciles à accélérer.

Cependant, l'énergie d'excitation de plusieurs dizaines de MeV du noyau composé formé par ces réactions favorise la fission et limite la formation des noyaux superlourds.

En 1974, Yuri Oganessian et ses collaborateurs ont expérimenté la fusion à partir de noyaux fortement liés (plus que les actinides) de $^{208}$Pb et $^{209}$Bi avec les projectiles adaptés ; cette réaction de fusion froide permet au noyau composé d'être faiblement excité et ainsi de se « refroidir » par l'évaporation de seulement un ou deux neutrons. Cette stratégie a permis à l'équipe de Dubna en Russie de produire un nouvel isotope du seaborgium en 1974 et à l'équipe SHIP de GSI, à Darmstadt en Allemagne, de poursuivre la synthèse des éléments $Z$ = 107 à 112 de 1981 à 1996. Néanmoins, la probabilité de fusion de deux noyaux diminue fortement en fonction de la charge totale du noyau composé. L'équipe de RIKEN à Wakô au Japon a relevé le défi en poursuivant patiemment ces réactions de fusion froide avec la technique parfaitement établie et a synthétisé l'élément 113 (3 événements en 550 jours de faisceau entre 2004 et 2012).

Dans les années 2000, l'équipe russe a développé des faisceaux intenses de $^{48}$Ca (noyau naturel doublement magique avec 20 protons et 28 neutrons) permettant également d'obtenir une énergie d'excitation du noyau composé suffisamment basse pour assurer sa survie, tout en utilisant des cibles d'actinides. Grâce à cette combinaison riche en neutrons, on se rapproche de l'îlot de stabilité prédit, où les noyaux ont une haute barrière de fission leur conférant une plus grande probabilité de survie. C'est ainsi que l'équipe de Dubna a synthétisé les éléments $Z$ = 114 à 118.

les très faibles sections efficaces – ou proportions de réactions gagnantes – pour les réactions de fusion-évaporation.

Dans la pratique, deux approches ont été mises en œuvre : la « fusion froide », qui correspond à la fusion suivie par l'évaporation d'un voire deux neutrons, et la « fusion chaude » où plusieurs neutrons sont émis par le noyau composé avant de former un élément superlourd. Dans le premier cas on privilégie la probabilité de survie, et dans le deuxième celle de fusion.

D'un point de vue expérimental, comme dans toute expérience de physique nucléaire, il faut réussir à séparer les évènements d'intérêt, excessivement rares dans le cas des superlourds, des autres voies de réaction. On utilise pour cela un séparateur qui dévie les noyaux sans intérêt à l'aide d'un agencement de dipôles magnétiques et électriques qui sélectionnent les produits de réaction en fonction de leur masse, de leur vitesse ou de leur charge électrique. Les noyaux ainsi sélectionnés sont arrêtés dans un détecteur à semi-conducteur silicium permettant l'identification des noyaux formés par la mesure de leur énergie cinétique et de leur décroissance radioactive.

De fait, les sections efficaces les plus faibles atteintes actuellement sont de l'ordre de quelques dizaines de femtobarns[(e)]. Dans le cas du nihonium ($Z$ = 113), synthétisé par fusion froide, ce sont trois noyaux du même isotope qui ont été identifiés en 550 jours pendant lesquels un faisceau d'ions bombardait continuellement une cible de matière ! Comme la section efficace décroît avec la charge du noyau composé, il est actuellement impossible d'aller au-delà avec le même instrument. Pour les éléments formés par fusion chaude, c'est le calcium-48 (noyau doublement magique en protons ($Z$ = 20) et en neutrons ($N$ = 28)) qui est projeté contre une cible d'actinides, avec une section efficace plus élevée. Dans le cas de l'oganesson, le plus lourd des noyaux nouvellement créés, la cible est du californium-249 ($Z$ = 98) de façon à obtenir la charge $Z$ = 118. Mais, pour aller au-delà avec le calcium-48, il n'est plus possible techniquement de fabriquer des cibles en quantité suffisante.

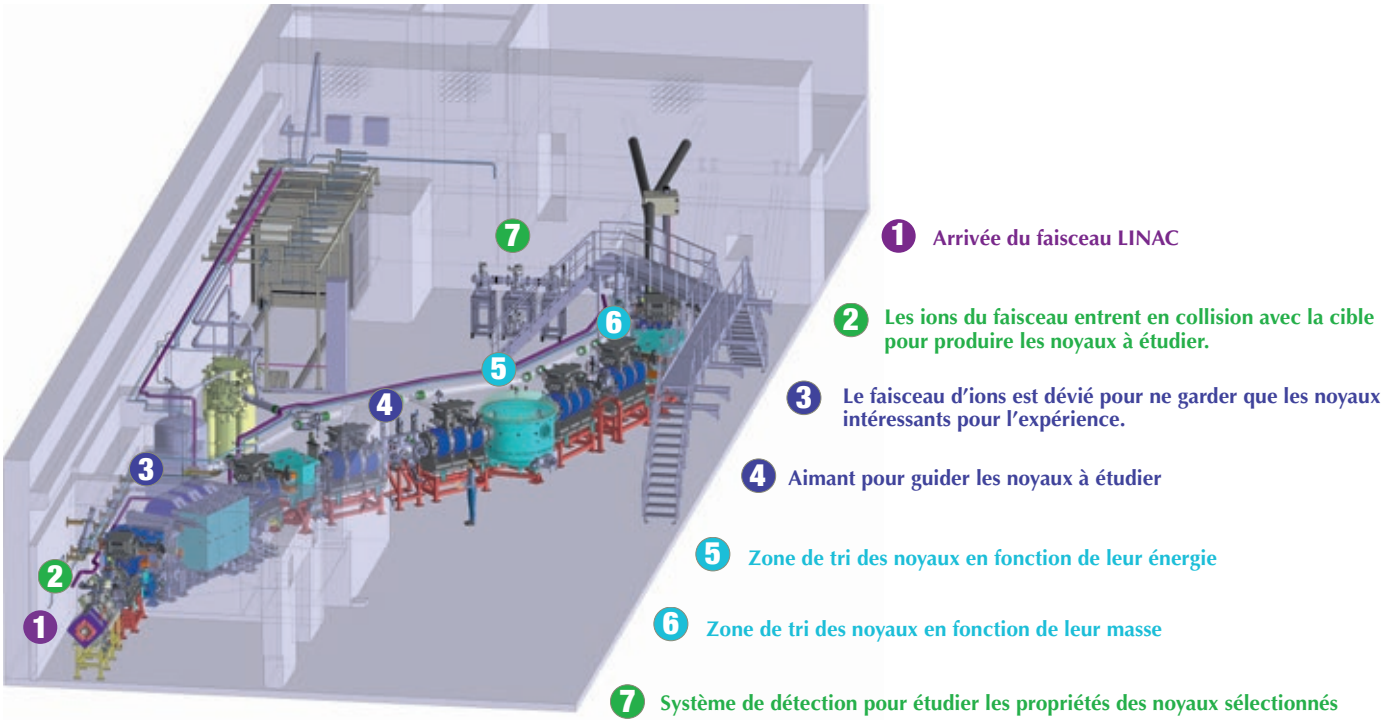
## Identification des nouveaux éléments

Pour pouvoir entrer dans le tableau périodique, les nouveaux éléments doivent être identifiés sans ambiguïté. Les noyaux les plus lourds ont été identifiés grâce à leurs chaînes de décroissance alpha. Quand cette chaîne de désintégration aboutit à une région connue de la charte des noyaux, il n'y a pas d'ambiguïté : il suffit alors de suivre la décroissance alpha sur plusieurs générations jusqu'à atteindre un noyau dont l'énergie de la particule émise est connue. Il faut ensuite remonter la chaîne jusqu'au noyau le plus lourd. Il arrive toutefois que la chaîne de décroissance du noyau produit ne soit connectée à aucun noyau connu. Dans ce cas, il faut utiliser d'autres méthodes pour compléter l'identification.

Dans la pratique, les particules chargées (résidus d'évaporation et particules alpha) sont identifiées par des détecteurs à semi-conducteur de silicium qui mesurent l'énergie et la position d'arrêt du noyau produit grâce à des pistes verticales d'un côté et horizontales de l'autre. Seules les particules alpha détectées aux mêmes coordonnées que le point d'implantation du noyau formé sont prises en compte car leur parcours dans la matière est très court, de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. On peut alors suivre les transformations successives du noyau produit en sélectionnant les décroissances radioactives qui ont été observées aux mêmes coordonnées et dans un intervalle de temps raisonnable. Le détecteur de silicium est entouré d'autres détecteurs qui permettent de mesurer l'émission d'électrons ou de rayons gamma et X. Une fois que le noyau est identifié, on peut procéder à une corrélation temporelle entre le temps d'arrivée du noyau et la détection des autres particules afin de reconstruire, chronologiquement, sa désexcitation et sa décroissance radioactive.

Quand les éléments superlourds sont produits en quantité suffisante, une identification avec des techniques de radiochimie peut être effectuée sur des atomes individuels

›››




**4. Schéma du spectromètre $S^3$ (Super Séparateur Spectromètre) auprès de Spiral2.** Un équipement d'excellence pour l'étude des noyaux très lourds et superlourds.

>>>

sur des temps très courts. Pour ce faire, le noyau est guidé en sortie du spectromètre par un jet de gaz porteur tel que l'hélium, vers des dispositifs de séparation chimique où le noyau est thermalisé et peut être oxydé en mélangeant le gaz avec du dioxygène. Les techniques de séparation chimique employées sont soit en phase gazeuse (thermochromatographie ou chromatographie isothermale), soit en phase liquide. La technique de thermochromatographie consiste à disposer une série de détecteurs soumis à un gradient de température. L'élément transporté par le flux gazeux est absorbé sur un détecteur à une température spécifique qui caractérisera sa volatilité. Dans la méthode isothermale, l'élément est transporté dans une colonne de température constante, au bout de laquelle il sera identifié. En mesurant, pour plusieurs températures, le temps de rétention dans la colonne et le taux en sortie, on a accès à l'enthalpie d'adsorption. Ces mesures permettent de confirmer l'analogie chimique avec les autres éléments de la même colonne du tableau de Mendeleïev.

Depuis 1985, la reconnaissance de la paternité d'un nouvel élément est la mission d'un groupe de travail (TWG = Transfermium Working Group) composé de chimistes et de physiciens internationaux mandatés par les fédérations IUPAC et IUPAP (International Union of Pure and Applied Chemistry/Physics). Le critère retenu par le comité de découverte d'un élément chimique est la démonstration expérimentale, au-delà du doute raisonnable, de l'existence d'un noyau avec un numéro atomique $Z$ non identifié auparavant, survivant au moins $10^{-14}$ s. Cela correspond au temps nécessaire à un noyau pour acquérir ses électrons extérieurs afin d'obtenir un « élément » avec des propriétés chimiques caractéristiques. Il n'est pas nécessaire de déterminer la valeur exacte de $Z$, seulement de prouver qu'elle est différente de toutes celles observées précédemment. Également, il n'est pas requis de connaître la valeur exacte du nombre de masse $A$. Le groupe de travail reconnaît que le terme « doute raisonnable » est vague : dans les faits, le comité préfère attendre la confirmation des résultats proclamés par leur reproductibilité, de préférence dans un autre laboratoire et/ou avec une technique différente. Cette requête n'est pas exigée lorsque les données sont de grande qualité et sont redondantes, ou lorsque les circonstances ne permettent pas une répétition de l'expérience dans des conditions raisonnables, comme pour le nihonium.

## Dans l'avenir

Les principaux défis pour l'avenir sont de pouvoir augmenter la statistique des évènements afin d'aller au-delà de l'oganesson ($Z$ = 118), et de produire les éléments connus en plus grand nombre afin de pouvoir étudier leurs propriétés. Partout, cela se fait en essayant de gagner en efficacité à chaque étape, de l'intensité du faisceau en amont de la cible à la séparation et à l'identification.

C'est sur ces exigences qu'a été conçu le super-spectromètre-séparateur $S^3$ qui, couplé avec Spiral2, le futur accélérateur linéaire du GANIL, ouvrira de nouvelles opportunités de recherche sur des évènements rares dans différents domaines de la physique (fig. 4). Le programme expérimental de cette installation inclut, en particulier, l'étude des noyaux lourds et superlourds, des états fondamentaux et isomériques de noyaux légers produits par des réactions de fusion et/ou transfert de nucléons, ainsi que la spectroscopie des noyaux proches de la *drip line* (limite d'existence des noyaux). Le dispositif $S^3$ comprend deux étages : le premier sépare les produits de réactions du faisceau primaire suivant la valeur de leur rigidité magnétique, et le second purifie le faisceau secondaire et sélectionne en masse les noyaux.

Cependant, l'exploitation de faisceaux d'ions lourds plus intenses que ceux disponibles actuellement soulève de nombreux défis technologiques. On utilise déjà des cibles tournantes pour répartir l'énergie du faisceau incident et éviter leur surchauffe. Dans l'avenir, elles devront être encore plus robustes. Le spectromètre multiétage impose également l'utilisation de technologies de pointe, comme des aimants supraconducteurs.

En attendant la mise en service du spectromètre $S^3$ dans les années à venir, la communauté française poursuit des collaborations sur cette thématique auprès d'autres accélérateurs (Dubna en Russie ou Jyväskylä en Finlande). Au GANIL, les dernières expériences effectuées sur les éléments superlourds ont utilisé la spectrométrie gamma afin d'obtenir des informations sur la structure du dubnium ($Z$ = 105).

(a) En référence à Nihon, nom japonais du Japon, l'élément $Z$ = 113 étant le premier découvert sur le continent asiatique.

(b) Région dans laquelle a été synthétisé l'élément $Z$ = 115 (le dubnium $Z$ = 105 faisait déjà référence à la ville de Dubna où est situé le laboratoire).

(c) Pour remercier l'équipe du laboratoire d'Oak Ridge au Tennessee d'avoir fourni la cible de berkélium bombardée avec le faisceau de calcium, formant l'élément $Z$ = 117.

(d) En l'honneur du professeur Yuri Oganessian, pionnier dans les recherches des éléments superlourds.

(e) Unité de section efficace :
1 femtobarn = $10^{-15}$ barn = $10^{-15} \times 10^{-24}$ cm$^2$ ; soit une chance d'observer un noyau sur $10^{21}$ projectiles.

## Références


1• Communiqués de l'IUPAC
- du 30 décembre 2015
https://iupac.org/discovery-and-assignment-of-elements-with-atomic-numbers-113-115-117-and-118/,
- du 8 juin 2016
https://iupac.org/iupac-is-naming-the-four-new-elements-nihonium-moscovium-tennessine-and-oganesson/
- du 30 novembre 2016
https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/.

2• Yu. Ts. Oganessian *et al.*, *Nuclear Physics A* **944** (2015) 62-98.


**Pour en savoir plus,**
on peut consulter les actes du Symposium Nobel 160 : "Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements", *EPJ Web of Conferences*, Volume **131** (2016) : www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2016/26/contents/contents.html .

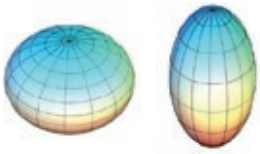
# Des formes en compétition dans les isotopes de krypton très riches en neutrons

*Extrait des actualités scientifiques du CNRS/IN2P3 et du CEA/Irfu du 14 juin 2017*

Une étude réalisée au RIKEN au Japon par une collaboration internationale menée par des chercheurs de l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO, CNRS/Université Paris-Sud), du CEA/Irfu et du RIKEN a permis de réaliser la première spectroscopie des isotopes très riches en neutrons $^{98}$Kr et $^{100}$Kr [1]. Cette étude est un pas décisif vers la compréhension des limites de cette région de transition de phase quantique.

### Délimiter et caractériser une région de transition de forme nucléaire

La répartition des nucléons au sein d'un noyau dépend directement de l'interaction nucléaire forte, responsable de sa stabilité. Cette interaction donne naissance à des phénomènes quantiques, parfois soudains, tel qu'un réarrangement spatial complet des nucléons lorsque l'on passe de 59 à 60 neutrons pour les isotopes de zirconium (Z=40) et de strontium (Z=38). Jusqu'ici, la chaîne des isotopes de krypton (Z=36), étudiée jusqu'au $^{96}$Kr avec 60 neutrons, ne montrait pas cette transition de forme brutale. En déterminant pour la première fois l'énergie des premiers états excités des isotopes $^{98}$Kr et $^{100}$Kr, l'expérience effectuée au RIKEN a montré une déformation plus progressive du noyau lorsqu'on passe de 60 à 62 et 64 neutrons. De plus, l'expérience a mis en évidence que deux configurations nucléaires sont en compétition à basse énergie dans $^{98}$Kr. Des modèles théoriques relient la présence de ces états à la coexistence de deux formes ellipsoïdales différentes, aplatie et allongée (fig. 1).



1. Illustration des formes coexistantes calculées pour le noyau de $^{98}$Kr (calculs : CEA DAM – Bruyères-le-Châtel).

### Des instruments, une cible et un accélérateur à la limite des savoir-faire actuels

Pour accéder à ces résultats, il a été nécessaire de produire des noyaux très riches en neutrons auprès de l'installation Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) du centre de recherche Nishina du RIKEN. À cet effet, environ 150 milliards de noyaux d'uranium 238 par seconde ont été accélérés à 60% de la vitesse de la lumière pour entrer en collision avec une cible de béryllium. Les produits de fission de l'uranium créés lors de cette collision sont ensuite triés en vol par un spectromètre magnétique, puis envoyés sur une cible secondaire cryogénique d'hydrogène liquide pour synthétiser les noyaux d'intérêt par arrachage d'un proton.

Ces réactions particulières sont identifiées par la mesure de deux protons dans la chambre à projection temporelle entourant la cible d'hydrogène liquide du projet ERC MINOS, conçu par le CEA-Irfu, et la sélection magnétique du noyau d'intérêt. Enfin, la désexcitation électromagnétique quasi-instantanée de ces états excités est détectée par le spectromètre DALI2 composé de 186 scintillateurs. La combinaison de ces techniques instrumentales de pointe est cruciale pour étudier ces noyaux jusqu'ici inaccessibles.

## Référence


[1] F. Flavigny *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 242501.


Contacts


**Freddy Flavigny** (flavigny@ipno.in2p3.fr)
**Alexandre Obertelli** (alexandre.obertelli@cea.fr)

# Le point sur les exoplanètes
## Une diversité inattendue

**Anne-Marie Lagrange** (anne-marie.lagrange@univ-grenoble-alpes.fr)
Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, Université Grenoble Alpes, BP 40700, 38058 Grenoble Cedex 9

Les exoplanètes[a] sont devenues en trente ans un sujet majeur d'étude en astronomie.
Les observations ont révélé une diversité importante et inattendue dans les systèmes exoplanétaires, signe d'une grande diversité dans leurs processus de formation et d'évolution.

L'étude des exoplanètes ne fait que commencer et des instruments de plus en plus spécialisés sont en cours de réalisation ou de conception, afin de progresser dans ce domaine au cours des décennies à venir.

On présente dans cet article les principales méthodes de détection, les résultats majeurs obtenus, les conséquences sur notre compréhension de la formation des planètes et de leur évolution précoce, ainsi que les projets futurs dans ce domaine.

### La détection des exoplanètes

La recherche des systèmes planétaires extrasolaires n'est devenue envisageable que récemment, même si la question de l'existence d'autres mondes est très ancienne. Le désir d'exploration et l'imagination étaient bien présents, mais les moyens techniques n'étaient pas suffisants pour permettre de découvrir des planètes extrasolaires. L'observation directe, moyen le plus naturel qui soit, est restée longtemps impossible à cause du fort contraste de luminosité et de la très faible séparation angulaire entre l'étoile et la planète. En effet, ce contraste, dans le domaine optique, est, par exemple, de plusieurs milliards entre le Soleil et la Terre, et de plusieurs dizaines de millions entre le Soleil et Jupiter. Par ailleurs, vue d'une étoile du voisinage solaire située à 10 parsecs[b], la Terre ne serait séparée que de 0,1 seconde d'angle du Soleil, et Jupiter que de 0,5 seconde. C'est pourquoi les astronomes se sont tournés dès les années 1980 vers des techniques indirectes, visant à détecter et caractériser des variations de certains signaux des étoiles entourées de planètes.

