reflets de la PHYSIQUE

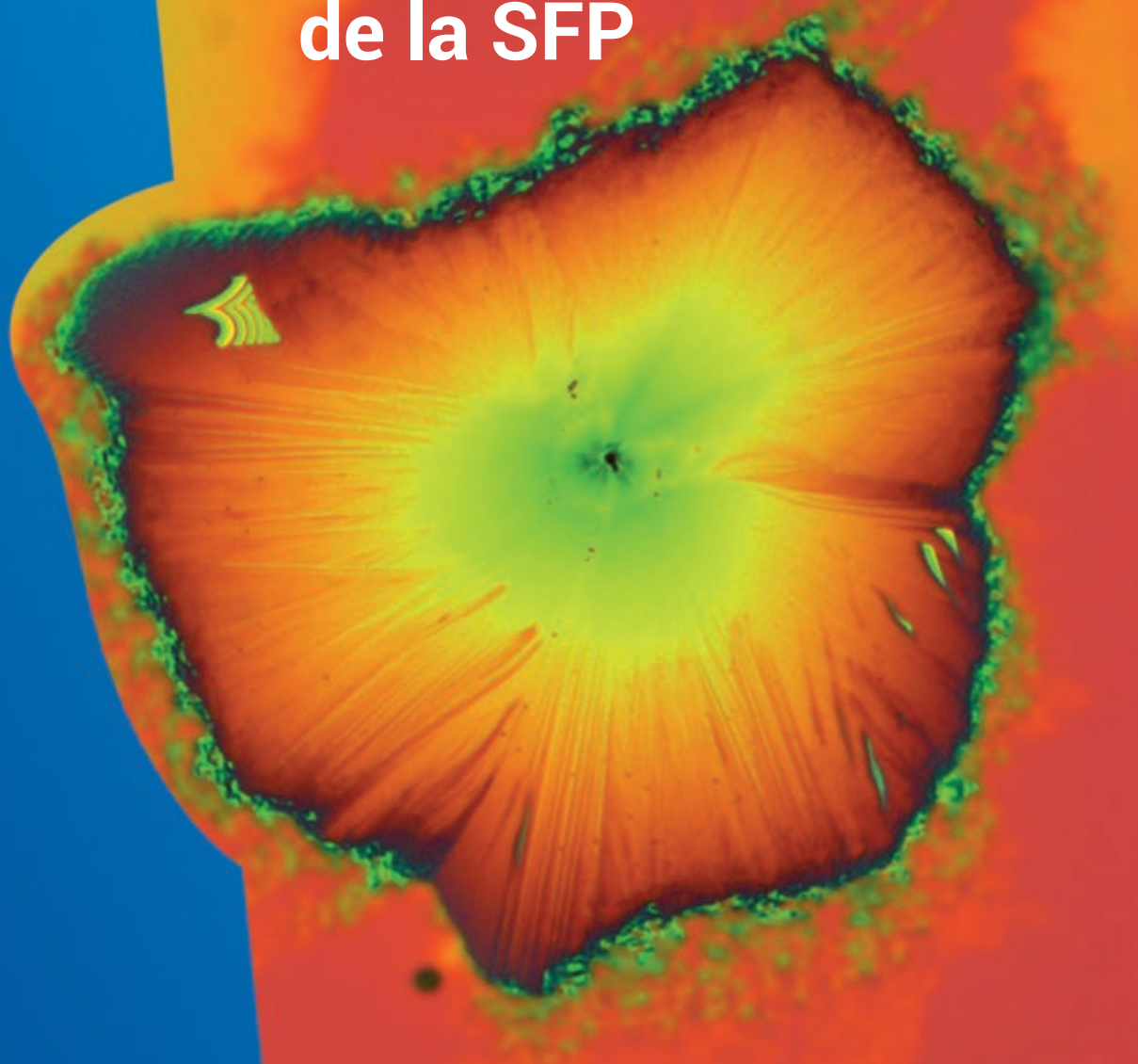
n° 64
janvier 2020

www.refletsdelaphysique.fr

Revue de la Société Française de Physique

Au sein et autour de la SFP

Le concours *Beautiful Science* de la SFP



Images de la physique

Les résultats cosmologiques de la mission Planck

Avancées de la recherche

Imagerie sismique par corrélation de bruit ambiant

Histoire des sciences

Jocelyn Bell, découvreuse des pulsars

n° 64 - janvier 2020

www.sfpnet.fr

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

Le 13 novembre 2019, **EDP Sciences est devenue filiale à 100% de CSPM Europe**

Les quatre actionnaires d'EDP Sciences viennent en effet de finaliser la vente de l'entreprise à CSPM Europe, filiale de CSPM (Chinese Science Publishing and Media), et de céder à CSPM Europe 100% des actions d'EDP Sciences.

Pour mémoire, l'actionnariat d'EDP Sciences était composé de la Société Française de Physique (77,71%), de la Société Chimique de France (19,44%), de la Société Française d'Optique (2,49%) et de la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (0,36%).

En décembre 2017, les représentants des associés d'EDP Sciences avaient décidé d'explorer les conditions de développement de la société et d'envisager toutes les options possibles, afin de doter EDP Sciences des moyens nécessaires au déploiement de sa stratégie à moyen et long terme et lui permettre ainsi de consolider ses positions. Cette cession, qui était l'une des hypothèses envisagées, répond à cet objectif.

Le 28 juin 2019, les représentants des quatre actionnaires, dûment mandatés par les quatre Conseils d'administration, avaient signé le contrat de vente (SPA). Les différentes conditions suspensives prévues dans le SPA ayant été levées, les opérations du "closing" de la vente ont pu être réalisées le 13 novembre.