Les variations peuvent concerner :

- la position des étoiles (mesure du mouvement d'oscillation dans le plan du ciel du photo-centre de l'étoile par rapport au centre de gravité étoile-planète, méthode astrométrique) ;
- leur vitesse radiale (mesure des variations de vitesse projetée de l'étoile sur la ligne de visée entre l'observateur et l'étoile, qu'on détermine par effet Doppler sur certaines raies du spectre de l'étoile) ;
- leur luminosité.

Les deux premières méthodes reposent sur l'application des lois de Kepler[c]. Si aucune exoplanète n'a encore été découverte en astrométrie, le satellite GAIA de l'Agence Spatiale Européenne devrait permettre dans les années à venir de détecter plusieurs milliers d'exoplanètes géantes par cette méthode. La méthode des vitesses radiales (fig. 1) a permis les premières détections dans les années 1990 [1] ; à ce jour, on compte plusieurs centaines de planètes détectées et caractérisées par cette méthode. La troisième méthode vise à mesurer des baisses régulières de flux stellaire dues au passage d'une planète sur la ligne de visée. Cette « méthode de transit » a connu son apogée récemment, grâce aux observations depuis l'espace, avec notamment le satellite Corot du CNES, lancé en 2006, et le satellite Kepler de la NASA, lancé en 2009. Ce dernier a révélé plus de 2000 exoplanètes.

Les méthodes des vitesses radiales et des transits ont permis de trouver des planètes d'abord géantes, puis au fur et à mesure des progrès techniques ou dans le traitement des données, des planètes plus petites, jusqu'à atteindre des planètes de masses ou de rayons à peine plus grands que celle/celui de la Terre. Ces méthodes permettent de détecter des exoplanètes plutôt proches de leur étoile. En effet, les détections et caractérisations nécessitent de suivre les variations de vitesses radiales ou photométriques sur des périodes de temps au moins égales à la période orbitale de la planète (un an pour la Terre autour du Soleil et douze ans pour Jupiter). Plus spécifiquement, la méthode des vitesses radiales permet de mesurer la quantité M.sin(i) où i représente l'inclinaison du plan orbital de la planète par rapport à la ligne de visée, et d'en déduire une limite inférieure de sa masse M, alors que la méthode des transits permet de mesurer le rayon des planètes (déduit de la surface de l'étoile occultée au cours du transit), mais pas sa masse.

›››

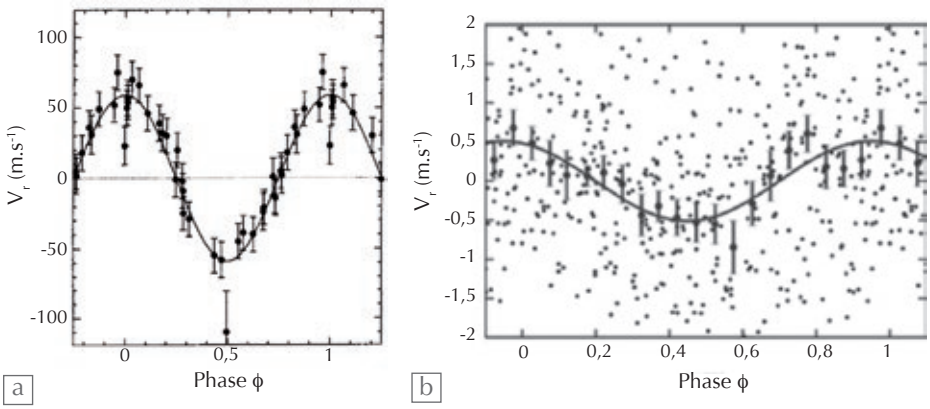
© ESO/M. Kornmesser

**Impression d'artiste de la surface de la planète Proxima Centauri b**, en orbite autour de la naine rouge Proxima Centauri, l'étoile la plus proche du système solaire. L'étoile double Alpha Centauri AB (indiquée par une flèche) apparait aussi sur l'image. Proxima b est un peu plus massive que la Terre et se situe dans la zone « habitable » autour de Proxima Centauri, où la température est compatible avec l'existence d'eau liquide à la surface.

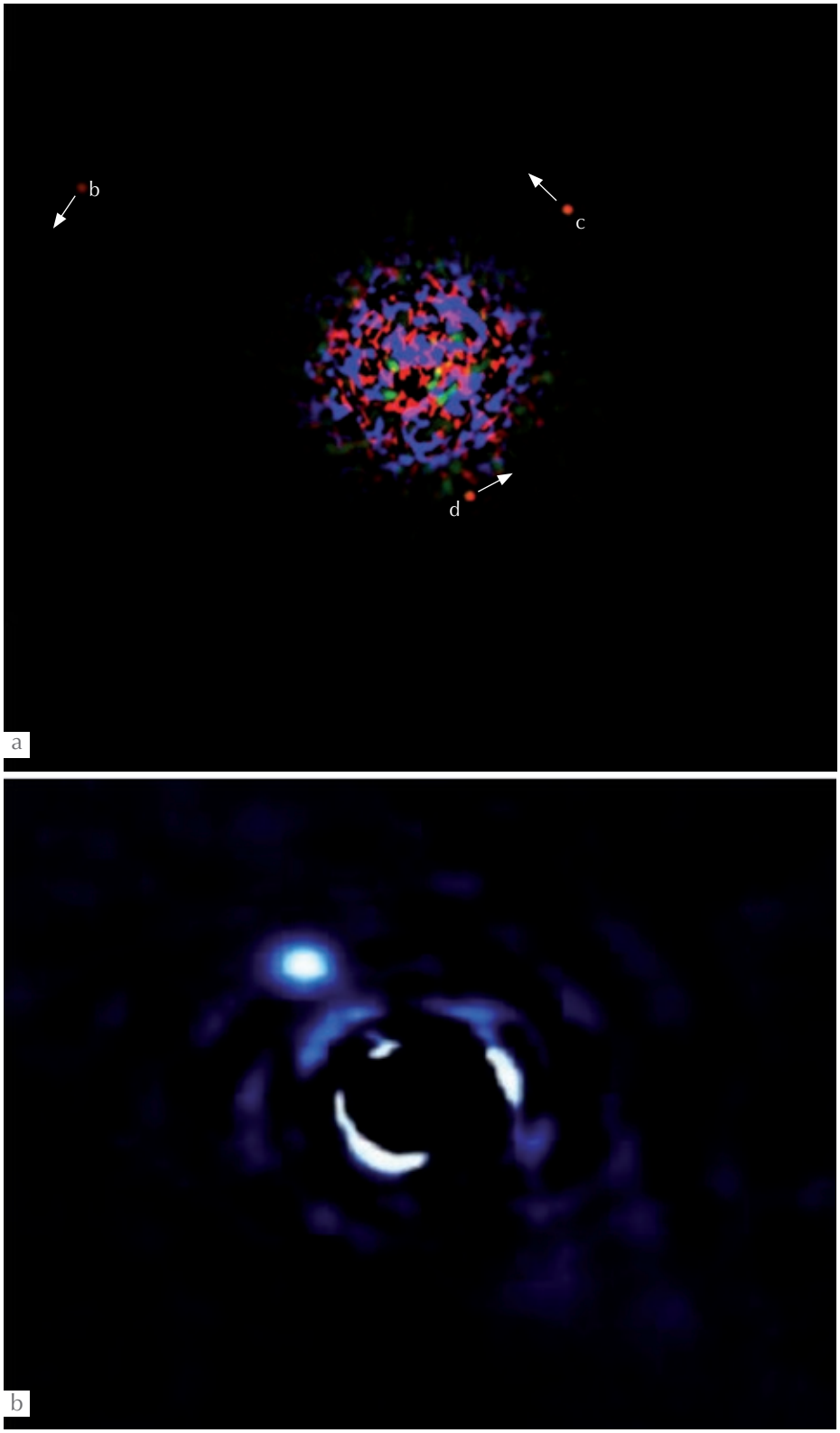
On notera enfin l'existence d'autres méthodes de détection indirecte, comme celle des lentilles gravitationnelles [3] qui permet de détecter et caractériser les exoplanètes une fois, mais ne donne pas la possibilité de les réobserver, et la méthode, très spécifique, dite de chronométrage des pulsars.

Le lecteur intéressé par les techniques de détection peut se reporter aux références données page 24.

L'imagerie directe est, *a priori*, bien plus adaptée que les méthodes indirectes pour détecter des planètes plus éloignées de leur étoile. Elle nécessite l'utilisation (i) de télescopes de grand diamètre (un miroir primaire de diamètre D donnant un pouvoir de résolution égal à 1,22 $\lambda/D$ à la longueur d'onde $\lambda$) ; (ii) depuis le sol, des dispositifs d'optique adaptative permettant de corriger en temps réel des effets de la turbulence atmosphérique[(d)] ; et (iii) de coronographes, dispositifs optiques permettant d'occulter la plus grande partie de la lumière de l'étoile afin de détecter le




**1. Deux détections d'exoplanètes, séparées de 20 ans, obtenues par la méthode des vitesses radiales.**
(a) 51 Peg b, de 0,47 fois la masse de Jupiter et sur une orbite circulaire de rayon 0,052 unités astronomiques (ua)[(b)], détectée en 1995 dans la constellation de Pégase (Mayor et Queloz [1]).
(b) Proxima Cen b, de 1,3 fois la masse de la Terre et de demi grand-axe orbital 0,05 ua, détectée en 2016 (Anglada-Escude *et al.*, [2]).
Les vitesses radiales $V_r$ sont données ici en fonction de la phase $\phi$ de la révolution de la planète, chaque point représentant une mesure. Les ajustements par des orbitales kepleriennes sont indiqués en traits pleins. On notera les différences d'amplitude des ajustements orbitaux : de l'ordre de 50 m/s pour la planète géante 51 Peg b, et de l'ordre de 10 cm/s pour la planète de petite masse Proxima Cen b. On notera également la dispersion des points de mesure dans le cas de Proxima Cen b. 51 Peg b tourne autour d'une étoile semblable au Soleil, tandis que Proxima Cen b tourne autour d'une étoile plus froide (naine rouge), Proxima Centauri, qui est l'étoile la plus proche (1,3 pc) du système solaire.




**2. Exemples d'images directes d'exoplanètes.**
(a) Image de la découverte du système planétaire autour de l'étoile HR8799, située à 39 pc du Soleil (Marois *et al.* [4]).
(b) Image de la planète Beta Pictoris b, dont l'étoile est située à 19 pc du Soleil (Lagrange *et al.*, [5]).
Dans ces images, le Nord est vers le haut et l'Est vers la gauche. Les séparations des planètes b, c et d autour de HR8799 sont d'environ 68, 42 et 27 ua ; la distance de Beta Pictoris b de son étoile est de 9 ua. Noter que les étoiles elles-mêmes ne sont pas visibles, car elles sont soit occultées par un masque coronographique, soit éliminées au cours du traitement d'image effectué pour faire « ressortir » les exoplanètes. Seuls des résidus de réduction sont visibles au centre des images.

›››

faible signal de la planète. Avec les systèmes d'optique adaptative développés depuis les années 2000 et installés sur des télescopes au sol de la classe des dix mètres de diamètre, les premières images d'exoplanètes ont été obtenues (fig. 2).

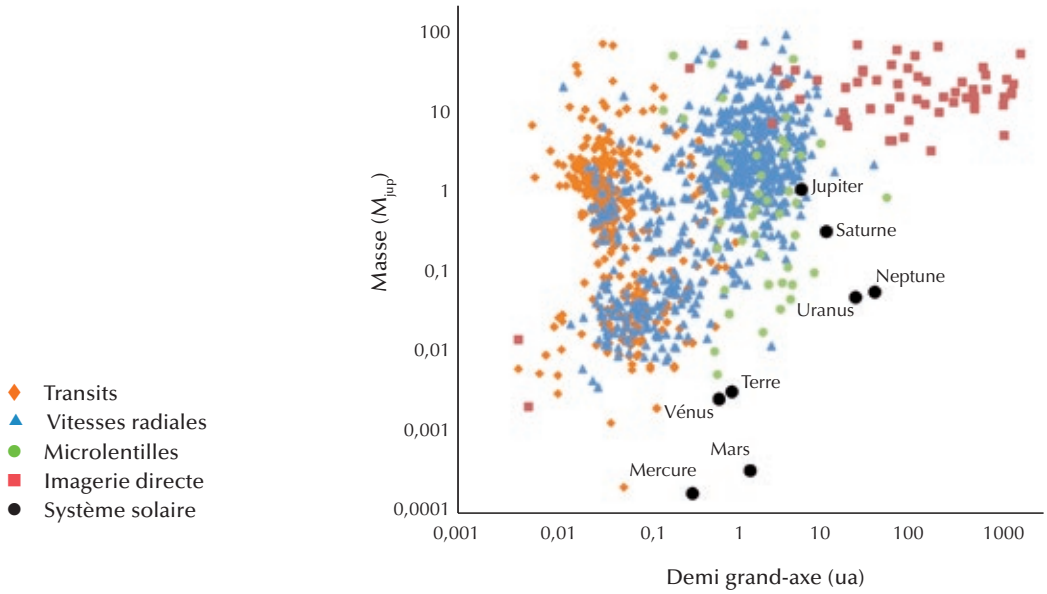
De nouveaux instruments dédiés à la détection des exoplanètes, plus sophistiqués, comprenant des systèmes d'optique adaptative extrême, couplés à de meilleurs coronographes, ont été mis en service très récemment au Chili, sur les télescopes de huit mètres de diamètre du Very Large Telescope de l'Observatoire Européen Austral (ESO), d'une part, et de l'observatoire GEMINI Sud de l'AURA (Association of Universities for Research in Astronomy), d'autre part. Offrant des contrastes d'environ $10^{-6}$ à 0,3 seconde d'angle, ils devraient permettre de faire l'image de quelques dizaines de planètes jeunes en orbite à quelques unités astronomiques d'étoiles du voisinage solaire.

Deux observations, séparées de quelques mois seulement, sont suffisantes pour identifier une planète. (Caractériser complètement ses propriétés orbitales nécessite bien sûr un suivi beaucoup plus long, de l'ordre de la période orbitale de la planète.) Il convient enfin de noter que la masse et la température effective de la planète ne sont pas directement mesurées ; elles sont estimées en utilisant des relations masse-brillance, ou par comparaison entre des spectres observés et des spectres synthétiques dérivés de modèles atmosphériques qui, jusqu'à présent, manquent de calibrateurs. Pour les planètes jeunes (âgées de quelques millions ou de quelques dizaines de millions d'années)[(e)] actuellement accessibles à l'imagerie, température et masses dépendent de manière cruciale de leur âge, un paramètre particulièrement difficile à estimer de manière précise.

## Le bestiaire des exoplanètes

Les astronomes ont coutume de représenter les détections des exoplanètes dans un diagramme représentant leur masse en fonction du demi grand-axe de leur orbite elliptique (fig. 3). Cette représentation permet d'identifier différentes familles d'exoplanètes, et en particulier :

- Les « Jupiters chauds », qui sont des planètes de masse ou de rayon proches de ceux de Jupiter, de période orbitale de 1 à 100 jours. Ces planètes ont été les premières découvertes, car elles sont




Source : exoplanet.eu .

**3. Graphe représentant les masses et demi grand-axes des exoplanètes détectées par diverses méthodes :** vitesses radiales, transits, microlentilles et imagerie. Pour comparaison, les planètes du système solaire sont indiquées par des cercles noirs.

bien plus faciles à détecter que des planètes de période plusieurs milliers de jours. Ces courtes périodes indiquent (lois de Kepler) que les planètes orbitent à quelques rayons stellaires seulement de leur étoile. Leur atmosphère est donc très chaude (plus de 1000 degrés), ce qui a donné leur nom de « Jupiters chauds ». La présence de planètes géantes aussi proches de leur étoile n'était pas prévue par le scénario de formation des planètes géantes du système solaire. On admet aujourd'hui que ces planètes se sont formées plus loin de leur étoile, comme les planètes géantes du système solaire, par accrétion de gaz sur un noyau rocheux, au-delà de la ligne de glace[f], et qu'elles ont ensuite migré vers leur étoile suite à des interactions avec le disque protoplanétaire dans lequel elles se sont formées, ou bien encore suite à des interactions gravitationnelles entre plusieurs planètes au sein de systèmes multiples. Si les Jupiters chauds sont nombreux dans le diagramme (masse, demi grand-axe) par rapport, par exemple, aux Jupiters situés à une unité astronomique ou plus, ils ne sont pas forcément très fréquents. Leur grand nombre dans ce schéma est lié au fait qu'ils sont plus faciles à détecter que leurs homologues plus lointains.

- Des « super-Terres » : cette classe de planètes, de plusieurs masses terrestres, était inattendue car elle n'est pas observée dans le système solaire. Certaines de ces planètes pourraient être entourées d'eau liquide (« planètes océans »).
- Des planètes géantes massives, orbitant à plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'unités astronomiques de leur étoile. Ces planètes lointaines représentent un défi pour le scénario traditionnellement admis de formation des planètes géantes du système solaire, dans lequel celles-ci se forment au sein d'un disque protoplanétaire dense, par accrétion de gaz sur un noyau rocheux, à quelques unités astronomiques seulement de leur étoile. Si certaines de ces planètes lointaines pourraient avoir été formées près de leur étoile et avoir ensuite été éjectées par interaction gravitationnelle avec d'autres corps présents autour de l'étoile (planètes, naines brunes, étoiles), certaines ont du mal à être expliquées par un tel scénario. Des mécanismes alternatifs sont donc envisagés : la formation par effondrement gravitationnel du disque protoplanétaire, ou bien la formation par effondrement de condensations à l'intérieur de nuages protostellaires. Ce dernier scénario est celui couramment admis pour expliquer la formation des étoiles dans des systèmes doubles ou multiples. Très récemment, un système d'étoiles multiples vraisemblablement formé par fragmentation d'un disque gravitationnellement instable a été découvert. Ceci indique peut-être une sorte de continuité entre les formations planétaire et stellaire.

La diversité en demi grand-axes des orbites des planètes s'accompagne d'une diversité en termes d'excentricités, mais également en termes d'inclinaisons par rapport au plan de l'écliptique, et de direction de rotation par rapport à la rotation de l'étoile (orbites rétrogrades). Ceci constitue une nouvelle différence par rapport aux huit planètes bien connues du système solaire, qui ont toutes des orbites circulaires ou très peu excentriques, tournant dans la même direction et très peu inclinées[g]. De nouveau, des perturbations gravitationnelles avec d'autres corps présents autour des étoiles, conduisant à l'éjection de ces planètes de leur orbite initiale, pourraient expliquer ces particularités. Enfin, on notera aussi une très grande diversité dans les architectures des quelques 500 systèmes multiplanétaires découverts à ce jour.

La caractérisation des planètes va au-delà de la détermination de leur masse et de leurs propriétés orbitales. Les propriétés atmosphériques (composition, structure, température), de même que la structure interne des planètes font aussi l'objet de recherches intensives. Lorsque la masse et le rayon, donc la densité moyenne des

›››

›››

planètes sont connus, il est possible en effet de contraindre un peu la nature (gazeuse, rocheuse) de ces dernières et, dans une certaine mesure, leur structure interne (présence ou absence d'un noyau dense, présence d'eau, etc.).

Des informations sur la composition et la température des atmosphères peuvent être obtenues grâce à des études photométriques ou, mieux, à des études spectroscopiques, pour les planètes en transit (donc proches de leur étoile) ou bien, au contraire, pour les planètes lointaines observées en imagerie. Dans les deux cas, il s'agit pour le moment d'atmosphères chaudes (typiquement plus de 1000 kelvins). Les atmosphères des quelques exoplanètes étudiées se révèlent variées et complexes. Selon les conditions physiques, des brumes ou des nuages de poussières peuvent être présents. Des phénomènes de variabilité temporelle (on parle déjà de « météo » des exoplanètes) sont envisagés.

## Conclusion et perspectives

Au début de 2017, on recensait plus de 3000 exoplanètes confirmées. Mais, malgré les avancées impressionnantes des trois dernières décennies, nos connaissances restent bien limitées. Nous ne sommes pas encore en mesure, par exemple, de détecter, s'ils existent, des systèmes exoplanétaires analogues au système solaire. Même si nous savons qu'au moins 5% des étoiles de type solaire abritent une planète géante, et beaucoup plus abriteraient des planètes telluriques, nous ne connaissons pas encore le véritable taux d'occurrence des planètes ; nous ne savons pas à quel point ce taux et les propriétés des planètes dépendent des propriétés des étoiles mères. La caractérisation des planètes, en particulier l'étude de leur atmosphère et de leur intérieur, est encore restreinte à un très petit nombre d'objets, et les connaissances sont particulièrement limitées.

Un des objectifs des astronomes et des astrobiologistes est de trouver, un jour, des signatures de vie sur des planètes telluriques évoluant dans la zone « habitable » des étoiles, cette zone dans laquelle l'eau à la surface de la planète serait sous forme liquide[(h)]. Quelques planètes de type tellurique ont été trouvées dans la zone habitable d'étoiles froides (naines M, comme par exemple Proxima du Centaure), mais pas encore autour d'étoiles semblables au Soleil (de telles planètes étant plus difficiles à détecter). Il est aujourd'hui impossible de donner une liste des conditions nécessaires et suffisantes à l'apparition et à la durabilité de la vie sur ces planètes, ce qui rend l'objectif de recherche de signature de vie encore assez flou.

Les télescopes du futur, en particulier le télescope spatial James Webb, successeur du télescope Hubble, et dont le lancement est prévu en 2018, devraient permettre de progresser de manière significative dans la caractérisation des atmosphères des exoplanètes observées par la méthode de transit, en commençant par les géantes et en continuant par des planètes de type Neptune ou super-Terre. À partir de 2025, des télescopes géants au sol, de 30 à 40 m de diamètre, devraient, eux, permettre de réaliser des images de super-Terres dans la zone « habitable » de certaines étoiles et de caractériser, au moins de manière sommaire, leur atmosphère. Nul doute que les prochaines décennies seront riches de nouvelles découvertes dans le domaine des exoplanètes. ▮

(a) Une exoplanète (ou planète extrasolaire) est définie par l'Union Astronomique Internationale comme un astre de masse inférieure à la masse limite permettant la fusion du deutérium (soit environ treize fois la masse de Jupiter dans le cas de corps dont la fraction en éléments hors hydrogène et hélium est identique à celle du Soleil), en orbite autour d'étoiles ou de restes d'étoiles. On notera que les corps de masse inférieure à cette limite non liés à des étoiles ("free floating planets") ne sont pas des exoplanètes.

(b) 1 parsec (pc) correspond à la distance à laquelle une unité astronomique (ua) est vue sous un angle d'une seconde d'arc. 1 pc ~ $3{,}086 \times 10^{16}$ m ~ 3,26 années-lumière.
Une unité astronomique (ua) est égale à la distance Terre-Soleil, soit 149 597 870 700 m (près de 150 millions de km).

(c) Les lois de Kepler caractérisent le mouvement orbital d'une planète autour de son étoile, selon une ellipse dont l'étoile occupe l'un des foyers. De manière symétrique, la planète induit un mouvement de l'étoile, de période égale à la période de révolution de la planète, et d'amplitude bien plus petite que celle de la planète.

(d) Les turbulences atmosphériques déforment le front d'onde plan incident provenant d'un astre lointain et vu comme un objet ponctuel, provoquant ainsi un étalement du signal au foyer de l'instrument selon une tache appelée tache de "seeing", dont la taille est caractéristique de l'état de l'atmosphère et pas de la taille du télescope, comme ce serait le cas pour un télescope spatial. Dans des sites de qualité moyenne, le diamètre de la tache de "seeing" peut être de plusieurs secondes d'angle, tandis que dans les meilleurs sites connus actuellement, il peut être aussi petit que 0,3 secondes. Hors atmosphère, la taille de l'image est inversement proportionnelle au diamètre du télescope. Spatialiser de très grands télescopes est toutefois onéreux et compliqué.

(e) Les exoplanètes peuvent être « vues » *a priori* soit grâce à leur émission thermique, soit grâce à la lumière qu'elles réfléchissent de leur étoile. Les instruments actuels ne permettent que d'imager celles qui sont suffisamment chaudes pour être détectées grâce à leur émission thermique. Ce sont donc des planètes géantes jeunes, pas totalement refroidies depuis le moment de leur formation.

(f) La ligne de glace de l'eau est la distance à l'étoile au-delà de laquelle l'eau est présente sous forme condensée. La même notion peut s'appliquer à d'autres molécules volatiles (par exemple le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le méthane, etc.).

(g) Récemment, l'existence d'une neuvième planète dans le système solaire a été inférée à partir d'études dynamiques ; elle n'a toutefois pas encore été observée ni caractérisée.

(h) Attention, la présence d'eau n'étant certainement pas une condition suffisante à la présence de vie, le terme « habitable » peut prêter à confusion.

## Références


1• M. Mayor et D. Queloz, "A Jupiter-mass companion to a solar mass star", *Nature* **378** (1995) 355-359.

2• G. Anglada-Escude *et al.*, "A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri", *Nature* **536** (2016) 437.

3• J.P. Beaulieu et A. Cassan, *Reflets de la physique* **9** (2008) 7-11.

4• C. Marois *et al.*, "Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799", *Science* **322** (2008) 1348-1352.

5• A.M. Lagrange *et al.*, "A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris", *Science* **329** (2010) L5.


## Pour en savoir plus


• A.-M. Lagrange et P. Léna, « Exoplanètes ou planètes extrasolaires », Encyclopédie Universalis (2016).

• « L'Encyclopédie des planètes extrasolaires », Observatoire de Paris (multilingue), http://exoplanet.eu/

• NASA Exoplanets Archives, Californian Institute of Technology, http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

# Observation par LHCb d'une nouvelle particule « doublement charmée »

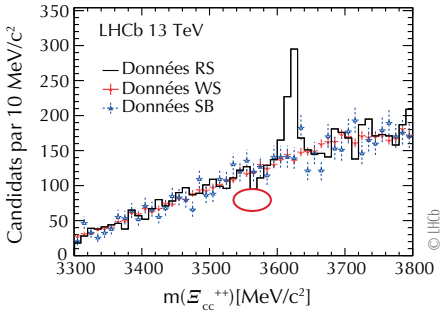
*Extrait de l'actualité scientifique du CNRS/IN2P3 du 6 juillet 2017*

La collaboration LHCb du LHC, au CERN à Genève, a annoncé la première observation d'une nouvelle particule, composée de deux quarks charmés et d'un quark *up*, le $\Xi_{cc}^{++}$ («Xi cc»). L'existence de cette particule était prédite par le modèle des quarks sans qu'elle ait pu être observée jusqu'à présent. La masse de cette particule, 3621 MeV, est presque quatre fois plus élevée que celle du proton. Pour cette découverte, présentée à la conférence internationale EPS-HEP 2017, les équipes françaises du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL, Orsay), et du Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies (LPNHE, Paris) ont été en première ligne.

La plus grande partie de la matière qui nous entoure est faite de particules à trois quarks, les baryons. Les plus connus d'entre eux sont le proton et le neutron, composés de quarks *up* et *down*. Il existe six types (ou saveurs) de quarks et de très nombreuses combinaisons possibles pour former des baryons. Cependant, c'est la première fois que les physicien.ne.s des particules observent des baryons contenant deux quarks lourds.

Ce résultat [1, 2] a été obtenu avec les collisions proton-proton du LHC à 8 TeV et 13 TeV, enregistrées pendant les deux premières périodes d'exploitation du LHC. L'observation du $\Xi_{cc}^{++}$ dans l'état final $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ atteint une signification statistique supérieure à douze écarts types (ou « sigmas ») dans les données prises en 2016. Cette découverte a ensuite été confirmée avec un échantillon indépendant enregistré en 2012. En combinant les deux lots, le nombre d'événements du signal s'élève à 426 ± 39. La particule parcourt aussi une distance perceptible avant de se désintégrer, ce qui implique que la désintégration s'effectue par l'interaction faible.

L'observation de $\Xi_{cc}^{++}$ ouvre un nouveau champ d'étude, puisque d'autres particules « doublement lourdes » (contenant des quarks beaux ou charmés) sont également prédites, et vont être maintenant cherchées au LHC. Cette découverte va permettre de tester très précisément la chromodynamique quantique, théorie qui décrit l'interaction forte.




Spectre de masse $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$, montrant un pic à 3621 MeV, correspondant à la particule $\Xi_{cc}^{++}$.

## Références

[1] R. Aaij *et al.*, "Observation of the doubly charmed baryon $\Xi_{cc}^{++}$", soumis à *Phys. Rev. Lett.* (2017).

[2] Communiqué de presse du CERN, https://press.cern/fr/press-releases/2017/07/lexperience-lhcb-est-charmee-dannoncer-lobservation-dune-nouvelle-particule

Contact

**Renaud le Gac** (legac@ccpm.in2p3.fr), responsable de LHCb France

# **Quidquam :** un MOOC grand public pour comprendre le monde à travers notre quotidien

**Daniel Hennequin**[1] (daniel.hennequin@univ-lille1.fr) et **Maxime Beaugeois**[2]
(1) Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM), UMR8523, Université Sciences et Technologies de Lille, Bât. P5, UFR de Physique fondamentale, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
(2) Unisciel, Bâtiment SEMM, Cité scientifique, Avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex

Le MOOC est un nouvel outil de formation à distance, conçu pour toucher simultanément un très grand nombre d'étudiants.
Il transpose en ligne le principe du cours traditionnel, sans avoir la prétention de le remplacer, mais avec l'ambition de toucher de nouveaux publics.
Quidquam exploite cet outil pour vulgariser les sciences auprès d'un public à la fois nombreux et varié, à travers la découverte de notre quotidien.
Il s'appuie sur l'univers de la série de vidéos Kézako et sur des ressources disponibles sur le *web* ou générées spécifiquement pour le cours.
Le bilan des deux sessions de Quidquam qui se sont tenues est très positif : elles ont permis d'enrichir la culture scientifique de milliers de personnes d'horizons très différents.

De février à avril 2014, puis de mars à avril 2016, 15 000 internautes de tous horizons ont suivi Quidquam, le premier MOOC francophone de découverte scientifique destiné au grand public. Âgés de 7 à 91 ans, issus de 80 pays différents répartis sur les cinq continents, ils ont participé à l'équivalent numérique de cours, travaux dirigés, travaux pratiques, recherches bibliographiques, conférences, tables rondes et, bien sûr, examens. Quidquam s'inscrit dans un « écosystème » qui remonte à plusieurs années, et dont le pilier est la série de vidéos intitulée « Kézako ? ». L'objectif de cette production n'est pas seulement de transmettre au plus grand nombre des connaissances scientifiques, mais aussi de familiariser son public avec la démarche scientifique.

Avant de décrire l'univers des Kézako et du MOOC Quidquam, précisons un peu ce qu'est un MOOC.

## Qu'est-ce qu'un MOOC ?

MOOC est l'acronyme anglo-saxon de Massive Open Online Course (encadré 1). C'est donc un cours en ligne ouvert et massif. « En ligne », c'est-à-dire avec le support d'Internet, ce qui permet de toucher simultanément plusieurs milliers d'apprenants, et même plusieurs centaines de milliers pour certains MOOC anglo-saxons – d'où le terme « massif ». Le mot « ouvert » joue, quant à lui, sur l'ambiguïté du terme anglo-saxon "open" : le MOOC est censé être ouvert à tous, sans inscription préalable dans une institution, gratuit, et proposer des ressources en libre accès. En pratique, on trouve des MOOC dérogeant à chacun de ces principes, voire à tous !

Les MOOC sont un phénomène relativement récent : le terme est apparu en 2008 pour désigner un cours intitulé *Connectivism and Connective Knowledge*, organisé par

### MOOC, CLOM, FLOT

encadré 1

Deux questions reviennent souvent à propos des MOOC. Comment ça se prononce ? Et existe-t-il une terminologie française ? Pour la prononciation, et comme il s'agit d'un acronyme anglo-saxon, fions-nous aux dictionnaires correspondants. D'après le site oxforddictionaries.com, les Anglais et les Américains prononcent les deux o comme dans "too" (et non comme dans "foot" pour les Anglais), ce qui donnerait en français « mouk ».

Coté français, le fascicule « Vocabulaire de l'éducation et de la recherche », édité en janvier 2017 par le ministère[(*)], recommande « cours en ligne ouvert à tous » et note que l'on trouve aussi le terme « cours en ligne ouvert massivement » et l'acronyme CLOM. Les acronymes CLOT et FLOT (Formation en Ligne Ouverte à Tous) ne sont donc pas recommandés. Dans les faits, le terme MOOC est bien plus répandu, et la plateforme du ministère porte le nom de domaine « fun-mooc.fr/ ». C'est la raison pour laquelle nous utilisons ce terme ici.

(*) « Vocabulaire de l'enseignement et de l'enseignement supérieur », *JORF* n°0008 du 10 janvier 2017. Disponible sur www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000033843222.

**Page d'accueil du MOOC « Quidquam, comprendre le monde au quotidien... autour de la lumière » (2016)**

Georges Siemens et Stephen Downes, les pères de la théorie du connectivisme [1]. C'est quatre ans plus tard, en 2012, que le phénomène émerge, avec des millions d'étudiants inscrits à une centaine de MOOC [2], dispensés par trois plateformes (Udacity, Coursera et edX, voir fig. 1). De 2012 à 2016, 6850 MOOC ont été proposés ; ils ont été suivis par 58 millions d'étudiants, dont 23 millions de nouveaux inscrits en 2016 [3].

Un MOOC est un cours au sens d'*un ensemble de leçons données par un professeur et formant un enseignement cohérent* [4], et non un simple manuel traitant d'une matière déterminée. De ce fait, un MOOC ne devrait pas se contenter de mettre à disposition de l'apprenant un ensemble de vidéos où l'on voit un professeur donner un cours. Si tel est le cas, on reste dans le principe d'une simple médiathèque en ligne, comme le projet OpenCourseWare ou la plateforme Moodle. Un MOOC doit aussi organiser les interactions entre l'équipe pédagogique et les étudiants, ce qui signifie qu'il se déroule suivant un calendrier : il ouvre à une date précise, est organisé en chapitres d'une durée prédéfinie, en général une semaine, et ferme lorsque tous les chapitres ont été vus.

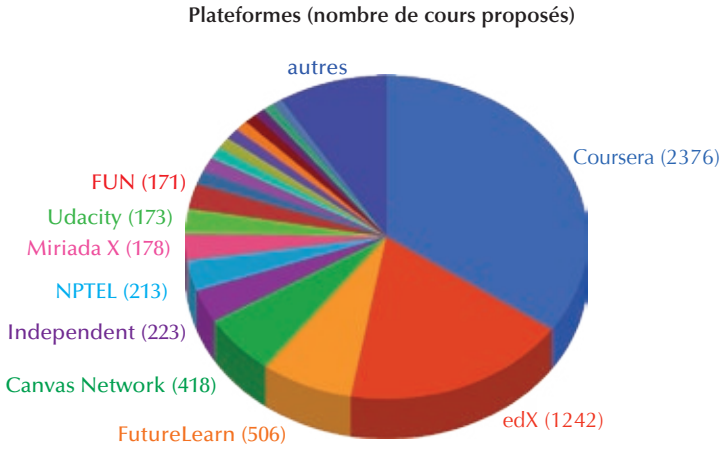
Concernant les interactions entre l'équipe pédagogique et les apprenants, on peut distinguer deux courants : la branche connectiviste, et l'on parle alors de cMOOC, et la branche de Stanford, qui développe les xMOOC.

Les cMOOC s'appuient sur la théorie du connectivisme [1] : les animateurs du cours (on ne parle plus d'enseignants) établissent une liste de sujets qui sont abordés dans le cadre d'une progression, fournissent des ressources favorisant la réflexion et facilitent les interactions [5]. Mais l'essentiel de l'apprentissage vient des discussions entre apprenants, *via* les réseaux sociaux. Les cMOOC sont donc « des espaces de coconstruction des savoirs et savoir-faire par les apprenants eux-mêmes » [5]. L'évaluation s'appuie alors sur la participation et la réflexion ou, quand le sujet s'y prête, sur la création d'un objet numérique. En pratique, les cMOOC n'ont pas touché jusqu'à présent les sciences naturelles. Ils traitent essentiellement des sciences de l'éducation et la théorie de l'apprentissage, comme les cours fondateurs sur le connectivisme.

Les xMOOC s'appuient sur un enseignement traditionnel, c'est-à-dire une transmission descendante des connaissances, depuis les professeurs vers les apprenants. Certains xMOOC sont très proches de la simple médiathèque en ligne, n'y adjoignant qu'un forum de discussion et une évaluation, en général sous forme de questionnaire à choix multiples (QCM), mais d'autres xMOOC sont beaucoup plus sophistiqués, en s'inspirant au moins en partie des cMOOC. Ce sont les grandes universités américaines, Stanford en tête, qui ont lancé le mouvement des xMOOC.

L'espoir était que les MOOC – ces cours dispensés par des universités d'élite – permettraient à chacun d'acquérir une

>>>




**1. Poids des différentes plateformes hébergeant des MOOC, fin 2016, avec entre parenthèses le nombre total de cours disponible sur chaque plateforme.**
Les MOOC, par leur ampleur et leur interactivité, nécessitent d'être hébergés par des sites *web* spécifiques, des plateformes telles que Coursera, edX, Canvas Network, Udacity, Miriada X ou FUN. Dominant le marché, Coursera s'est lancée avec les universités de Stanford, de Princeton, du Michigan et de Pennsylvanie, et compte aujourd'hui 147 partenaires. Certains de ses cours dépassent le million d'inscrits ! edX a été fondée par le MIT et Harvard, et réunit aujourd'hui 109 universités. En France, France Université Numérique (FUN) est une initiative du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, visant à fédérer les MOOC proposés par les universités et écoles françaises. Elle fédère 78 partenaires.

›››

éducation, depuis le villageois turc (*sic*) jusqu'à l'étudiant qui abandonne ses études aux États-Unis [6]. Les MOOC abordent toutes sortes de sujets, parfois très pointus mais, au final, moins de 20% des inscrits sont des étudiants. Le profil typique de l'apprenant est plutôt le jeune actif, ayant un emploi à temps plein dans un pays industrialisé, avec un niveau d'éducation de l'ordre de la licence. Ce dernier point est encore plus accentué dans les pays en voie de développement [6]. Un autre aspect qui distingue les MOOC des cours universitaires traditionnels est que les taux de réussite y sont bien moindres, inférieurs à 15% en moyenne. Ce constat est cependant à prendre avec beaucoup de prudence : l'inscription à un MOOC étant gratuite, le nombre d'inscrits ne correspond pas forcément au nombre de participants réels. Malheureusement, seul le nombre d'inscrits peut être déterminé avec certitude. Les autres indicateurs sont peu fiables : on ne peut que faire des estimations, par exemple en fonction du nombre de vues des vidéos du cours.

La plupart des MOOC sont issus des universités (plus de 700 universités en ont proposé en 2016) et destinés aux étudiants ; mais, paradoxalement, 80% des apprenants qui suivent les MOOC ne sont pas étudiants, mais ce qu'il est convenu d'appeler du grand public. Les MOOC semblent donc être l'outil optimal pour transmettre une culture scientifique à un public varié !

## La série Kézako

Il est difficile de parler du MOOC Quidquam sans le replacer dans le contexte de la série Kézako. Kézako est une aventure qui a démarré en 2010, en partant du constat que dans les formes traditionnelles de popularisation des sciences (fêtes de la science, festivals, chercheur à l'école...), on dépense beaucoup d'énergie (et d'argent) pour toucher relativement peu de monde, et encore moins en dehors des grandes villes. Nous nous sommes donc fixés comme objectif de proposer une ressource sur Internet, en évitant les défauts habituels, tels que des productions de qualité très variable, une origine pas toujours très claire (et du coup une fiabilité difficile à évaluer), et un public cible trop restreint (si bien que l'internaute peut être frustré de ne rien apprendre de nouveau, ou au contraire de ne rien comprendre, faute d'avoir les prérequis nécessaires).