Dans l'esprit des quatre sociétés savantes françaises, comme dans celui de CSPM, cette opération a pour but de consolider l'avenir et les conditions de développement d'EDP Sciences et de conforter sa stratégie, en lui permettant de se développer, en particulier à l'international, dans un contexte extrêmement mouvant et difficile pour l'édition scientifique. EDP Sciences[1], qui aura 100 ans en 2020, a réussi à exister et se développer au fil des décennies grâce au talent et à la qualité de son personnel. Il était cependant devenu nécessaire de l'adosser à une structure dotée de moyens importants lui permettant de franchir une étape indispensable à son développement.

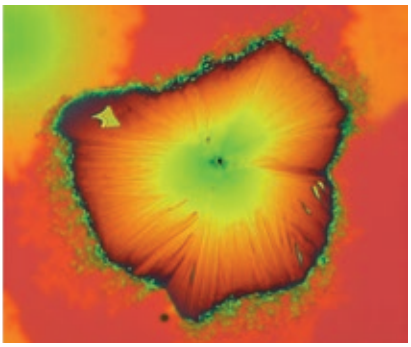
CSPM est une société d'édition scientifique chinoise appartenant très majoritairement (à 77%) à l'Académie des Sciences de Chine. Elle souhaite renforcer ses relations avec les milieux scientifiques français et européens et mettra prochainement en place un "Scientific Advisory Committee", composé de personnalités scientifiques françaises (dont des représentants de la SFP) et européennes, afin de continuer à conseiller EDP Sciences sur les questions notamment de l'évolution des domaines scientifiques, des pratiques de l'édition scientifique, de l'*Open Science* et de l'éthique éditoriale. EDP Sciences, qui demeure une société de droit français, restera ainsi pleinement intégrée aux milieux scientifiques français et européens. CSPM s'appuiera par ailleurs sur le personnel et le management en place chez EDP Sciences, ce qui permettra d'assurer les meilleures conditions du développement de l'entreprise à l'avenir ainsi que dans la période actuelle de transition du fait du changement de l'actionnariat.

Cette acquisition est une mesure importante pour CSPM dans la mise en œuvre de sa stratégie de développement international : CSPM pourra ainsi accélérer la transformation et la mise à niveau de ses activités ainsi que son rythme d'internationalisation. EDP Sciences bénéficiera pour sa part des compétences et des ressources de CSPM, ce qui lui permettra d'assurer son développement dans les meilleures conditions possibles et de répondre pleinement aux attentes des communautés scientifiques françaises, européennes et chinoises.