**2. Capture d'écran d'un Kézako enrichi.** À gauche de la vidéo, accès à un lexique des termes utilisés dans la séquence. À droite, des ressources complémentaires qui approfondissent les notions abordées dans la séquence.

Kézako est une série de vidéos au format *web*, c'est-à-dire d'une durée de 3 à 6 minutes. Chaque vidéo tente de répondre à une question simple, comme « Pourquoi le ciel est bleu ? », « Comment un avion vole-t-il ? » ou « Comment fonctionne le cerveau ? ». Comme ces vidéos s'adressent au grand public, un soin particulier est apporté à la pédagogie du contenu et à la qualité graphique de la vidéo. Chaque question est cependant traitée de façon très rigoureuse, en s'appuyant sur des articles parus dans des revues, avec rapporteur si nécessaire. Le texte écrit est validé par un expert du domaine. La réalisation se poursuit par un travail de scénarisation audiovisuelle s'appuyant sur un « style » élaboré par l'équipe. Kézako s'est en effet fixé un style graphique et scénaristique qui constitue une véritable signature de la série. L'origine d'une vidéo Kézako est donc très facile à retrouver, même si elle a été retirée de son contexte.

La réalisation de la vidéo n'est qu'une première étape. Le produit final est une vidéo enrichie qui propose d'autres ressources au fur et à mesure qu'elle se déroule (fig. 2). On obtient ainsi un objet avec 2, 3, voire 4 niveaux de lecture, proposant aussi bien des ressources grand public que des articles de recherche.

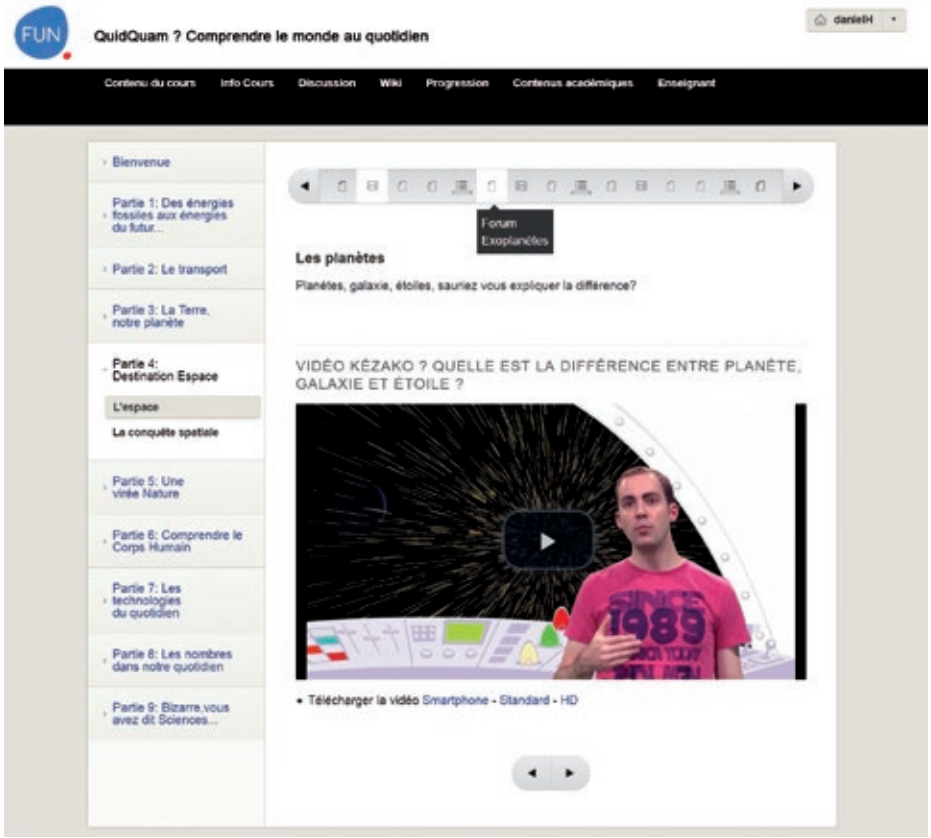
La série Kézako compte aujourd'hui 70 vidéos, et 5 sont en cours de montage. Produite essentiellement par l'université numérique Unisciel (encadré 2), elle est très largement diffusée, par exemple par Universcience, Canalsat, France Culture Plus, lemonde.fr, francetv éducation ou Futura Sciences. Plusieurs épisodes ont été intégrés dans des manuels scolaires par des éditeurs (Nathan, Hatier, Milan, etc.). La série est aussi utilisée dans des centres de culture scientifique, dans le cadre de formations en entreprise, dans des classes

### L'université numérique Unisciel

encadré 2

Kézako et le MOOC Quidquam sont produits par Unisciel, l'Université des Sciences en Ligne. Unisciel est l'une des sept universités numériques thématiques créées en 2003 par le ministère de l'Enseignement supérieur. Elle se consacre aux sciences fondamentales : mathématiques, informatique, physique, chimie, sciences de la vie, de la Terre et de l'Univers. Ces thématiques sont aussi celles couvertes par Kézako et Quidquam.

Les missions d'Unisciel sont de renforcer l'attrait pour les études et filières scientifiques d'un plus grand nombre d'étudiants, de favoriser leur réussite et de contribuer au rayonnement de l'enseignement scientifique francophone. Les ressources produites par Unisciel, et notamment Kézako et Quidquam, sont sous licence Creative Commons : elles sont accessibles gratuitement à tous pour une utilisation non commerciale. Les auteurs des Kézako sont les deux auteurs de cet article et Damien Deltombe, monteur et réalisateur, qui participe à la conception des scénarios et offre un regard « grand public » sur les sujets.




3. Capture d'écran d'un chapitre de Quidquam.

du secondaire et à l'université. Par exemple, Kézako a intégré les classes bilingues au Laos, dans le cadre de l'Institut Français, et il est utilisé dans les universités de Bordeaux 1 et Lyon 2 en première année de licence.

## Le MOOC Quidquam

Le MOOC Quidquam a été créé en 2014, puis une deuxième session a été donnée en 2016. Dans cette section, nous présenterons d'abord le processus de création du MOOC, puis nous discuterons de la deuxième édition et de l'avenir de Quidquam.

Pour créer un MOOC, la première étape est bien sûr de définir clairement le sujet. Dans notre cas, c'est la culture scientifique à travers la découverte de notre quotidien, ce qui a débouché sur le titre « Quidquam, comprendre le monde au quotidien ». Notre cible est le grand public, mais toujours avec la volonté de proposer différents niveaux de lecture suivant l'âge et les capacités de l'apprenant. Nous avons donc construit le MOOC autour des vidéos Kézako, une série déjà éprouvée dont la qualité est appréciée. Les vidéos sont complétées par des ressources soigneusement sélectionnées pour leur qualité scientifique et pédagogique.

L'âme du cours, c'est bien entendu son déroulé. Lors de sa création, Quidquam était articulé en neuf chapitres correspondant à dix semaines de cours, pour un temps de travail de l'apprenant estimé à trente minutes par jour. À quoi ressemble un chapitre ? Pour l'internaute, c'est une page *web*, avec des onglets ordonnés de façon chronologique (fig. 3). Chaque onglet correspond à une ressource ou une activité. Quand la ressource est digérée ou l'activité terminée, l'apprenant passe à l'onglet suivant. Dans la conception du déroulé d'un chapitre, il faut veiller à maintenir la motivation des étudiants. C'est le rôle des activités disséminées entre les pages de ressources. Il peut s'agir d'un *quizz* pour tester les connaissances acquises, de travaux pratiques à faire chez soi, d'une recherche documentaire, d'une incitation à engager une discussion sur le forum, ou encore d'une conférence en direct, donnée par un scientifique qui répond ensuite aux questions *via* le forum et les réseaux sociaux.

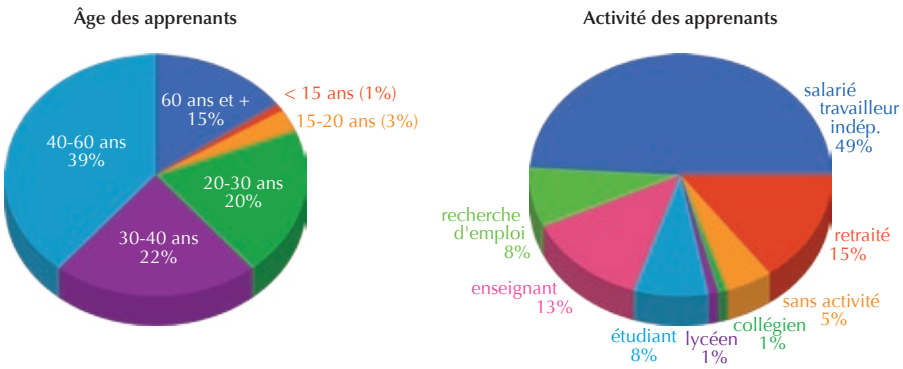
Nous avons en effet fait le choix de proposer un MOOC que nous qualifions de « participatif », à mi-chemin entre le xMOOC et le cMOOC. Nous voulons inciter les apprenants à dialoguer entre eux. Pour cela, nous encourageons les échanges et les discussions sur le forum, nous demandons aux apprenants de poster des ressources complémentaires, par exemple sur un phénomène physique, nous lançons des débats, sur des thèmes d'actualité ou en introduisant des erreurs volontaires dans les ressources fournies. Les apprenants les plus actifs sont identifiés au travers de badges (apprenant actif, apprenant recommandé...). Toujours dans cette perspective, nos partenaires interviennent selon leur savoir-faire. Par exemple, Canalsat et Universcience proposent des documentaires TV en lien avec la semaine en cours, France Culture Plus lance des débats, etc.

Tout en construisant le MOOC, il faut choisir la plateforme qui le gèrera. Dans notre cas, nous avons d'abord développé Quidquam sur une plateforme proposée par Beebac, le réseau social de l'éducation. Puis l'équipe de France Université Numérique (FUN, voir fig. 1) est venue nous chercher, et nous n'avons donc pas vraiment eu le choix.

Il faut aussi s'assurer que les internautes aient connaissance du MOOC et s'y inscrivent. Nous avons donc fait appel à une attachée de presse pour orchestrer une campagne de communication vers les médias. Cette campagne a été relayée par nos partenaires vers leur public et, pendant le déroulement du MOOC, nous avons organisé des évènements en lien avec le MOOC, mais ouverts à tous, pour amplifier cette communication. C'était en particulier le cas des conférences, diffusées en direct dans le cadre de Quidquam, et en même temps sur Futura Sciences et Universcience. La plus populaire fut suivie en direct ou en léger différé par 36 000 internautes.

Au moment du lancement de la première session du MOOC, le déroulé des dix semaines était entièrement scénarisé, et l'on a pu se concentrer sur la gestion du flux d'étudiants. Nous avons pour cela formé une équipe pédagogique constituée de deux permanents et cinq étudiants tuteurs. Le rôle des étudiants s'avère crucial : ils dynamisent le MOOC en intervenant sur le forum, en répondant aux questions, en lançant de nouveaux débats et en jouant

›››




**4. Répartition des apprenants ayant suivi la première session du MOOC Quidquam, par secteur d'activité et par tranche d'âge.**

›››

le rôle d'arbitres dans les discussions. Ils passent également le relais aux « professeurs » lorsque les questions dépassent leur domaine de compétence.

Ceci nous amène à la question du temps nécessaire à la réalisation et à l'animation d'un MOOC. La première session du MOOC Quidquam a nécessité environ 150 semaines équivalent temps plein rien que pour la production des vidéos, dont environ un tiers pour les deux enseignants-chercheurs. Il faut y rajouter la recherche des ressources complémentaires, la scénarisation du MOOC et l'animation. Créer un MOOC est donc un investissement considérable, qui nécessite un travail d'équipe.

Au final, nous considérons que la première session de Quidquam a été un vrai succès. Avec 12 000 inscrits, un taux de participation vraie de 25%, largement supérieur à la moyenne, et des retours très positifs des apprenants, Quidquam est l'un des MOOC de la première saison de FUN qui a le mieux fonctionné. Le profil des apprenants correspondait au public visé : une parité homme/femme quasi parfaite, et des distributions dans les secteurs d'activité et les tranches d'âge assez bien réparties (fig. 4). Le seul bémol a concerné la durée du MOOC, trop long à la fois pour l'équipe pédagogique et pour les apprenants.

Ce succès nous a incité à proposer une deuxième session en 2016. Tirant les leçons de la première édition, nous avons limité la durée à six semaines, en affichant une thématique plus restreinte sous le titre « Quidquam, comprendre le monde au quotidien... autour de la lumière ». Nous avons reproduit à l'identique l'organisation adoptée pour la première session (équipe pédagogique, partenaires relais, conférences en direct, etc.). Cette deuxième session aussi a été un beau succès, même si comparativement à la première session, le résultat est plus mitigé en terme d'inscriptions, avec « seulement » 3 000 apprenants. Mais plus de 65% de ceux-ci ont suivi le MOOC depuis le début jusqu'à la fin, ce qui relativise la baisse réelle du nombre d'apprenants. Cette diminution des effectifs des MOOC est d'ailleurs une tendance générale [7]. Elle est attribuée à plusieurs paramètres : le nombre de cours proposés augmente plus vite que le nombre d'inscrits, les cours sont de plus en plus souvent payants, le système des sessions a tendance à disparaître au profit de cours que l'on peut démarrer à tout moment (au détriment de l'interactivité). Par exemple, Quidquam était en 2014 le seul MOOC francophone de découverte scientifique. Mais d'autres MOOC de culture scientifique sont apparus dès l'année suivante, y compris sur la plateforme FUN. Ainsi, la session 2016 de Quidquam était en concurrence avec d'autres MOOC à destination du grand public (encadré 3).

Plus de 90% des apprenants de la deuxième session se sont dits intéressés par une troisième session. Mais y a-t-il un avenir pour cette forme de diffusion de la culture scientifique ? Les deux premières éditions de Quidquam nous ont convaincu que le principe du MOOC se prête bien à la popularisation des sciences. Nous avons souvent retrouvé sur le forum l'ambiance des villages des sciences, avec des discussions qui s'éloignaient parfois beaucoup du sujet initial, tout en restant dans le champ scientifique. Cet enthousiasme des apprenants nous donne bien sûr envie de proposer une troisième session. Si nous trouvons les forces vives nécessaires, rendez-vous donc en 2018 ! ▮

encadré 3

## Les MOOC grand public francophones

Si Quidquam était le seul MOOC francophone de culture scientifique proposé lors du lancement de la plate-forme FUN, il a bien entendu été rejoint les années suivantes par d'autres MOOC ayant la même ambition. Mais encore aujourd'hui, les MOOC scientifiques qui s'affichent véritablement grand public, ne demandant aucun pré-requis pour être suivis, restent peu nombreux.

Ainsi, dans la rubrique « physique » de FUN, qui propose 21 MOOC francophones, on ne trouve, en plus de Quidquam, que 5 MOOC explicitement grand public : « La physique: vive[z] l'expérience ! » (Paris 13, voir l'annonce p. 42), « Volcanologie physique : des phénomènes aux processus » (IPGP et USPC), « Au cœur de la radioactivité médicale » (université de Nantes), « Gravité ! Du Big Bang aux Trous Noirs » (Paris Diderot) et « À la recherche d'autres planètes habitables » (Communauté Université Grenoble Alpes).

Notons cependant que certains MOOC avec pré-requis relèvent aussi de la découverte scientifique. C'est le cas par exemple du MOOC « Physique des objets du quotidien : du four à micro-ondes au smartphone » (université de Bordeaux), ou encore de « Peser l'univers » (Observatoire de Paris).

## Références


1• "Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age", George Siemens, disponible en ligne : www.elearnspace.org/Articles/connectivism.htm .

2• "The year of the MOOC", *New York Times*, 2 novembre 2012, disponible en ligne : www.nytimes.com/2012/11/04/education/edlife/massive-open-online-courses-are-multiplying-at-a-rapid-pace.html?pagewanted=all .

3• "By The Numbers: MOOCs in 2016", 25 décembre 2016, disponible en ligne : www.class-central.com/report/mooc-stats-2016/ .

4• Définition du Larousse.

5• « L'incroyable productivité des cMOOCs », Christine Vaufrey, sur le site Thot Cursus, 5 mars 2013 : http://cursus.edu/article/19619/incroyable-productivite-des-cmoocs/#.VGh-yMIw9tY .

6• "Demystifying the MOOC", Jeffrey J. Selingo, *New York Times*, 29 octobre 2014 : www.nytimes.com/2014/11/02/education/edlife/demystifying-the-mooc.html .

7• "MOOC Trends in 2016: MOOCs No Longer Massive", Dhawal Shah, 16 novembre 2016, disponible en ligne : www.class-central.com/report/moocs-no-longer-massive/

# La science pour les tout-petits : « La nature à la loupe »

**Rendre visible l'invisible et observer les petits êtres qui nous entourent, voici ce qui attendait les élèves des écoles maternelles « Jean de la Fontaine » de Saclay, « Les Alouettes » de Saint-Aubin, « Les Quatre Coins » et « Léopold Gardey » de Bures-sur-Yvette. Pour cette troisième édition (après « Jeux de lumière » en 2015 et « Les aimants c'est dément » en 2016), ces scientifiques en herbe ont découvert ensemble la nature à la loupe.**

Cette année, des chercheurs du Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, de l'Institut de Biologie Intégrative de la Cellule, et du laboratoire Écologie, Systématique et Évolution se sont associés à quatre écoles maternelles aux alentours de l'université Paris-Saclay afin de mener à bien une nouvelle fois ce projet, qui disposait d'une subvention PEAC (Projets d'éducation artistique et culturelle) du rectorat de Versailles, d'un soutien financier de l'OSA (Optical Society of America) et qui a remporté le prix Île de Science Paris-Saclay décerné le 14 octobre 2016.

Lentille, compartiment, levure... Autant de mots du quotidien qui n'ont rien d'évident pour un petit élève de quatre ans. Quelques mois avant les ateliers, les instituteurs ont donc appris aux enfants le vocabulaire et les notions dont ils ont eu besoin pour se pencher sur les principes de la microscopie et entrevoir la complexité du vivant. Ce travail important, facilité par une communication constante entre scientifiques et instituteurs, a permis aux tout-petits d'aborder ensuite les ateliers sereinement, avec toute la curiosité qui les caractérise.

Les six ateliers, qui ont duré une vingtaine de minutes chacun, se sont déroulés sur plusieurs semaines. Un premier atelier a permis aux enfants d'aborder la notion d'infiniment petit, le principe de la formation des images, le fonctionnement d'un microscope. Cette première étape leur a donné les bases, celles de l'outil scientifique, pour s'intéresser ensuite, lors d'un deuxième atelier, à la notion de cellule, unité fondamentale du vivant. Ainsi parés, nos petits scientifiques ont été à même de comprendre l'utilité des microorganismes dans la brioche de leur goûter, de découvrir comment respirent les vers de terre de leur jardin, d'étudier les bactéries qui les entourent, et d'analyser des images en microscopie électronique de fourmis ou de scarabées.

Forts de ces nouvelles connaissances, les tout-petits ont profité d'une manifestation ouverte au public (le 3 mars à Saint-Aubin et le 17 mars à Bures-sur-Yvette) pour expliquer à leurs parents et proches les secrets de la nature qui les entoure. Ils ont pu refaire eux-mêmes les expériences des différents ateliers, répondre à des questions en s'appuyant sur des posters grand format, et prendre peut-être le goût, en plus de celui des sciences, de celui de la diffusion du savoir. ▮

**Alexandra Petreto**[1,a] (alexandra.petreto@u-psud.fr)
**Olivier Lefebvre**[2], **Samuel Serna**[2], **Mathias Berciano**[2], **Claire Abadie**[2], **Amanda Trépagny**[2,b] (amanda.trepagny@c2n.upsaclay.fr), **David Bouville**[2], **Hugues Cazin**[3], **Sandrine Fontaine**[4], **Gaëlle Vincent**[4], **Sophie Thibault**[4] **et Sandra Dumuis**[5]

(1) Institut de Biologie Intégrative de la Cellule, Université Paris Sud, 91405 Orsay Cedex
(2) Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, Université Paris Sud, 91405 Orsay Cedex
(3) Labex Nano-Saclay, MISS, Université Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex
(4) Laboratoire Écologie, Systématique et Évolution, Université Paris Sud, 91405 Orsay Cedex
(5) École maternelle publique « Les Alouettes », Place de la Mairie, 91190 Saint-Aubin

(a) Doctorante de l'I2BC, rédactrice de l'article. (b) Coordinatrice du projet.

# Le plan d'action 2017 de la SFP

La Société Française de Physique affiche des valeurs qui sont celles des physiciens et, plus généralement, celles de la science :
- l'éthique, exigée pour la création du savoir universel ;
- la créativité, couplée à l'excellence, à l'émulation et au professionnalisme ;
- la collaboration dans la diversité, porteuse de richesses nouvelles ;
- la nécessité de la parité ;
- la responsabilité, en liaison avec une science citoyenne.

Nous avons exprimé, lors de la Marche pour les sciences du 22 avril 2017, que la science, avec ses valeurs :
- favorise un dialogue multiculturel, basé sur une rationalité constructive ;
- contribue à construire de nouveaux savoirs et à les préserver en tant que biens publics mondiaux ;
- apporte des bénéfices à l'humanité, sur l'ensemble des champs sociétal, écologique, économique, et à la qualité de vie des hommes (leur santé, entre autres) et des collectivités.

Nous avons convenu, après notre séminaire de travail à Marne-la-Vallée (décembre 2016), animé par des jeunes sur un mode favorisant l'approche et l'intelligence collective, que notre stratégie se déclinait prioritairement pour les années à venir de la manière suivante :
- augmenter notre influence au sein de la communauté scientifique, des pouvoirs publics et de la société (par l'intermédiaire de nos actions et de l'accroissement des adhésions individuelles, laboratoires, associations, entreprises) ;
- se rapprocher du monde des entreprises et des autres sociétés savantes ;
- fluidifier l'information et les interactions au sein même de la SFP, encourager et valoriser les initiatives ;
- accorder une attention particulière à la place des jeunes et à leur formation, ainsi qu'à la place des femmes dans les sciences.

## Le plan d'action qui en découle se décline en cinq missions avec, pour chacune d'elles, un objectif à atteindre et des actions à engager.

**1 - Rassembler la communauté des physicien.ne.s (chercheurs, ingénieurs, techniciens, enseignants).**
Pour cela, se rapprocher des autres sociétés savantes, des sociétés d'enseignants et des sociétés d'ingénieurs, en prenant des positions, en faisant des tribunes communes, en s'engageant ensemble dans les débats au nom de nos valeurs et de notre expertise.
*Actions à mettre en place dès 2017 :*
- organiser des commissions communes avec les différentes sociétés savantes ;
- généraliser la consultation des adhérents avant toute prise de position *via* un sondage en ligne, facile à dépouiller.

**2 - Influencer les pouvoirs publics.**
S'organiser pour influencer les pouvoirs publics et faire en sorte que la voix des scientifiques soit entendue lors des prises de décision.
*Actions à mettre en place dès 2017 :*
- constituer un annuaire des responsables politiques et publics, reliés chacun à des référents SFP issus du siège, du conseil d'administration, des divisions, sections locales et commissions ;
- proposer d'inclure des scientifiques dans les circuits de décision.

**3 - S'engager pour une physique citoyenne.**
Montrer la place de la physique dans la vie quotidienne et dans la technologie. Accroître les qualité et quantité des outils nécessaires à l'exercice de l'esprit critique du citoyen sur les questions sociétales liées à la science. Faire connaitre et prendre conscience du rôle de la science dans l'économie.
*Actions à mettre en place dès 2017 :*
- créer des supports (ou partager ceux qui existent) expliquant et illustrant la présence de la physique dans notre vie quotidienne ;
- créer sur le site *web* de la SFP un onglet : « démasquer les impostures ».

**4 - Se rapprocher du monde des entreprises,** en montrant qu'on y fait aussi de la belle physique et de la belle recherche, en valorisant la thèse et le diplôme de docteur, en favorisant le recrutement des docteurs.
*Actions à mettre en place dès 2017 :*
- prendre l'initiative d'une manifestation où la question de la valorisation du diplôme de docteur sera posée. Seront envisagées des collaborations avec l'OPECST, les Académies des sciences et des technologies, le MEDEF, les sociétés savantes, l'association B. Gregory, l'IESF, etc. ;
- placer sur le site *web* de la SFP des interviews de docteurs en entreprise, mettant en avant ce que leur formation doctorale leur a apporté pour leur activité professionnelle.

**5 - Rendre la Société Française de Physique plus attractive pour les jeunes,** en leur montrant les bénéfices qu'elle leur apporte et le rôle qu'ils peuvent y jouer, en leur donnant des responsabilités.
*Actions à mettre en place en 2017 :*
- donner aux jeunes (étudiants, doctorants et postdoctorants) davantage de responsabilités dans les événements organisés par la SFP ;
- créer des témoignages de jeunes expliquant les apports d'un investissement au sein de la SFP.

Ce plan d'action a été approuvé par le conseil d'administration du 24 mars 2017. L'ensemble de ces actions sera suivi tout au long de l'année 2017, et un compte rendu sera fait à l'Assemblée générale de février 2018.

**Michel Spiro**, président de la Société Française de Physique,
au nom du bureau national

# Accord SCF-SFP du 7 mars 2017

La présidente de la Société Chimique de France, Gilberte Chambaud, a pris part à la réunion de bureau de la Société Française de Physique du 7 avril 2017. Cela a été l'occasion de convenir d'actions conjointes, en particulier :

1 - Inciter les sections régionales de la SFP et de la SCF à communiquer davantage et à faire au moins une action commune par an.

2 - Mettre le Réseau des Jeunes Chimistes en rapport avec la Commission Jeunes de la SFP et les Rencontres des Jeunes Physiciens, en montant des actions en commun.

3 - Renforcer ensemble les actions de la Division de Chimie-Physique (colloques, prix, inscriptions croisées, actions de formation...).

4 - Rapprocher les activités sur les formations pour lesquelles la commission enseignement de la SFP et la division enseignement/formation de la SCF pourraient accroître leurs liens.

5 - Associer SCF et SFP dans les prises de position nationales et internationales.

6 - Maintenir un représentant SFP dans le comité éditorial de *L'actualité chimique* et un représentant SCF dans le comité éditorial de *Reflets de la physique*.

7 - Continuer à travailler ensemble pour renforcer l'éditeur français EDP Sciences, à la fois sur le plan de ses choix stratégiques et sur le plan financier.

8 - Communication (en liaison avec d'autres sociétés savantes : SMF, SMAI...) : continuer à organiser des journées Sciences et médias sur le modèle de celle de 2016.

**Gilberte Chambaud,** présidente de la Société Chimique de France
**Michel Spiro,** président de la Société Française de Physique

# La SFP a participé à la Marche pour les sciences, le 22 avril 2017

Initiée aux États-Unis en réaction aux positions antisciences du président Donald Trump et de la nouvelle administration américaine, et face aux difficultés croissantes pour pratiquer et accéder aux sciences dans de nombreux pays [1], la Marche pour les sciences est devenue un événement mondial soutenu par plus de cent organisations, qui a eu lieu le samedi 22 avril dans plus de 600 villes de plus de 37 pays. Les manifestations françaises, organisées par le collectif « Marche pour les sciences » (www.marchepourlessciences.fr), ont mobilisé 12 000 personnes, dont 5000 sur Paris.

La Société Française de Physique a été l'une des premières sociétés savantes à soutenir cette Marche pour les sciences. Nous avons ainsi voulu montrer que les sciences apportent une note d'espoir dans notre monde, à travers un dialogue multiculturel basé sur une rationalité constructive, à travers la capacité d'alerter et de fournir des pistes pour des solutions aux grands défis à venir, à travers les bénéfices économiques et sociétaux que l'on peut en tirer (amélioration de notre santé et élévation du niveau de vie). La SFP a manifesté dans sept villes de France : Paris, Strasbourg, Bordeaux, Toulouse, Marseille, Nice et Grenoble.

[1] « Marchons le 22 avril "pour signifier l'immense danger que représente la mise au pas des sciences" », tribune publiée dans le journal *Le Monde* du 15 février 2017.

# Les Rencontres Physique-Entreprise-Recherche

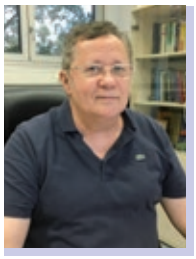
Ces rencontres, organisées par la Société Française de Physique, se sont déroulées le 10 mars 2017 à l'Hôtel de ville de Paris. La journée avait pour objectif de mieux faire connaitre et de valoriser auprès des jeunes chercheurs et chercheuses la physique faite dans les entreprises. Des conférences, des tables rondes, des ateliers interactifs et des stands leur ont permis de découvrir le potentiel scientifique des grands groupes industriels, de PME et de start-up innovantes.

Le comité scientifique, présidé par Jacques Prost, membre de l'Académie des sciences, comportait des personnalités scientifiques de premier plan, dont Albert Fert (prix Nobel de physique 2007), et tous les directeurs scientifiques (ou leurs représentants) des entreprises partenaires.

Ces rencontres, qui ont réuni 420 doctorants ou postdoctorants et plus de cinquante partenaires, ont rencontré un vif succès, comme en témoigne l'article dans le journal *Le Monde* [1] et l'enquête de satisfaction menée auprès des participants [2].

[1] D. Larousserie, « La physique tisse un lien entre recherche publique et industrie », article publié dans le journal *Le Monde* du 15 mars 2017.

[2] Le programme complet, les résumés des conférences, l'enquête de satisfaction, une vidéo et une galerie photos peuvent être trouvés sur le site www.rencontresper2017.fr .



# Prix Jean Ricard 2016 : Jean-Yves Bigot

Jean-Yves Bigot, 60 ans, est directeur de recherches du CNRS à l'IPCMS (CNRS / Université de Strasbourg), docteur d'État de l'Université de Strasbourg depuis 1984, année où il est recruté au CNRS. Postdoctorant en 1988-89 aux Bell Labs, puis chercheur en 1989-1990 au Lawrence Berkeley National Laboratory, il retourne à l'IPCMS au sein du département « optique » qu'il dirige de 2000 à 2007. Il a vite tiré parti de la polyvalence de l'IPCMS, qui regroupe physiciens et chimistes d'horizons très différents.

J.-Y. Bigot est un physicien expérimentateur, expert de l'optique femtoseconde ($10^{-15}$ s) qu'il a introduit dans la diversité des champs scientifiques de la physique de la matière condensée, initialement des semi-conducteurs, biophysique, polymères, et au tournant du millénaire dans le nanomagnétisme où son approche a permis de mesurer les dynamiques de l'aimantation-désaimantation, de la précession, de l'interaction *spin*-photon en régime cohérent. Le contrôle optique du renversement de l'aimantation de nanostructures ferromagnétiques est un enjeu essentiel de l'écriture et de la lecture de l'information stockée dans les nanopiliers ferromagnétiques.

Il est le fondateur de la première conférence dédiée au magnétisme ultra-rapide qui eut lieu à Strasbourg en 2013. Son approche a été également novatrice pour l'étude de la dynamique des électrons, et de celle de la déformation de nanoparticules métalliques soumises à des impulsions acoustiques picoseconde. Implanter une source d'électrons pulsés dans un microscope électronique est un nouveau défi auquel Jean-Yves Bigot s'attaque.

Il fut lauréat du prix Ancel de la SFP en 2000, médaille d'argent du CNRS en 2008, lauréat de l'ERC (European Research Council) en 2009 pour le projet ATOMAG. Jean-Yves Bigot porte deux projets « Investissements d'avenir » à l'IPCMS. Expert international, il participe aux comités de la Société allemande de physique (DPG), de la National Science Foundation américaine et de l'ERC.

Jean-Yves Bigot a donné personnellement plus de 120 présentations invitées et séminaires. Enseignant pendant sept ans en master à l'Université de Strasbourg, il a aussi diffusé son savoir à Séoul.

La Société Française de Physique félicite Jean-Yves Bigot, lauréat du prix Jean Ricard 2016, pour ses réalisations expérimentales particulièrement innovantes et fécondes dans des domaines variés de la physique de la matière condensée.

# Prix Émilie du Châtelet 2016 : François Bouchet

François Bouchet a 61 ans. Diplômé de l'ESPCI en 1980, il a soutenu en 1983 à l'Université Pierre et Marie Curie une thèse de physique théorique portant sur la croissance des fluctuations primordiales de l'Univers et la formation des galaxies. Recruté par le CNRS en 1984, il est mis à disposition de l'Université de Californie pendant trois ans, en tant que visiteur du département d'astronomie de Berkeley. Depuis 1988, il travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris. Il est directeur de recherche du CNRS depuis 1993.

Le domaine de recherche de François Bouchet est la cosmologie observationnelle, tout particulièrement l'étude du fond cosmologique primordial (CMB). F. Bouchet s'est également intéressé au cours de sa carrière à la formation et à l'évolution des grandes structures de l'Univers, du point de vue statistique, et aux cordes cosmiques.

F. Bouchet est l'un des trois fondateurs du projet d'observatoire spatial Planck et le coordinateur scientifique du consortium « Planck-HFI » (High Frequency Instrument). L'impact scientifique majeur de F. Bouchet est l'analyse des résultats de la mission Planck d'observation des fluctuations de température (obtenues avec une bien meilleure sensibilité et résolution angulaire que par le satellite précédent WMAP) et de polarisation du fond diffus cosmologique. Ces observations ont permis d'affiner la proportion des composants actuels de l'Univers et de confirmer en détail le modèle cosmologique standard d'évolution de l'Univers primordial et des grandes structures.

En plus des 150 articles de la collaboration Planck auxquels il a contribué, F. Bouchet est l'auteur d'environ 90 autres articles scientifiques et de 70 présentations dans des conférences, essentiellement sur les aspects modernes de la cosmologie et sur la caractérisation des grandes structures de l'Univers.

F. Bouchet est indéniablement un physicien de grand talent, qui a largement contribué à l'amélioration de nos connaissances en cosmologie. La SFP est heureuse de lui attribuer le prix Émilie du Châtelet 2016 pour ses travaux exceptionnels en astrophysique, notamment sur la formation et l'évolution des grandes structures, et pour son "leadership" dans la mission spatiale Planck.

**Prix Émilie du Châtelet**

**Depuis 2016, la Société Française de Physique a souhaité honorer la mémoire d'Émilie du Châtelet, première femme de science en France, en décernant tous les deux ans (en alternance avec le prix Félix Robin) un Prix Émilie du Châtelet à un(e) physicien(ne) ou une équipe de chercheurs/euses pour le/les récompenser pour l'ensemble de ses/leurs travaux.**

© Collège de France

## Prix **Friedel-Volterra 2016** (conjoint SIF-SFP) : **Gabriele Veneziano**

Gabriele Veneziano est un physicien italien, né à Florence en 1942. Après des études de physique théorique à l'université de Florence, il effectue ses travaux de thèse à l'Institut Weizmann en Israël, thèse qu'il soutient en 1967. Il travaille ensuite au MIT. En 1972, il devient professeur de physique à l'Institut Weizmann. Puis, en 1976, il entre au CERN, dans la division de physique théorique, qu'il dirige entre 1994 et 1997. De 2004 à 2013, il est professeur au Collège de France, à la chaire « particules élémentaires, gravitation et cosmologie ».

Gabriele Veneziano est considéré comme le père de la théorie des cordes, qui vise à unifier la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale. En 1968, dans un article publié dans *Nuovo Cimento*, il découvre une formule mathématique pour décrire les processus d'interaction nucléaire forte comme des collisions entre des cordes longues d'environ un femtomètre ($10^{-15}$ m).

En 1984, cette première théorie des cordes a été réinterprétée comme une théorie quantique des interactions fondamentales, incluant la gravité. G. Veneziano est alors l'un des tout premiers théoriciens à en rechercher les implications cosmologiques.

En utilisant de nouvelles symétries des équations d'Einstein modifiées par la théorie des cordes, il propose en 1991 une cosmologie révolutionnaire dans laquelle le big bang, traditionnellement identifié au commencement des temps, est remplacé par un « big bounce » (grand rebond) reliant notre ère « post big bang » à une phase antérieure « pré big bang » : ceci implique une cosmologie sans origine des temps.

L'une des prédictions les plus spectaculaires de ce nouveau scénario est l'existence d'un bruit de fond stochastique d'ondes gravitationnelles accessible aux interféromètres actuels ou construits dans un futur proche, sur Terre ou dans l'espace. La détection récente d'ondes gravitationnelles résultant de la coalescence de deux trous noirs rend la possibilité de cette observation encore plus réaliste et enthousiasmante.

Les sociétés italienne et française de physique félicitent Gabriele Veneziano d'avoir été à l'origine de la théorie des cordes et, plus récemment, de l'avoir appliquée à la cosmologie de l'Univers primordial, au big bang et au problème de l'origine des temps.

**Prix Friedel-Volterra**

**Le prix Friedel-Volterra est un nouveau prix créé en 2015 par un accord entre la société italienne de physique (SIF) et la SFP. Il est décerné tous les ans, alternativement à un physicien italien et à un physicien français. Gabriele Veneziano en est le premier lauréat.**

## Prix **Holweck 2017** (conjoint IoP-SFP) : **Victor Malka**

Victor Malka a 55 ans. Après des études de chimie à Rennes et une maitrise de physique à l'université d'Orsay, il effectue ses travaux de thèse, soutenue en 1990 à l'École polytechnique, sur la physique atomique des plasmas chauds. Recruté par le CNRS au Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), il est maintenant directeur de recherche au Laboratoire d'optique appliquée (LOA, Palaiseau) et, depuis 2015, professeur à l'Institut Weizmann (Israël).

Victor Malka est mondialement reconnu dans le domaine de la physique des plasmas. Physicien innovant, il a contribué au développement des accélérateurs laser de particules, qui pourraient être utilisés dans l'avenir en physique des hautes énergies, à celui des lasers à électrons libres (FEL), et aussi à plusieurs domaines en lien avec la santé (radiothérapie, protonthérapie, imagerie X à contraste de phase).

Le parcours scientifique de Victor Malka est exemplaire par la diversité des thématiques abordées. Au LULI, il a mené des recherches de pointe dans les domaines de la fusion inertielle, de la génération de chocs et de l'accélération de particules. En physique de l'interaction plasma-laser, ses résultats sont importants, en particulier ceux sur les instabilités paramétriques et hydrodynamiques. Le nouveau sujet développé au LOA, la construction d'accélérateurs compacts « tout laser », provoque un engouement extrêmement fort au plan international.

Après les premières expériences de sillage laser dans le régime linéaire qui produisaient des champs accélérateurs de l'ordre du GV/m, Victor Malka a montré qu'il existait un régime plus efficace, le sillage non linéaire qui permet l'obtention de champs accélérateurs de plusieurs centaines de GV/m. Il a démontré la possibilité de produire de façon stable et reproductible des faisceaux d'électrons relativistes de très bonne qualité (dispersion en énergie de 1%) et à très forts courants.

Victor Malka est un chercheur extrêmement brillant, très prolifique et reconnu (plus de 200 publications dans des revues à comité de lecture et plus de 150 conférences invitées), avec une ouverture pertinente vers l'industrie (source de rayons gamma pour le contrôle non destructif des matériaux). Il participe activement à la valorisation de la recherche française à travers ses interventions dans les médias et ses publications dans des revues pour le grand public. La SFP et l'Institute of Physics sont heureux de lui décerner le prix Holweck 2017.