Il faut souligner que l'édition électronique de *Reflets de la physique* (www.refletsdelaphysique.fr), ainsi que celle d'*Europhysics News*, continueront à être gérées par EDP Sciences, dans les mêmes conditions que précédemment.

[1] Originellement dénommée « Les Éditions de Physique », la société a pris en 1997 le nom « EDP Sciences » pour Édition Diffusion Presse Sciences.

Sommaire



« Coquelicot », photo proposée par Barbara Bouteille (doctorante au Laboratoire CNRS/ Saint-Gobain SVI) au concours *Beautiful Science* (voir p. 38). Défaut de cristallisation de surface, induit par traitement thermique d'une couche mince de verre. Couleurs naturelles dues aux interfaces avec le substrat. Dimension latérale de l'image : ~ 100 µm.

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

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

Directeur de la publication : Jean-Paul DURAUD
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR
Réalisation graphique : Lætitia MORIN
laetitiamorin-graphiste.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Communication : Mayline VERGUIN
Service publicité : publicite@edpsciences.org
Dépôt légal : 1er trimestre 2020
ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777
© SFP - Édité à 2900 exemplaires

Imprimerie Jouve
11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cedex 01
Tél. : 01 44 76 54 40

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

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

2 Communiqué : Le 13 novembre 2019, EDP Sciences est devenue filiale à 100% de CSPM Europe.

Images de la physique

4 Les résultats cosmologiques de la mission Planck
N. Aghanim et H. Dole

Avancées de la recherche

12 Imagerie sismique par corrélation de bruit ambiant : du laboratoire à l'échelle globale
P. Boué et A. Paul

17 Érosion et accrétion de matériaux granulaires humides
A. Sauret, G. Saingier et P. Jop

23 Première image d'un trou noir
F. Combes

Science et société

26 Les membres de la Société Française de Physique et la culture scientifique
D. Hennequin et F. Vedel

Histoire des sciences

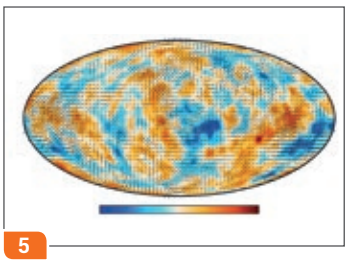
30 Jocelyn Bell Burnell, découvreuse des pulsars
F. Combes et F. Durret

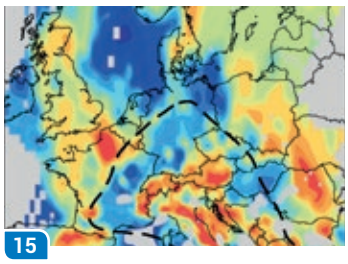
Au sein et autour de la SFP

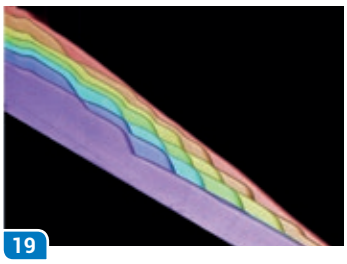
33 Évolutions du site *web* de la SFP
34 Prix scientifiques
36 Le Congrès général 2019 de la SFP
38 Le concours *Beautiful Science*
40 Astrid Lambrecht, la curiosité en partage
M. Grousson
42 Climat, énergie, environnement : où va-t-on ?
G. Bonhomme

Reflets de la physique et ses lecteurs

43 Courriers des lecteurs
45 Notes de lecture


5


15


19

32

Les résultats cosmologiques de la mission Planck

Nabila Aghanim et **Hervé Dole** (herve.dole@ias.u-psud.fr)
Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay (UMR8617, CNRS et Université Paris-Sud), 91405 Orsay Cedex
Membres de la collaboration Planck

Le satellite Planck a été lancé en 2009 pour mesurer avec une précision sans précédent les propriétés du rayonnement fossile – aussi appelé fond diffus cosmologique, sorte d'écho lumineux du Big Bang.

Les scientifiques de la collaboration Planck ont publié plusieurs séries de résultats, parmi lesquels les mesures les plus précises jamais obtenues de l'âge et de la composition globale de l'Univers. De plus, les données apportent un éclairage nouveau sur deux périodes particulièrement énigmatiques : l'inflation juste après le Big Bang, et la sortie des « âges sombres » quand les premières étoiles et galaxies se sont formées. L'analyse des données de Planck fournit, en outre, une mine de renseignements concernant la formation des grandes structures.