# Olympiades de Physique France
## XXIVe concours national

**C'est à l'invitation de la délégation de Provence de la Société Française de Physique et de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie que la finale du concours des Olympiades de Physique France a été accueillie par Aix-Marseille Université, les 27 et 28 janvier 2017 sur le site de Saint-Charles.**
**Cette 24e édition du concours national, qui a rassemblé 25 équipes sélectionnées en France et dans les établissements français de l'étranger grâce à l'implication de l'AEFE (Agence pour l'enseignement français à l'étranger), a été parrainée par Jean-Pierre Luminet, directeur de recherches au CNRS, astrophysicien au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, au Centre de Physique Théorique de Luminy et à l'Observatoire de Paris.**

### Excellents résultats au concours international Intel ISEF 2016 d'une équipe lauréate des XXIIIes OdPF

L'équipe du lycée Vauvenargues d'Aix-en-Provence, lauréate des XXIIIes Olympiades de Physique France en janvier 2016 (*Reflets de la physique* n°**50** (septembre 2016), p. 41), a participé au concours international Intel ISEF qui s'est déroulé du 8 au 13 mai 2016 à Phoenix (Arizona).

L'équipe du lycée Vauvenargues, lauréate au concours ISEF à Phoenix, en mai 2016.

Sous le titre *Oscillating a drop of water*, issu du développement du projet présenté aux Olympiades de Physique France (*Oscillations d'une goutte d'eau*), l'équipe aixoise a remporté les meilleurs résultats jamais obtenus par une équipe française à ce concours – dans lequel les trois-quarts des projets en compétition ne remportent aucun prix :
- un prix de 3000 $, offert par United Technologies Corporation,
- un troisième prix au Grand Award (1000 $ de récompense).

*L'ISEF (International Science and Engineering Fair) est le plus grand concours scientifique du monde pour les jeunes de 15 à 20 ans. Créé en 1950, il est organisé par la SSP (Society for Science and the Public), une société à but non lucratif, basée à Washington D.C. (USA). Il est parrainé depuis 1997 par la société internationale Intel Corporation.*

*Environ 1800 élèves de l'enseignement secondaire issus de plus de 75 pays, régions et territoires, ont l'occasion de présenter leurs travaux de recherche personnels et de concourir pour environ 4 millions de dollars de prix. Aujourd'hui, des millions d'étudiants dans le monde entier participent à des concours scientifiques locaux, régionaux et nationaux, dont les gagnants obtiennent la possibilité de participer au concours Intel ISEF.*

Nous présentons ici deux projets, sur lesquels les équipes ont effectué un magnifique travail expérimental couronné d'un premier prix. On rappelle que le jury favorise l'originalité de la démarche, le soin accordé aux réalisations expérimentales et à leur exploitation, la qualité de la présentation et des démonstrations effectuées, la rigueur de la démarche de recherche et l'implication de l'ensemble de l'équipe.

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

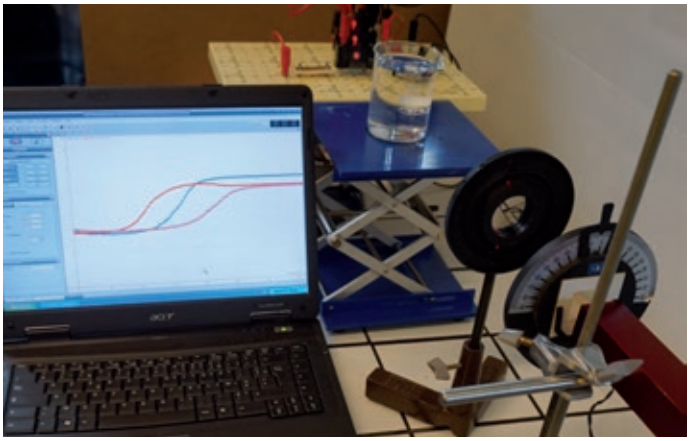
### Les mystères de la tasse

*Lycée Pilote Innovant International, Jaunay-Clan*
(département de la Vienne)

Le projet est issu d'une observation quotidienne : la tasse du petit déjeuner « chante » lorsque nous la heurtons – modérément – avec la cuillère. L'équipe de Jaunay-Clan a cherché à caractériser la nature de ce son, les phénomènes mis en œuvre, l'influence de la hauteur et de la nature de la boisson. Grâce à trois logiciels d'acquisition et d'analyse spectrale (Latis Pro, Audacity et FFT Spectrum Analyser), ils ont pu mettre en évidence les différentes fréquences propres présentes. Poussant l'étude des analogies et différences avec les fréquences propres d'une corde de guitare, ils ont songé au rôle que devaient jouer les ondes de flexion du matériau de la tasse, qui sont fortement dispersives.

L'équipe a également mis en évidence et étudié un phénomène particulièrement spectaculaire : lorsqu'on ajoute, dans une tasse de lait (ou d'eau) préalablement chauffé(e), du chocolat en poudre, la fréquence de la note émise augmente progressivement – mais nettement – au cours du temps (multiplication par 1,6 en 40 secondes !) ; les lycéens ont établi expérimentalement le rôle de la présence de petites bulles d'air, en imaginant un protocole de comptage des bulles en fonction du temps.

La présence de ces bulles, sans impact appréciable sur la masse volumique de la boisson, modifie de façon sensible sa compressibilité. L'évolution de la fréquence lorsque les bulles d'air se dégagent montre ainsi l'existence d'un couplage entre les ondes de flexion de la tasse et celles du liquide.



**Lycée Jaunay-Clan.** Les mystères de la tasse : dispositif de comptage des bulles et relevés d'évolution à différentes profondeurs.

**École alsacienne.** L'analyse spectroscopique de la lumière émise par les arcs a permis une identification des gaz présents dans le mélange de la boule plasma étudiée (néon, xénon, traces de krypton).

## Caractérisation d'une boule plasma

*Lycée : École alsacienne, Paris*

La boule plasma a procuré à une des équipes de l'École alsacienne l'occasion d'étudier les propriétés et conditions d'obtention de décharges dans un plasma froid, en gardant à l'esprit le nécessaire respect des règles de sécurité.

Les lycéens ont étudié la répartition et l'évolution de la température (grâce à un thermomètre à infrarouge), en cohérence avec l'observation de la lente convection des arcs.

Grâce à une caméra ultra-rapide (jusqu'à 100 000 images par seconde), ils ont suivi la naissance des « filaments », leur intermittence et leur stabilisation sur les canaux d'ionisation. Par deux méthodes, ils ont pu mesurer la fréquence des oscillations du circuit électronique alimentant la boule plasma.

L'utilisation d'un spectrogoniomètre à prisme, couplé à un appareil photographique dont les lycéens ont réglé le temps de pose, a permis une analyse spectroscopique. ▮

**Le Comité national**
www.odpf.org

Le fonctionnement des Olympiades de Physique France, créées à l'initiative de la Société Française de Physique et de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, est notamment assuré, sous le haut patronage de Monsieur le ministre de l'Éducation nationale, grâce à ses mécènes. Pour la XXIV$^{e}$ édition, ceux-ci étaient : *Agence pour l'enseignement français à l'étranger, CNRS, Fondation Nanosciences, Labex Palm (Physique, Atomes, Laser, Matière), Intel, Fondation iXcore pour la Recherche, Fondation CFM pour la Recherche, Saint-Gobain, Aix-Marseille Université.*
Le comité national des Olympiades de Physique France remercie tous les partenaires, les laboratoires scientifiques ayant accueilli les lauréats et les autres donateurs qui ont également contribué au succès de la XXIV$^{e}$ édition du concours. Sa reconnaissance s'adresse aussi à tous les acteurs bénévoles de cette réussite.

# Une conférence de Pierre Léna lors de la journée d'hommage à Pierre Soutif

**Le 23 mars 2017, un hommage a été rendu sur le campus de Saint-Martin-d'Hères à Michel Soutif par l'Université Grenoble Alpes et l'UFR PhITEM. Une plaque a été dévoilée dans le hall du bâtiment qui porte désormais son nom. Lors de cette journée, les importantes contributions de Michel Soutif ont été soulignées, tant ses apports scientifiques, ses qualités de bâtisseur, que ses apports en histoire des sciences [1].**

À l'occasion de cette cérémonie, Pierre Léna nous a donné une conférence où il a rappelé les idées qui sous-tendent la pédagogie « alternative » de l'expérience *La main à la pâte*, qu'il a illustrée par deux exemples :

- la perception des liens entre la trajectoire du soleil et le temps, au cours d'une leçon, dans la cour de l'école [2] ;
- la découverte, par les enfants d'une classe de CP, de la mémoire d'une souris, grâce à des expériences menées durant une année à l'aide d'un labyrinthe [3].

Au-delà du bonheur et de l'impact sur la pensée des enfants que suscitent ces actions, Pierre Léna a également porté un regard lucide sur leur bilan : au bout de vingt ans, le pourcentage d'étudiants qui poursuivent des études scientifiques n'a finalement pas beaucoup évolué. P. Léna a souligné l'importance de poursuivre ces actions au collège, d'améliorer les liens entre l'école et le collège, et de former des professeurs à l'enseignement des sciences. Il a exprimé un avis critique sur un retour exclusif à l'enseignement des « fondamentaux », qui négligerait par là même les enseignements dont le moteur est la curiosité. Il a enfin insisté sur le développement des *Maisons pour la science*, qui couvrent le territoire avec actuellement neuf académies concernées, portant l'espoir de mieux former un plus grand nombre d'enseignants [4]. ▮

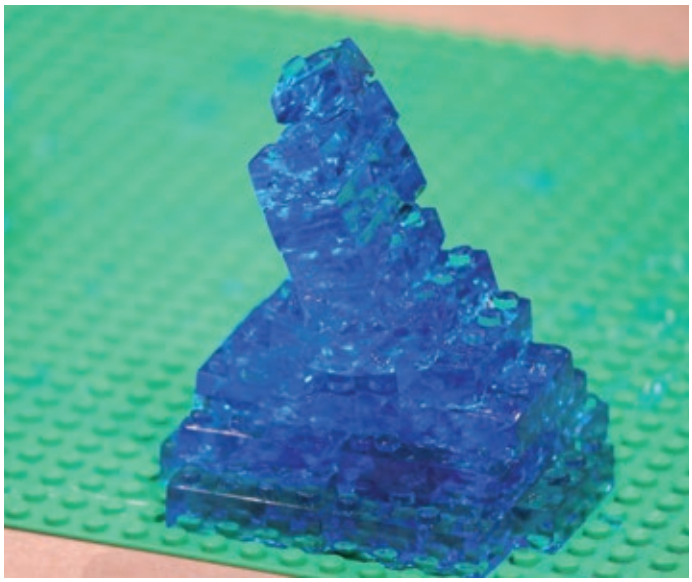
[1] M. Schlenker, *Reflets de la physique* **51** (2016) 44.
[2] www.fondation-lamap.org/fr/page/11433/ombres-et-lumiere
[3] http://chercheursenherbe.crdp-lorraine.fr/spip.php?article310
[4] P. Léna, *Reflets de la physique* **42** (2014-2015) 30.

# La France toujours bien placée dans **l'International Physicists' Tournament !**

© Mia Halleröd Palmgren/Chalmers

Les participants de l'IPT 2017.

**Du 8 au 13 avril dernier s'est tenue à Göteborg (deuxième ville de Suède) la neuvième édition de l'International Physicists' Tournament (IPT, http://iptnet.info). Ce tournoi, dans lequel la France est impliquée *via* la Commission Jeunes de la SFP depuis 2013, rassemble une centaine d'étudiants (de niveau licence à master) du monde entier autour de problèmes ouverts de physique (voir les articles dans *Reflets de la physique* n°44-45 (2015) 7 et n°51 (2016) 40-41).**



© Maxime Harazi

**1. Un des dix-sept problèmes posés consistait à construire la tour la plus haute possible en LEGO gélatineux.**

## IPT 2017 : un grand succès

Cette année, les étudiants ont étudié entre autres, la fission d'une goutte de ferrofluide face au champ d'un aimant, le vol d'un jouet planeur, le bruit émis par un grain de maïs qui éclate, les traînées d'eau que laissent derrière elles les voitures roulant sur une route mouillée, ou encore ont construit une tour en LEGO gélatineux (photo 1). Après avoir travaillé de septembre à mars dans leurs universités sur dix-sept problèmes (voir la liste complète sur http://2017.iptnet.info/problems), les étudiants ont présenté lors du tournoi de Göteborg leurs résultats sous la forme de joutes oratoires structurées.

En 2017, dix-huit équipes de quinze pays (136 étudiants au total) participaient, et de nombreux pays étaient nouveaux dans la compétition : le Brésil, le Venezuela, les États-Unis, la Slovénie, la Croatie et l'Italie. Il faut par ailleurs noter que le Brésil et le Venezuela ont dû faire preuve de grands efforts pour venir, en raison bien sûr des difficultés financières liées aux prix des billets d'avion. Ces pays ont notamment mis en place des campagnes de financements participatifs, qui ont connu un succès retentissant au niveau national, leur permettant de rassembler plusieurs milliers d'euros grâce au soutien de centaines de personnes dans les deux pays.

Au terme de quatre joutes « qualificatives », la France, la Suède et l'Ukraine se sont retrouvées en finale. Celle-ci a commencé par un défi original, et très suédois, pour déterminer l'ordre de passage des équipes : monter un meuble IKEA inconnu sans les instructions (photo 2) ! Après ce défi, les trois équipes se sont affrontées durant trois heures intenses autour de trois problèmes de la liste, pour arriver au classement final : l'Ukraine à la première place, la Suède en deuxième, et la France en troisième. Il est cependant à noter que l'écart de points entre la première et la troisième équipe

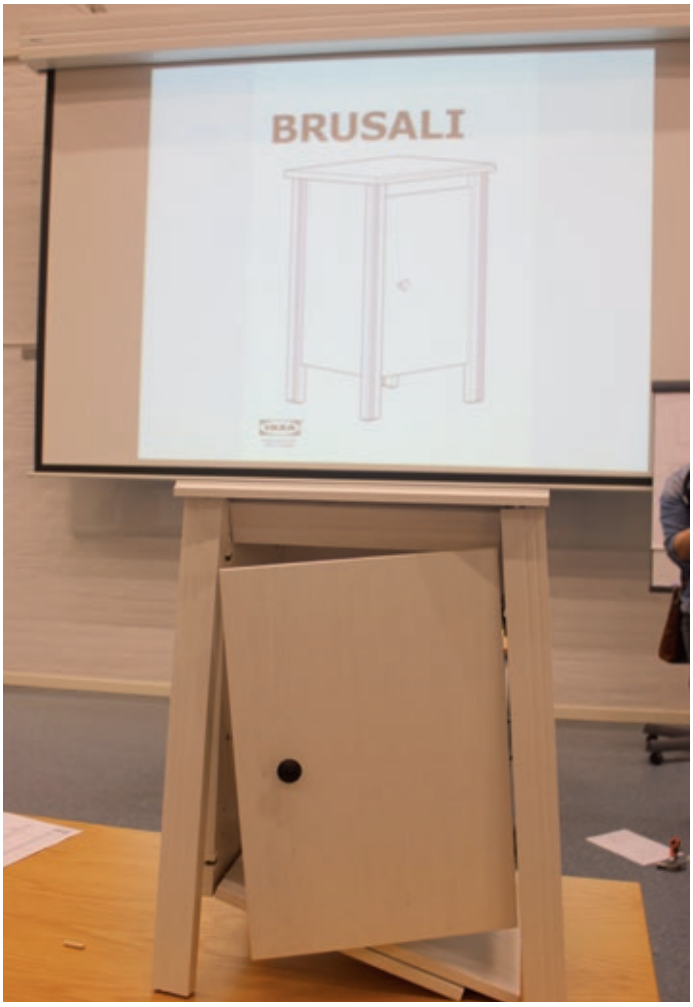
est seulement de 0,8 points sur 33 ! (Le classement total est donné dans l'encadré.)
L'IPT 2017 a été un grand succès, et la France a une fois de plus réussi à se hisser sur le podium, comme à chacune de ses précédentes participations. Bravo à nos étudiants, venus de l'ENS de Lyon[(a)] et de l'École polytechnique[(b)] ! Ces derniers seront reçus à l'Académie des sciences à l'automne et pourront visiter le laboratoire du CEA de leur choix.

Même si le lieu de la prochaine édition de l'IPT n'est pas encore connu, le tournoi se prépare déjà, puisque la liste des dix-sept prochains problèmes est en cours de constitution. De même, l'organisation du French Physicists' Tournament 2018 (http://france.iptnet.info) a commencé, et nous invitons comme toujours les responsables pédagogiques qui souhaiteraient créer une équipe dans leur établissement à nous contacter sans attendre pour participer ! Il se dit que de nouvelles équipes françaises ont déjà commencé à se préparer... ▮

**Maxime Harazi**
Président du French Physicists' Tournament (fpt@sfpnet.fr)
Président de la Commission Jeunes de la SFP (jeunes@sfpnet.fr)

**IPT 2017 – Classement**

1 - **Ukraine** - University of Kharkiv
2 - **Suède** - Chalmers University of Technology
3 - **France** - École polytechnique, Palaiseau
4 - **France** - École normale supérieure de Lyon – Université de Lyon
5 - **Russie** - Voronezh State University
6 - **Italie** - Politecnico di Milano & University of Milan
7 - **Allemagne** - Goethe University Frankfurt
8 - **Suède** - KTH Royal Institute of Technology
9 - **Russie** - Moscow Institute of Physics and Technology
10 - **Croatie** - University of Zagreb
11 - **Brésil** - Federal University of ABC
12 - **Grèce** - University of Athens
13 - **Suisse** - École Polytechnique Fédérale de Lausanne
14 - **Colombie** - Universidad de los Andes
15 - **USA** - Dartmouth College
16 - **Venezuela** - Universidad Simon Bolivar
17 - **Chine** - Nankai University
18 - **Slovénie** - University of Ljubljana




© Maxime Harazi.

**2. Un des défis posés en introduction de la finale consistait à construire un meuble IKEA inconnu... sans les instructions.**

(a) Liste des membres de l'équipe de l'ENS de Lyon : Quentin Marsal (capitaine), Jeanne Bernard, Élise Camus, Tristan Guyomar, Léa Lachaud, Flavien Museur, Louison Thorens, Jérémy Ferrand (encadrant), Nicolas Plihon (encadrant), Nicolas Taberlet (encadrant).

(b) Liste des membres de l'équipe de l'École polytechnique : Corentin Reiss (capitaine), Alexis Bacot, Felix Bastit, Lucien Cousin, Pierre Goux, Deborah Sulem, Guilhem Gallot (encadrant), Thibault Guillet (encadrant).

# La Commission Jeunes de la SFP lance son site !

Après plusieurs mois de travail, la Commission Jeunes de la Société Française de Physique lance son site Internet, à l'adresse suivante : **http://jeunes.sfpnet.fr.**
Ce site rassemble les différentes actions menées par la commission (ainsi que les membres impliqués), donne une liste d'événements destinés aux jeunes physiciennes et physiciens, mais aussi et surtout héberge son nouveau *blog* : « Le Rayon » (un rapport avec les *Reflets de la physique* ?). Ce *blog* a pour vocation de donner régulièrement (environ toutes les deux semaines) la parole à de jeunes chercheuses et chercheurs pour leur permettre de présenter leurs résultats récents sous une forme pédagogique, à destination des étudiants. Les premiers articles sont déjà en ligne et traitent notamment de communication à base de nanotechnologie, de mélanges superfluides, ou encore de filtrage de l'eau inspiré par le rein. N'hésitez pas à y faire un tour et à proposer vous aussi vos articles !

**Maxime Harazi** (jeunes@sfpnet.fr)
Président de la Commission Jeunes de la SFP

# La Nuit des ondes gravitationnelles, une célébration scientifique et festive pour le grand public

**Le CNRS et la Société Française de Physique ont organisé le 20 mars 2017 « La Nuit des ondes gravitationnelles » dans une quinzaine de villes de France et d'Italie. Avec des conférences scientifiques, des visites virtuelles de laboratoires, un *quizz* et une projection d'extraits de films commentés, ainsi que l'annonce des prix des différents concours lancés auprès des élèves et du grand public quelques mois plus tôt, cet événement ouvert à tous a célébré, de façon festive et avec une grande adhésion du nombreux public présent, la découverte des ondes gravitationnelles annoncée en février 2016 [1, 2].**

**Les lauréats du concours « Entendre une onde gravitationnelle » (élèves de terminale S du lycée Louis Aragon à Héricourt, Haute-Saône) visitant l'interféromètre Virgo.**

1. La photo « Comment détecter des phénomènes cataclysmiques *via* des signaux délicats ; comment voir au-delà des limites de la physique ? » d'Audrey Hess, premier prix du concours « Photo dans l'œil du trou noir », catégorie « Tout public ».