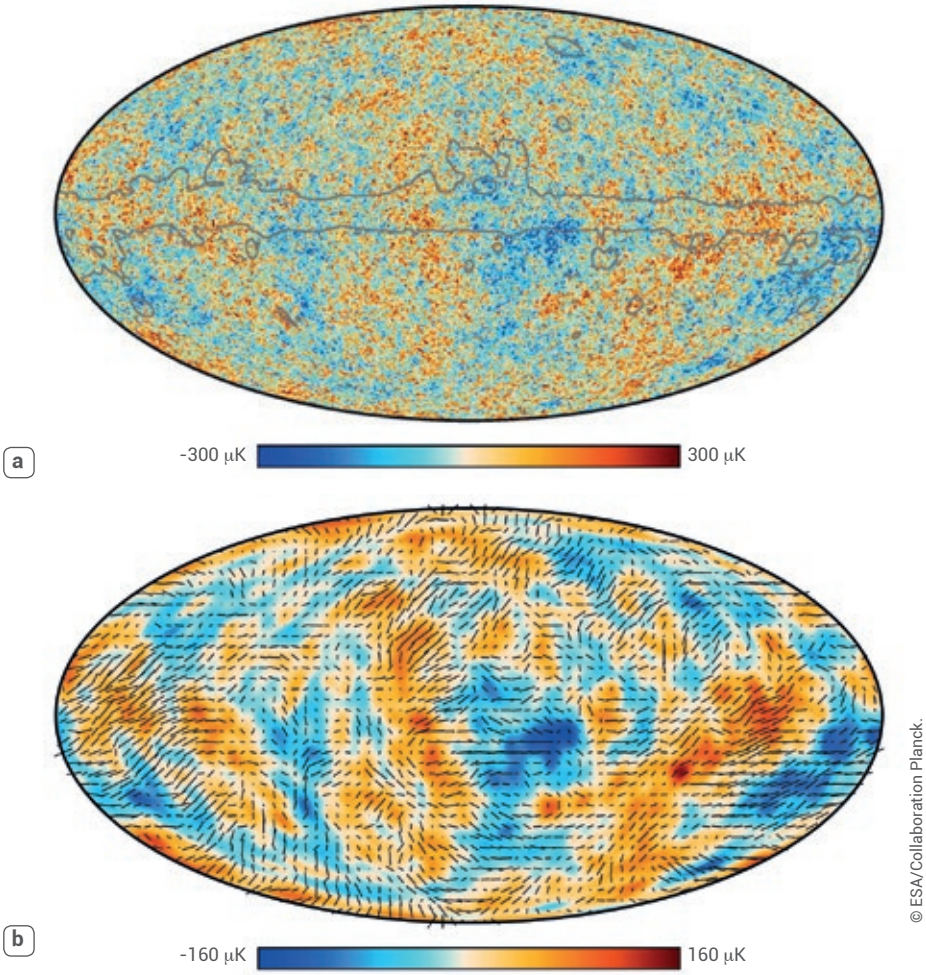
L'histoire de l'Univers, telle qu'appréhendée par les cosmologistes, qu'ils soient observateurs, expérimentateurs ou théoriciens, est relativement bien décrite par le « scénario du Big Bang » qui, bien que contenant des variantes et des imperfections, satisfait un grand nombre de tests d'observation. Ce « modèle cosmologique standard » s'est enrichi avec le temps, nourri à la fois de nouvelles données plus précises et de réflexions plus complexes, afin de tenter de répondre à plusieurs questions sur la genèse et l'évolution des structures cosmiques (galaxies, amas de galaxies). Dès lors, les scientifiques cherchent à mettre au défi les différentes variantes du modèle, en effectuant des mesures de nature à les départager et, éventuellement, à exclure certaines de ces variantes. L'une des observables majeures en cosmologie est le rayonnement fossile – ou fond diffus cosmologique, en anglais *Cosmic Microwave Background* (CMB, acronyme que nous utiliserons dans la suite) –, découvert en 1964 par A. Penzias et R.W. Wilson. Les faibles inhomogénéités du CMB, *i.e.* les zones du ciel avec des brillances ou des températures différentes de la moyenne par moins de 0,001%, mises en évidence pour la première fois en 1992 par le satellite COBE de la NASA, sont reliées aussi bien, en aval, aux germes ayant donné naissance aux galaxies que, en amont, aux processus physiques dans l'Univers primordial.