La Nuit des ondes gravitationnelles a été l'occasion pour des lycéens, des étudiants, des enseignants et, plus généralement, pour de nombreuses personnes férues de science, de s'informer et d'échanger avec des scientifiques sur cette découverte majeure. Cette grande soirée festive s'est tenue simultanément dans onze villes en France et deux en Italie : Paris, Annecy, Bordeaux, Dunkerque, Limoges, Lyon, Lille, Nancy, Nice, Orléans, Strasbourg, Cascina (le site du détecteur Virgo, près de Pise) et Florence (à l'Institut Culturel Français).

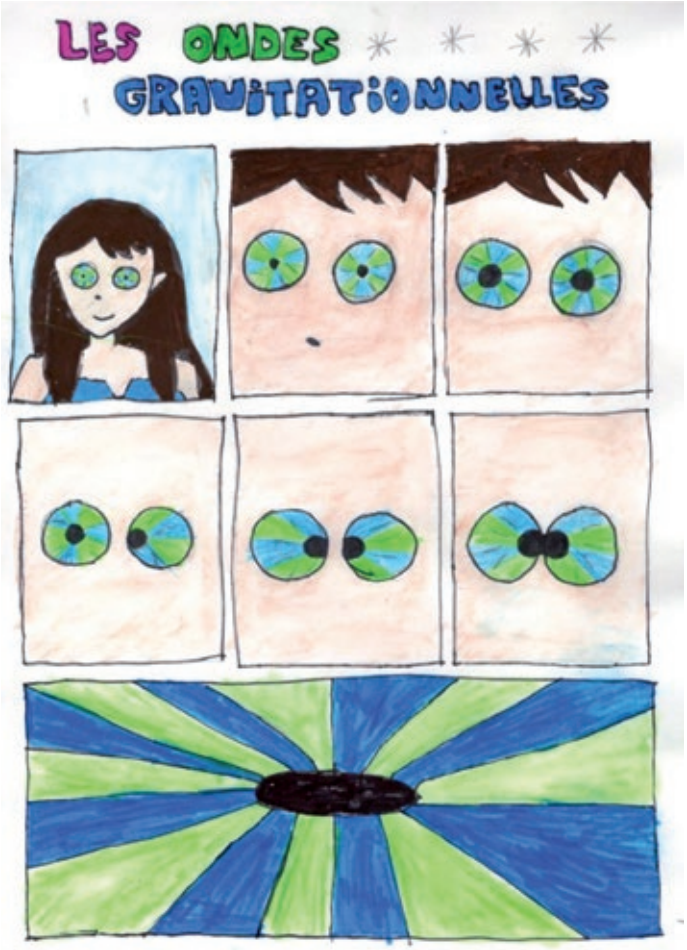
En amont de cette soirée exceptionnelle, quatre concours mêlant art et science ont été organisés à destination des scolaires, des étudiants et du grand public :

- photos « déformées par un trou noir » (à l'aide de l'application pour téléphone portable "Pocket Black Hole", téléchargeable gratuitement [3]) (fig. 1) ;
- nouvelles ou bandes dessinées autour du thème des ondes gravitationnelles et des trous noirs (fig. 2) ;
- détection du signal caractéristique d'ondes gravitationnelles émis par la fusion de deux trous noirs, converti au préalable en son et dissimulé dans un environnement sonore bruyant ;
- génération « d'ondes gravitationnelles » : il s'agissait d'utiliser au mieux les analogies acoustiques, mécaniques, électromagnétiques, optiques des ondes gravitationnelles pour réaliser un montage original comportant quelques mesures.

Les concours techniques « détection et génération d'ondes gravitationnelles » n'ont pas rencontré d'écho notable dans le public, puisqu'à peine une petite dizaine de dossiers (au demeurant tous d'excellente qualité) ont été reçus. Par contre, les concours artistiques ont très bien fonctionné puisqu'au total une centaine de dossiers ont été déposés dans les différentes catégories. Le palmarès peut être consulté sur le site www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles, où l'on trouvera également le détail des présentations scientifiques données dans les différentes villes, les questions du quizz de milieu de soirée (décrit ci-dessous), ainsi que l'enregistrement vidéo de la conférence sur « La relativité au cinéma » à Paris.

La soirée du 20 mars a commencé à 18 h 30 par des exposés scientifiques dans des salles toutes pleines, rassemblant au total 5000 personnes, et dans une excellente ambiance. À Paris, au Grand Rex plein à ras bord avec ses 2700 places (!), la conférence a été animée par Alain Cirou, directeur de la rédaction du magazine *Ciel et Espace*, partenaire de l'événement. Les orateurs sont revenus sur la découverte des ondes gravitationnelles et sur les deux avancées majeures dont elle s'accompagne :

- d'une part la possibilité de détecter, grâce à des prouesses technologiques particulièrement ardues, des signaux très ténus ;




2. La bande dessinée « Les ondes gravitationnelles », réalisée par Coline Marsal (CM1) sous la houlette d'Audrey Dato (atelier de dessin de Quaix-en-Chartreuse, Isère), premier prix du concours « Nouvelles et bandes dessinées ».

c'est le résultat de projets au long cours, menés par des collaborations internationales grâce au soutien d'organismes de recherche – notamment le CNRS en France, l'INFN en Italie et la NSF aux États-Unis ;

- d'autre part, l'ouverture d'une nouvelle astronomie basée sur l'étude de phénomènes astrophysiques d'une violence inouïe qui passaient auparavant complètement inaperçus ; et la possibilité de mener des tests encore plus poussés de la théorie de la relativité générale. À ce propos, il est remarquable que la découverte des ondes gravitationnelles ait eu lieu exactement 100 ans après leur prédiction par Albert Einstein !

Puis, vers 20 h 15, tous les sites ont été interconnectés par vidéo. Animée en direct depuis le Grand Rex par la « youtubeuse » Florence Porcel, cette deuxième partie de soirée aurait dû débuter par la visite en direct de la salle de contrôle du détecteur Virgo à Cascina (Italie). Cette expérience européenne (France, Italie, Pays-Bas, Pologne, Hongrie et Espagne), à laquelle participe le CNRS, est pleinement impliquée dans la découverte des ondes gravitationnelles au côté de son équivalent LIGO – dont les deux détecteurs sont aux États-Unis. Un problème technique n'a malheureusement pas permis de réaliser cette connexion, mais les spectateurs ont pu découvrir le cœur de l'interféromètre installé à Cascina, ainsi que les prouesses technologiques nécessaires à sa construction.

Le quizz était composé de sept questions comportant chacune quatre réponses possibles repérées par une couleur (jaune, rouge, verte ou bleue), certaines loufoques, d'autres beaucoup plus sérieuses. Chaque salle a pu voter au moyen de cartons colorés, disposés au préalable dans les salles – à raison d'un jeu de cartons pour deux spectateurs. Ce mécanisme a très bien fonctionné ; l'ambiance était partout électrique puisque des lots récompensaient les salles avec le meilleur total de bonnes réponses. Cinq villes sont arrivées en tête et ont été départagées par leur taille – la palme revenant à la plus petite d'entre elles. Dunkerque, Orléans et Strasbourg sont ainsi montées sur le podium.

Ensuite, un film a illustré les traitements de surface effectués au Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) de Lyon-Villeurbanne sur les miroirs de LIGO et de Virgo. Cette étape, d'une extrême technicité et qui demande une grande précision, est essentielle car les performances des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles (Virgo et LIGO) dépendent en grande partie de la qualité de leurs miroirs. Enfin, la soirée s'est conclue par une séquence « Science et cinéma » présentée par Richard Taillet (LAPTh-Université Savoie Mont Blanc) et Quentin Lazzaroto de l'Institut Henri Poincaré (IHP). Ils ont montré d'une façon à la fois amusante et profonde comment la relativité restreinte et la relativité générale ont été utilisées au cinéma dans de nombreux films de science-fiction de 1940 à nos jours, selon des angles d'approche divers qui ont été analysés avec finesse.

En conclusion, cette soirée a été très réussie, si l'on en juge par tous les commentaires reçus, à la fois dans les différentes salles mais aussi sur les réseaux sociaux, où notre « Nuit » a disputé la première place à un débat sur l'élection présidentielle programmé ce jour-là, et sur Internet où la soirée a été suivie en *webcast* par plusieurs milliers de personnes. Le public est manifestement très friand de ce type de manifestation et il appartient à notre communauté scientifique d'exploiter nos découvertes pour organiser d'autres « Nuits » du même genre qui brilleront d'autant de feux !

Nous tenons à remercier tous ceux qui se sont investis dans cette aventure : le CNRS, la Société Française de Physique, l'expérience Virgo et l'European Gravitational Observatory, et les laboratoires participants. Merci aux correspondants locaux de la SFP, sans qui il n'aurait pas été possible de faire participer autant de sites. ▮

**Guy Wormser**[(a)] **et Nicolas Arnaud**[(b)]
(a) Coordinateur de l'événement, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (Orsay)
(b) Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (Orsay) et European Gravitational Laboratory (Cascina)

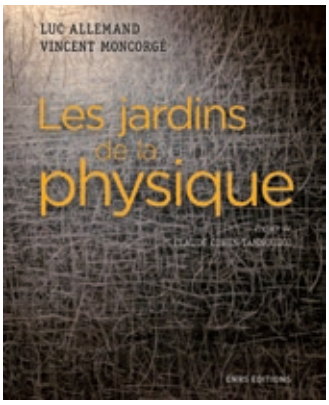
## Références

1 • L. Blanchet, « Les ondes gravitationnelles, cent ans après Einstein », *Reflets de la physique* n°**52** (février 2017) 6-12.
2 • N. Arnaud, « Les premières détections des ondes gravitationnelles », *Reflets de la physique* n°**52** (février 2017), 14-20.
3 • www.laserlabs.org/pocketblackhole.php

# Les Jardins de la physique

**En physique comme dans les autres domaines de la recherche scientifique, les découvertes majeures surviennent rarement subitement. Elles résultent plutôt d'un long processus de maturation, nourri de rencontres et d'échanges d'idées, de travail continu et acharné. Dans un quotidien aujourd'hui pressé et orienté vers la productivité, comment et où trouver les conditions propices à une réflexion libre et créative, sur le temps long, destinée à nourrir une recherche d'excellence, innovante ?**
**En France, il existe deux hauts-lieux de la physique, des « jardins de la connaissance » où, loin des laboratoires, en contact avec la nature, se rassemblent des savants du monde entier pour penser et élaborer la physique de demain : l'Institut d'Études scientifiques de Cargèse, en Corse, et l'École de Physique des Houches, dans les Alpes, en face du Mont-Blanc.**

Ces écoles sont nées dans les années 1950 de l'ambition de chercheurs engagés et visionnaires, Cécile DeWitt-Morette aux Houches et Maurice Levy à Cargèse, dont l'ambition était de porter au plus haut niveau la physique française et de combler le retard accumulé à l'époque vis-à-vis d'autres pays, tels que l'Allemagne ou les États-Unis, en matière de physique quantique et de théorie relativiste des champs.
Il était nécessaire pour cela de rassembler un large éventail de scientifiques de toutes générations et de tous horizons, de proposer aux jeunes chercheurs des cours dispensés par les plus grands spécialistes mondiaux sur des sujets scientifiques émergents, afin de partager et faire progresser les savoirs. Nombre de lauréats du Prix Nobel de physique, tels Claude Cohen-Tannoudji, sont ainsi passés à l'École de physique des Houches, d'abord comme élèves puis comme enseignants. Quoi de plus motivant et formateur pour les jeunes scientifiques que de partager le quotidien de ces derniers, de discuter de physique, de poser des questions, en partageant les repas, ou en se promenant ensemble ? Ces écoles permettent de lancer de brillantes carrières internationales, et ouvrent l'accès à des réseaux scientifiques indispensables…
Depuis 60 ans, le succès de ces écoles a servi d'exemple à d'autres disciplines et a été repris ailleurs dans le monde. Les fondateurs ont gagné leur pari : les sujets abordés dans le cadre de ces écoles de physique, novateurs, ont plus que souvent été couronnés par la suite de découvertes importantes ou de prix prestigieux. C'est le cas par exemple du boson de Higgs, de la matière molle, du graphène, ou encore des atomes froids et de l'imagerie sismique.




Luc Allemand et Vincent Moncorgé
*Préface de Claude Cohen-Tannoudji*
(CNRS Éditions, 2017, 160 p., 20 €)
Cet ouvrage a été créé à l'initiative de l'Institut de physique du CNRS.

Ce livre rend hommage aux personnalités remarquables qui sont à l'origine de ces lieux exceptionnels, et à celles et ceux qui, collectivement, continuent d'œuvrer pour leur pérennité. Il est dédié à Cécile DeWitt-Morette, physicienne de renom et fondatrice de l'École de Physique des Houches, disparue le 8 mai 2017 à l'âge de 94 ans. Elle a poursuivi toute sa vie son engagement pour la physique française d'excellence et la transmission des savoirs. Si la physique reste, pour les non-spécialistes, souvent nimbée de mystère, cet ouvrage offre la possibilité de découvrir la vision du monde des physiciens, et montre comment la communauté scientifique se fédère et travaille pour le bien de tous, loin des regards, mais toujours ouverte sur le monde qu'elle contribue à construire. ▮

**Marie Signoret,** responsable de la communication de l'INP

## Cirano de Dominicis, une grande figure française de la physique théorique

Cirano de Dominicis (1927-2017) a apporté à la physique théorique des contributions majeures. Il faisait partie de la génération des jeunes physiciens qui, au sortir de la Seconde Guerre mondiale, ont conduit à la renaissance de la physique, notamment théorique, en France.

D'origine modeste, il fait ses études au lycée Masséna de Nice ; il obtient le prix de géographie au Concours général, et entre en 1948 à l'École polytechnique, d'où il sort dans le Corps des mines. Passionné par la physique théorique, il participe au cours des étés 1953 et 1954 à l'École des Houches, seul enseignement de niveau prédoctoral en physique existant alors en France, puis bénéficie du décret « Suquet », selon lequel de jeunes membres des Corps peuvent être affectés dans des laboratoires de recherche. Il complète ainsi sa formation au MIT puis à Birmingham où, sous la direction de Rudolf Peierls, il soutient en 1957 une thèse où les noyaux atomiques sont traités en tant qu'assemblées de nucléons en interaction, approche novatrice à l'époque. Il se lie ainsi avec Paul Martin et Gerry Brown, avec qui il continuera à collaborer.

De retour en France, il se fixe dans le groupe naissant de physique théorique de Saclay, où se déroulera toute sa carrière, hormis de nombreux séjours à l'étranger. Avec Claude Bloch, il y joue un rôle de pionnier dans la théorie naissante du problème à N corps ; on leur doit le développement en diagrammes des fonctions thermodynamiques, qui permet grâce à des sommations partielles, une approche théorique aux liquides quantiques. Il fournit avec Roger Balian un fondement microscopique exact à la théorie de Landau des liquides de Fermi et de Bose à l'équilibre, et a à son actif des travaux avec Philippe Nozières, François Englert, James Langer, Gérard Toulouse, entre autres. Ses travaux sur la renormalisation le rendent alors prêt à contribuer au cours des années 1970 à la théorie des phénomènes critiques (avec Édouard Brézin et Jean Zinn-Justin, Daniel Amit, Paul Martin notamment).

Il se consacrera ensuite pleinement à ce qui deviendra son sujet de prédilection, la mécanique statistique des systèmes désordonnés, et tout spécialement celle des verres de *spin*. En particulier, il se lance avec ses collaborateurs (Andrea Crisanti, Imre Kondor et Tamas Temesvari principalement) dans le programme de déterminer si les propriétés très particulières de la théorie du champ moyen des verres de *spin* (la fameuse solution de Parisi avec un schéma de brisure hiérarchique de la « symétrie des répliques ») se retrouvent dans les systèmes physiques en trois dimensions d'espace. Ceci requiert de savoir traiter les fluctuations autour du champ moyen, problème d'une difficulté technique inouïe. La théorie des champs des verres de *spins* qu'il a développée pour ce faire est exposée de façon aussi pédagogique que possible dans un livre publié en collaboration avec Irene Giardina en 2006 [1]. Ces dernières années Cirano avait beaucoup travaillé sur la question de savoir si la théorie des "droplets" (gouttelettes), qui prédit une tout autre physique des verres de *spins* et s'applique en deux dimensions d'espace, pouvait émerger de la théorie des champs des verres de *spins*.

Passionné de sciences, Cirano a toujours été, de par ses origines et ses convictions, très engagé politiquement. Fortement concerné par les questions de société, la justice sociale et la place des plus défavorisés, il mettait en avant l'importance de l'éducation et de la science pour ces questions. Ses collègues et ses amis peuvent en témoigner ! Il s'est également beaucoup engagé pour la communauté scientifique, il a été président de la Société Française de Physique (SFP) en 1972 et a dirigé le Service de Physique Théorique de Saclay de 1971 à 1979. Jusqu'à ses toutes dernières années, il est resté très présent à Saclay, montrant toujours beaucoup d'attention et de sens du contact avec les visiteurs et les jeunes chercheurs. Son énergie et sa productivité scientifique restaient impressionnantes.

Ses travaux ont été couronnés, entre autres, par le prix Jean Ricard de la SFP (1987), par le prix Ampère de l'Académie des sciences (1996) et par la Médaille d'argent du CNRS. Il a été notamment invité à Harvard à la chaire extrêmement prestigieuse de Loeb Lecturer. Il était également chevalier de l'ordre national du Mérite et commandeur des Palmes académiques. C'est une grande figure de la physique théorique du dernier demi-siècle qui nous a quittés.

**Roger Balian, Alain Billoire** et **François David**
Institut de Physique Théorique, CEA/Saclay

[1] C. De Dominicis et I. Giardina, *Random Fields and Spin Glasses: A Field Theory Approach*, Cambridge University Press (2006).

# Cinquante ans de réformes de la physique scolaire

## À propos du livre de Nicole Hulin, *Le savant et le professeur*

Le livre de Nicole Hulin [1] présente, dans le contexte politique de l'époque, les travaux de la « Commission Lagarrigue » qui, de 1971 à 1976, a élaboré un projet de rénovation de l'enseignement de la physique, de la chimie et de la technologie dans l'enseignement secondaire. En complément de la présentation de l'ouvrage par Étienne Guyon [2], nous comparons ici les réformes successives de l'enseignement de la physique qui ont suivi, et évoquons les enjeux et difficultés actuels qui nécessitent des actions vigoureuses immédiates avec, en premier lieu, la création d'une Commission Française pour l'Enseignement de la Physique.

### Quelques rappels sur les travaux de la Commission Lagarrigue

Le projet de rénovation de « l'enseignement de la physique, de la chimie et de la technologie » en France proposé par la Commission Lagarrigue fit partie de la série internationale de projets de modernisation des enseignements scientifiques lancée aux États-Unis en 1956 (Physical Science Study Committee...), fortement stimulée par les succès spatiaux soviétiques [3]. Nicole Hulin et son mari Michel furent respectivement témoin engagé et acteur central de la Commission Lagarrigue.

Le travail de la Commission Lagarrigue fut soigneusement préparé, en prenant le temps d'analyser les disciplines, celui de tester sur un échantillon significatif les projets de réforme et celui de la concertation entre les sociétés savantes (incluant pour la première fois des chercheurs), les associations de professeurs du secondaire et les directions du ministère. La commission avait chiffré les coûts de formation permanente nécessitée par la réforme et réfléchi à l'évaluation au baccalauréat. Les expériences américaines et anglaises avec de nouveaux manuels (cours de Feynman et de Berkeley), et la place centrale de l'expérience de cours furent analysées et transposées pour le secondaire. Le bon niveau en mathématiques des élèves français fut mis à profit, tout en recherchant la simplicité et la clarté des expériences présentées.

Mais le processus a été violemment perturbé en 1974 par le changement de ministre, puis par le décès d'André Lagarrigue en janvier 1975, et enfin par la suppression de la commission en septembre 1976. La création précipitée du collège unique en 1975 a imposé de nouvelles contraintes. Le travail en profondeur ne fut pas perdu, mais son application fut longtemps retardée. La réflexion sur la formation des maîtres ne put pas être menée à son terme. Un deuxième obstacle incontournable fut l'insuffisance du nombre d'enseignants qualifiés disponibles. Une troisième embardée a conduit au développement séparé des enseignements de technologie et de physique au collège.

Pour ce qui est du lycée, les quatre idées fortes de la Commission Lagarrigue restent centrales aujourd'hui [4] :

- enseigner la démarche scientifique avec, depuis l'introduction des sciences physiques au lycée, des expériences de cours et des TP en effectifs réduits ;
- contribuer à la culture de tous (singulièrement celle des littéraires, recommandait la tutelle) ;
- introduire au prix d'une certaine abstraction les grandes lois de conservation et la nature de l'espace-temps ;
- prendre des exemples simples dans les principaux domaines des sciences physiques : mécanique, électromagnétisme, ondes et matière, modèle atomique, thermodynamique, en suggérant autant que possible une approche microscopique.

### Les réformes successives

Les travaux de la Commission Lagarrigue ont fortement influencé les réformes ultérieures de l'enseignement des sciences en France, qui ont été mises en place avec une fréquence approximativement décennale. On peut noter une alternance entre des efforts de concertation avec les mathématiques dans les réformes de 1979 et 2000, et l'attitude opposée lors de celles de 1992 et 2010.

Les nouveaux programmes publiés en 1978-79 ont intégré un grand nombre des réflexions menées par la Commission Lagarrigue. Ils en ont repris deux intentions originales :

- la première impliqua des mathématiciens pour améliorer la concertation entre les enseignants et la synchronisation des programmes de mathématiques et de physique ;
- la deuxième ambition, restée malheureusement virtuelle, fut d'essayer de regrouper les enseignements de sciences expérimentales et de technologie. La mutation des travaux manuels et le développement séparé des sciences industrielles ont empêché à l'époque de progresser dans cette voie.

La réforme de 1992, qui correspondait à l'émergence de la physique non linéaire et de la physique de la matière molle, a par contre limité le formalisme. Elle a créé les secondes indifférenciées dans les lycées généraux et technologiques. Elle a aussi introduit les statistiques et rappelé l'importance de l'expérience en physique. Les ajouts successifs ont conduit à des suppressions graves en mathématiques : géométrie, apprentissage de la démonstration... et en physique : on a enlevé les bases de statique pour parler de dynamique plus moderne...

La réforme de 1999-2000 a repris les deux ambitions de celle de 1978-79, avec un certain succès pour la première (l'exponentielle en terminale S, les équations différentielles du premier ordre, une réflexion sur les statistiques) et des expériences pilotes d'EIST au

collège pour la seconde. Les documents d'accompagnement de ces deux réformes furent très riches mais diffusés avec retard, et les formations des professeurs aux nouveaux programmes restèrent insuffisantes par manque de temps et d'argent. La formation des enseignants à l'expérimentation et la réévaluation de son rôle dans leur sélection n'ont pas suivi.
La dernière réforme du lycée (autour de 2010) a été, elle aussi, bousculée et pilotée par le cabinet du ministre qui demanda que les réorientations entre filières restent faciles pendant la classe de première (la classe de seconde restant commune aux filières générales et technologiques). Elle se caractérisa par une demande de modernisation et de contextualisation plus forte encore que lors des trois précédentes réformes, toujours dans l'intention de susciter plus de vocations. Le rejet du formalisme mathématique et certains des modes d'évaluation retenus sont contestés, avec le retour du balancier décennal identifié plus haut.

La perte progressive chez les lycéens des capacités de raisonnement et de calcul est maintenant un handicap rédhibitoire pour toutes les disciplines scientifiques. Les lacunes mathématiques ressenties en physique au lycée sont principalement dues aux problèmes du collège. La réforme 2015 du collège est toute récente et il faudra en tirer les conséquences pour celle du lycée.

## Quelques propositions pour demain dans l'esprit de la Commission Lagarrigue

Pour remédier aux graves difficultés actuelles (lacunes des élèves en mathématiques, pénurie de scientifiques, disparition de nombreux emplois liée à la robotisation), il nous paraît urgent en tout premier lieu de créer une Commission Française pour l'Enseignement de la Physique (CFEP) sur le modèle de la CFEM pour les mathématiques. La CFEP serait œcuménique, des inspecteurs généraux aux académiciens et des (enseignants-) chercheurs aux professeurs. Parmi les responsabilités de la CFEP figureraient la réflexion sur l'enseignement bien sûr, mais aussi la prospective des débouchés. Ceci comprendrait l'analyse des compétences culturelles et opérationnelles conférées par les enseignements de physique pour d'autres professions.

Nous devrons défendre notre modélisation du monde réel et la démarche inductive, ainsi que la polyvalence des enseignants de physique (qui doivent maîtriser expérimentation, simulation et mathématiques, ainsi que la chimie). L'expertise des physiciens en simulation numérique, en traitement du signal et en expériences assistées par ordinateur leur permettrait de jouer un rôle original dans l'enseignement de l'informatique. *Idem mutatis mutandis* dans l'enseignement des statistiques. Il faudra aussi réconcilier les physiciens « académiques » et les physiciens appliqués, en combinant la précision analytique des uns et la richesse synthétique des autres. La réflexion sur les filières technologiques et la professionnalisation devra aussi faire l'objet d'une discussion approfondie. La concertation avec les mathématiques reste essentielle.

Les métiers changeant très rapidement, il faut prévoir un référentiel de qualification plus conceptuel pour chaque filière d'enseignement. Comment, dans chaque voie, former plus d'étudiants à l'abstraction pour augmenter compétences et connaissances sans trop allonger leurs études ? Comment le faire aussi pour ceux qui, de plus en plus nombreux, suivront une formation continuée après avoir travaillé quelque temps ? À budget constant, il faudra bien choisir entre développer la formation continue et allonger la formation initiale.

## Conclusion

L'application des idées ci-dessus ne passera dans les faits que si un groupe suffisamment jeune, nombreux et énergique, les reprend à son compte. La SFP, l'UdPPC et l'UPS devraient y jouer un rôle pilote avec les autres sociétés savantes d'application de la physique. Il faudra anticiper l'impatience des politiques et proposer des éléments de réforme viables et consensuels, si possible préparés au niveau européen : en plus de la fertilisation croisée entre pays concernés, ceci obligerait à réformer moins souvent mais plus en profondeur. En bref, moderniser nos formations, éduquer nos élèves et les préparer aux emplois de demain ne s'improvise pas.

**Bernard Julia**
Laboratoire de physique théorique, ENS, Paris
Membre de la Commission Enseignement de la SFP

L'auteur tient à remercier de nombreux collègues pour leurs suggestions, en particulier Guy Bouyrie et Marc Serrero

## Références

1• N. Hulin, *Le savant et le professeur*, L'Harmattan (2016).

2• *Reflets de la physique* n°**53** (2017) 47.

3• On peut lire d'autres études historiques sur l'enseignement des sciences depuis deux siècles (voir les publications sur le site www.aseiste.org).

4• On trouvera plus d'informations sur le site de l'UdPPC, à l'adresse des archives de la commission Lagarrigue (hal-00987870) et dans les annexes du livre de Nicole Hulin.

## Lumière et luminescence (2e édition)

### *Ces phénomènes lumineux qui nous entourent*

### Bernard Valeur (Belin, collection Bibliothèque scientifique, 2017, 240 p., 26 €)

Cette édition actualisée et augmentée, avec de nombreuses photos colorisées toutes plus belles les unes que les autres, a pour initiateur Bernard Valeur, physico-chimiste et professeur émérite au CNAM. B. Valeur, de par sa formation pluridisciplinaire, est la personne idoine pour traiter ce sujet « lumière et luminescence » et, de fait, il a déjà publié plusieurs ouvrages sur ce thème aux interfaces entre physique, chimie, biologie, qu'est la lumière.

Par rapport à l'édition de 2005, un certain nombre d'ajouts ont été effectués, avec de nombreux encadrés, voire des chapitres totalement originaux tels ceux sur l'électroluminescence – éclairage LED, prix Nobel de physique 2014 – ou sur des formes moins usitées de luminescence comme la radio-thermo-cathodo-sono et la triboluminescence. Ceci donne un livre avec deux parties distinctes, l'une traitant des aspects historiques de notre compréhension de la lumière, des interactions lumière-matière, des liens lumière-couleur ainsi que lumière-matière, l'autre développant les nombreuses formes de fluorescence de façon la plus exhaustive possible. Ce corpus est précédé d'un sommaire détaillé et suivi d'un épilogue sur la lumière et les défis du 21e siècle, ainsi que d'un très utile glossaire.

Cet ouvrage dénote un grand souci de pédagogie de la part de son auteur, reflétant – à l'évidence – l'enseignant-chercheur qu'il a été. Un exemple typique à propos de l'émission spontanée : la distinction à faire – avec argumentation et force détails – entre émission par incandescence et par luminescence ; ceci permet – d'entrée de jeu – de bien poser le cadre ! J'ai également beaucoup apprécié la très étayée et très claire (lumineuse ?) discussion sur la luminescence, fonction de la nature du matériau émetteur et de son environnement.

Pléthore d'applications sont également présentées, allant du fonctionnement de l'écran plat au photodiagnostic de tumeurs potentiellement cancéreuses ou à la visualisation de veines – angiofluorographie –, en passant par l'ajout d'azurants optiques pour obtenir un linge blanc lumineux ou par les applications criminalistiques. En ce qui me concerne, je suis plutôt resté rêver sur les couleurs chatoyantes de certains animaux dues au phénomène d'iridescence ainsi que sur d'autres dues à la diffusion de la lumière. Le lapin transgénique – lui – m'a laissé de marbre.

Bref, vous l'aurez compris, un livre superbe, à mettre entre toutes les mains !

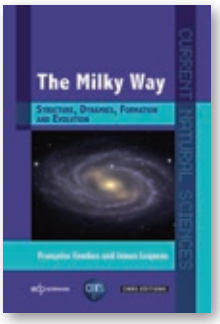
**Arnaud Le Padellec**
IRAP, Toulouse

## De la vérité dans les sciences

### Aurélien Barrau (Dunod, 2016, 96 p., 11,90 €)

Aurélien Barrau annonce en prologue un parti-pris de légèreté, d'oralité, dans un texte écrit à l'occasion d'une rencontre de la Société alpine de philosophie. Il nous faudra donc lire à travers son lyrisme l'exposé de ses convictions à propos de la vérité dans les sciences, sans se noyer dans le foisonnement érudit, que l'on peut trouver séduisant ou irritant selon notre humeur. Il regrette d'emblée que Descartes n'en soit pas resté au doute total qui l'avait assailli, puis refuse d'enfermer la science dans une définition (usuelle) qui ferait appel au langage mathématique, à la prédictibilité ou au recours à l'expérience. Contre les rationalistes (Descartes, Bachelard), A. Barrau défend l'importance des contingences « idéologiques, économiques et sociétales » et refuse de distinguer radicalement la science des autres activités humaines. « La science n'est qu'un mode d'accès au réel parmi beaucoup d'autres », écrit-il, dont la richesse est contenue dans des limites et la « fugacité » des résultats. Sa position relève donc du « relativisme » épistémologique pour lequel la vérité scientifique est affaire de consensus social temporaire, mais il va s'efforcer de justifier et valoriser une démarche personnelle dans ce cadre.

Définir la vérité s'avère donc tout aussi impossible, en dépit du fait que celle-ci soit nécessaire, mais toujours ambiguë parce que dépendante d'un point de vue, d'une époque, d'une méthode. La vérité est la « production d'un système plutôt qu'une adéquation à une réalité préexistante », cette réalité « en soi » étant impossible à atteindre, car toujours soumise à un mode d'appréhension, qu'il soit scientifique ou autre. Cette analyse relève de la philosophie critique traditionnelle, mais A. Barrau se réfère ici à un livre du philosophe analytique Nelson Goodman qui reconnaît plusieurs manières distinctes de faire des mondes, l'une d'elle étant celle de la science. Il s'agit donc de « faire » un monde et non de le découvrir.




## The Milky Way – *Structure, dynamics, formation and evolution*

### Françoise Combes et James Lequeux

(EDP Sciences et CNRS Éditions, collection Current Natural Sciences, 2016, 186 p., 59 €)

Ce livre (en langue anglaise) très complet et précis fait le point sur les connaissances relatives à notre galaxie, sa forme, sa structure, ses composants et sa dynamique, ainsi que sur les instruments – télescopes et satellites – ayant permis ces études, tel Hipparcos. En moins de 200 pages, accompagnées de deux appendices, un glossaire et une bibliographie, les auteurs présentent synthétiquement un ensemble impressionnant d'informations. Tout en étant très spécialisé, professionnel, le livre est accessible en raison de sa clarté et de l'exposition méthodique des résultats par le texte pratiquement sans équations et les nombreux diagrammes et illustrations. La préface de Catherine Turon introduit parfaitement l'ouvrage, et il est possible d'aborder séparément les neuf chapitres proposés.

On y apprend que notre galaxie est une spirale barrée assez massive que l'on décompose en plusieurs éléments morphologiques, dont on veut déterminer la composition et la dynamique interne, jusqu'au trou noir central. Les premiers chapitres décrivent l'état actuel des divers éléments, puis les chapitres 6 et 7 exposent ce que l'on peut en déduire à propos de la formation et de l'évolution de chacun. Notre Voie lactée est ensuite replacée dans l'ensemble des galaxies connues. Le chapitre 9 aborde enfin l'avenir, avec de nouveaux instruments, tels l'E-ELT (voir à ce sujet le numéro spécial « Lumière », *Reflets de la physique* n°47-48) ou ALMA.

Les auteurs présentent la matière noire imposée par la courbe de rotation des étoiles, située essentiellement dans le halo, mais aussi la possibilité d'une autre théorie : la gravité modifiée, appelée MOND (MOdified Newtonian Dynamics). Les observations portent sur tous les rayonnements issus des étoiles et des gaz interstellaires ionisés, ainsi que sur les raies d'absorption (raie à 21 cm de l'hydrogène) par les gaz neutres, qui permettent de décrire la composition chimique de la Galaxie, l'abondance des éléments, d'en déduire son évolution et la production de ces éléments dans les étoiles ainsi que la formation des étoiles elles-mêmes. Le trou noir central, estimé à 4,3 masses solaires, est ainsi connu par des rayonnements radios, infrarouge et X, émis par la matière qu'il accrète, et par les orbites des étoiles de la région centrale.

Des simulations numériques sont également présentées ; elles permettent de reproduire la structure cinématique observée et d'obtenir l'évolution de celle-ci, les modifications de morphologie au cours du temps.

On doit donc recommander ce livre à tout amateur ou professionnel en astrophysique, pour une revue des méthodes générales appliquées à l'objet particulier qu'est notre propre galaxie.

**Christiane Vilain**
Laboratoire SPHERE, Université Paris 7

---

Se refusant à enfermer la science dans une méthode précise – il invoque Feyerabend contre Popper – A. Barrau s'efforce ensuite longuement de ne pas en rester au « tout se vaut » qui laisserait le champ libre au créationnisme, au négationnisme, ou pire. C'est là me semble-t-il un point délicat et intéressant de cette longue dissertation sur la science, conçue comme un art : comment faire pour que tout ne soit pas acceptable au même titre ? Il avance que certaines hypothèses ne produisent pas un monde viable, sont pauvres, parfois incohérentes, mais on sent qu'il s'agira en dernière instance de critères éthiques puisque ni la logique ni la vérité ne suffisent. Le fait est que le relativisme défendu par A. Barrau le conduit à considérer la science comme une construction choisie plutôt que comme quelque chose qui s'imposerait de l'extérieur, attitude plus exigeante dit-il que celle des réalistes, plus inventive, créative et critique. Après avoir commenté la position de Derrida face à la question de la vérité, A. Barrau revient encore sur le caractère actif et réflexif de son relativisme, refus de tout absolu, de tout dogmatisme et de toute fixité, cependant « dénué de tout nihilisme ».

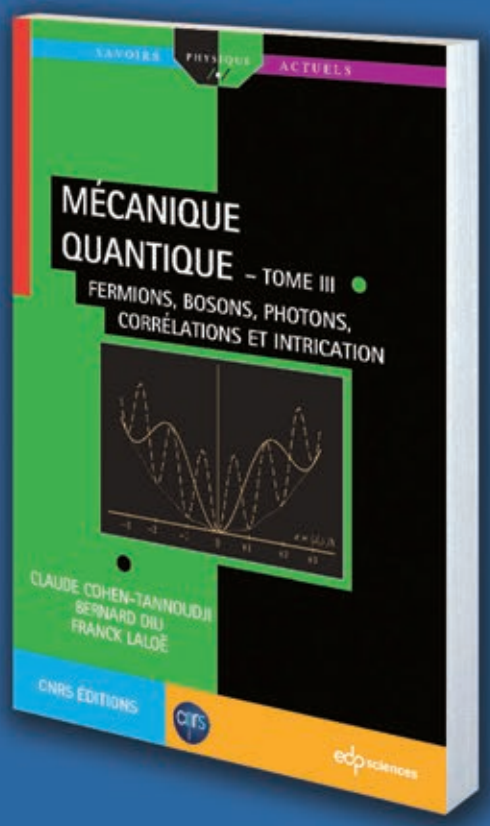
On peut apprécier la critique bien argumentée de la notion de vérité dans le domaine de la connaissance mais regretter que la méthode scientifique dans son aspect expérimental spécifique ait été rejetée, parce qu'absente de l'astronomie et de la cosmologie, qui fonctionnent cependant la plupart du temps selon les critères de la physique ; tout au plus A. Barrau reconnaît-il (p. 82) à la science « une efficacité toute particulière dans ce geste essentiel qui consiste à appréhender le réel avec le désir d'en découvrir les propriétés qui dépassent nos conventions culturelles et nos désirs personnels », mais n'en dira pas plus sur le pourquoi et le comment de la construction de cette efficacité particulière. On en reste donc à l'intention, à une attitude positive qui est celle de tout chercheur, sans le soutien d'une approche absolue de la vérité.

**Christiane Vilain**
Laboratoire SPHERE, Université Paris 7

# Parution Septembre 2017

## MÉCANIQUE QUANTIQUE - TOME III
### FERMIONS, BOSONS, PHOTONS, CORRÉLATIONS ET INTRICATION

Claude Cohen-Tannoudji
Bernard Diu
Franck Laloë




Cet ouvrage fait suite aux deux premiers volumes Mécanique quantique - Tomes I et II (publication aux Éditions Hermann, première édition en 1973).

Ce troisième tome de mécanique quantique se place dans la même optique que les tomes précédents, avec une rédaction où toutes les étapes des raisonnements sont explicitées et les calculs détaillés. Chaque chapitre est suivi d'une série de compléments destinés à appliquer les connaissances acquises à un certain nombre d'exemples intéressants. L'ouvrage s'adresse à des physiciens ou des chimistes déjà familiers avec les principes de base de la mécanique quantique.

La première partie de l'ouvrage concerne l'étude des ensembles de particules identiques, le formalisme des opérateurs de création et d'annihilation, des opérateurs champ, etc. De nombreux exemples sont traités dans les compléments, en particulier les méthodes de champ moyen (équations de Hartree-Fock pour des fermions, de Gross-Pitaevskii pour des bosons). L'appariement en mécanique quantique est introduit en traitant dans le même cadre général fermions (théorie « BCS », pour Bardeen-Cooper-Schrieffer) et bosons (théorie de Bogoliubov). La seconde partie concerne la théorie quantique du champ électromagnétique : émission spontanée, transitions à plusieurs photons, atome habillé, etc. avec des perspectives sur des méthodes expérimentales comme le pompage optique et le refroidissement et le piégeage d'atomes par des faisceaux laser. Un dernier chapitre traite de l'intrication quantique, de l'argument d'Einstein, Podolsky et Rosen ainsi que du théorème de Bell, insistant ici aussi sur l'importance des corrélations.

Prix : 55 € - 850 pages - ISBN : 978-2-7598-2107-5

edp sciences

**Bientôt disponible sur : *laboutique.edpsciences.fr***