Le fond cosmologique et ses inhomogénéités

Dans cet Univers primordial très dense et chaud sous la forme d'un plasma, la lumière ne pouvait pas se propager librement : l'Univers était opaque, comme au centre d'une étoile, à cause de la diffusion Thomson – entre lumière (photons) et matière chargée (essentiellement électrons). À ce stade, lumière et matière sont couplées, mais la matière subit des perturbations. La compétition entre la gravité (qui domine la dynamique de croissance des perturbations de matière) et la pression des photons (piégés par leurs interactions avec la matière, et qui s'opposent à l'effondrement gravitationnel) génère des oscillations : des ondes acoustiques (analogues aux ondes sonores), qui se propagent dans le plasma. Sous l'effet conjugué de l'expansion de l'Univers et de la (re)combinaison graduelle entre électrons et protons pour former des atomes d'hydrogène, le libre parcours moyen des photons dans le plasma croît. Lorsque l'Univers devient neutre, environ 375 000 ans après le Big Bang (soit un décalage spectral[(a)] vers le rouge de 1090 +/- 2,5 précisément), la matière et les photons se découplent. La lumière est alors libre de se propager jusqu'à nous : c'est le CMB détecté par le satellite Planck. Les ondes acoustiques (et les oscillations de température associées) sont « gelées » et impriment sur le CMB des motifs de tailles et de brillances différentes.

La mission Planck

Décidé par l'Agence spatiale européenne (ESA) en 1996 (après une longue préparation sous la direction d'une équipe de l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS) d'Orsay menée par Jean-Loup Puget, avec plusieurs laboratoires français, le CNES, et une contribution significative de la NASA), le satellite Planck est lancé en mai 2009. C'est presque dix ans après le lancement du satellite américain WMAP (pourtant décidé la même année que Planck), parce



1. Cartes du fond cosmologique observé par le satellite Planck, après soustraction des avant-plans, dont la contribution de la Voie lactée (1,6% de la surface du ciel). (Figures tirées de "*Planck* 2018 results. I. Overview, and the cosmological legacy *of Planck*", accepté pour publication dans *A&A*).
(a) Anisotropies de l'intensité (température) du CMB, à la résolution maximale (5 minutes) et avec une sensibilité de quelques µK. Les lignes grises délimitent les régions où l'émission d'avant-plan est substantielle. La couleur rouge correspond aux zones plus chaudes et la couleur bleue aux zones plus froides.
(b) Champ de polarisation du CMB, indiqué par des traits noirs de longueur variable, superposé à la carte de température (couleurs) lissée à une résolution réduite à 5 degrés.

que les stratégies technologiques étaient différentes. En effet, les Européens ont choisi une voie plus ambitieuse, donc plus couteuse, longue et risquée, mais avec à la clef des mesures et des résultats insurpassables pour longtemps : la nouvelle technologie se base sur des détecteurs ultrasensibles – les bolomètres – refroidis à une température record de 0,1 kelvin. Ainsi, une seule année d'observation de Planck équivaut à environ 1000 années d'observation de WMAP. Planck dispose de deux instruments : HFI (*High Frequency Instrument*) réalisé sous la maitrise d'œuvre de l'IAS à Orsay et sous la responsabilité de J.L. Puget, et LFI (*Low Frequency Instrument*) réalisé sous responsabilité italienne. Le satellite Planck a été pensé pour cartographier la totalité du ciel dans le domaine spectral millimétrique (0,3 à 11 mm), avec une résolution angulaire relativement fine par rapport à la granularité du CMB. Planck observe non seulement l'intensité mais également la polarisation du CMB et du rayonnement de notre Galaxie, avec une stratégie d'observation permettant de caractériser avec précision et de contrôler les effets instrumentaux pouvant dégrader ou impacter le signal. Pour finir, Planck a une stratégie d'analyse (incluant un contrôle par simulation), afin d'extraire le signal du fond diffus cosmologique des nombreux autres signaux astrophysiques.

Initialement, douze mois d'observations étaient prévus pour cartographier deux fois la totalité du ciel (soit deux « relevés »). Planck-HFI a finalement observé durant 29 mois et a réalisé cinq relevés complets, grâce à la très grande stabilité de son système de refroidissement. Pour la première fois en cosmologie, en raison de la sensibilité exceptionnelle des détecteurs de Planck, la mesure des fluctuations du CMB n'est plus limitée par cette sensibilité, mais par notre capacité à bien séparer le fond cosmologique des émissions contaminantes d'avant-plan comme celles provenant de la lumière de notre Galaxie, des autres galaxies et des amas de galaxies. La qualité de cette « séparation des composantes astrophysiques » dépend non seulement de la qualité de mesure du CMB lui-même, mais aussi de celle des dits avant-plans. Les observations de Planck à neuf bandes de fréquences différentes, centrées de 30 GHz (longueur d'onde $\lambda \approx 10$ mm) dans le domaine des micro-ondes jusqu'à 857 GHz ($\lambda \approx 0{,}3$ mm) dans l'infrarouge lointain, assurent une mesure fine des émissions non cosmologiques d'avant-plan, en vue de les soustraire du signal total.

Depuis 2010, la collaboration Planck analyse les données et publie les résultats associés dans la revue *Astronomy and Astrophysics*. La version intégrale et définitive de ces résultats a été publiée le 17 juillet 2018. Les données de Planck révèlent le CMB comme jamais vu auparavant, avec de bien meilleures sensibilité et résolution angulaire. L'image des inhomogénéités de température du CMB (fig. 1a) montre qu'elles ont une distribution en taille dominée par des motifs de l'ordre du degré sur le ciel. Ce sont les motifs associés à la première harmonique des ondes acoustiques, c'est-à-dire le premier pic acoustique. Mais surtout, Planck donne pour la première fois accès à la polarisation[b] fine du CMB sur tout le ciel (fig. 1b).

>>>

>>>

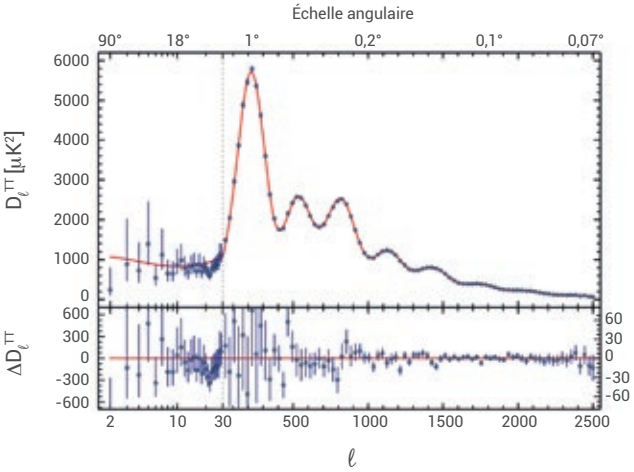
Du fond diffus aux paramètres cosmologiques

Les cosmologistes analysent les images du CMB avec un outil statistique privilégié – le spectre de puissance angulaire[c] – qui fait office de mesure de corrélation à deux points dans toutes les directions. Dès lors, les spectres de puissance, données et modèles théoriques, sont directement comparables.

Grâce à son excellente résolution angulaire, Planck mesure dix-neuf harmoniques ou pics acoustiques des spectres de puissance des fluctuations de température (fig. 2) et des fluctuations de polarisation E (fig. 3) du CMB : une grande première.

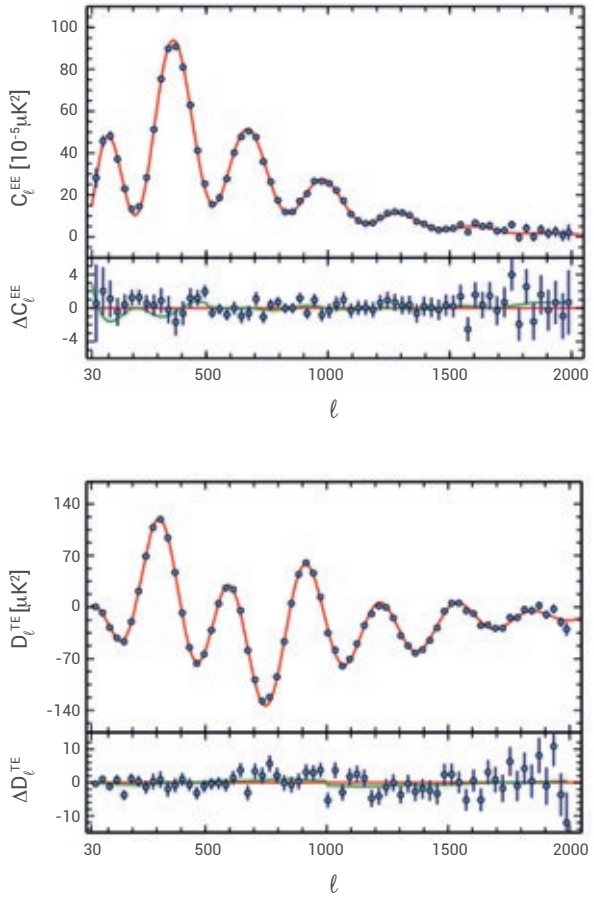
L'importance que revêt cette mesure tient au fait que l'analyse du spectre de puissance du CMB permet de déterminer les paramètres « cosmologiques » qui décrivent le contenu de l'Univers en matière ordinaire et sombre, en neutrinos, en énergie sombre, notamment. Par exemple, la brillance des motifs de taille un degré (l'amplitude du premier pic acoustique) et leur taille angulaire dépendent respectivement de la densité totale d'énergie et de la courbure de l'Univers. Ou encore, la brillance relative des motifs de taille inférieure à un degré (amplitude relative des premier et deuxième pics) dépend de la quantité de matière ordinaire dans l'Univers. Dès lors, plus le spectre de puissance possède de pics acoustiques plus il est « complet » et meilleure sera la précision de la mesure des paramètres cosmologiques. Ces derniers nous révèlent l'ensemble des ingrédients cosmiques, exprimés en terme de leur rapport à la densité totale d'énergie dans l'Univers et notés W_b, W_{CDM}, W_n, W_L, les indices faisant référence à la matière baryonique (b), à la matière sombre (CDM pour *cold dark matter*), aux neutrinos (n) ou encore à l'énergie sombre (L). Les paramètres cosmologiques nous renseignent aussi sur les propriétés de l'Univers : son âge, à travers la constante de Hubble H_0 qui mesure le rythme d'expansion de l'Univers, et sa géométrie, *via* son paramètre de courbure W_k, par exemple.

Les spectres de puissance de Planck sont comparés à des milliers de modèles reproduisant, en plus du CMB, tous les signaux mesurés par Planck comme les effets des amas de galaxies, des galaxies, de l'émission de notre Galaxie. On recherche alors l'ensemble des paramètres (cosmologiques, astrophysiques, instrumentaux) qui rendent



2. Spectre de puissance des fluctuations de température (en microkelvins carrés) du fond diffus cosmologique en fonction de l'échelle angulaire. Les moments multipolaires ℓ correspondant aux diverses échelles angulaires sont indiqués le long de l'axe des abscisses.
En haut du graphe : les données de Planck (points et barres d'erreur en bleu) et le meilleur modèle (courbe rouge).
Insert du bas : résidus par rapport au modèle. Noter que le spectre de puissance est construit différemment pour le régime bas ℓ (2 < ℓ < 29) et le régime haut ℓ (ℓ > 29).
(Figure tirée de Planck Collab. XIII, *A&A* **593** (2015) A13.)

© ESA and the Planck Collaboration.



3. Spectres de puissance du fond diffus cosmologique (a) en polarisation E (noté EE) et (b) en corrélation croisée température et polarisation E (noté TE). Mêmes notations que la figure 2.
(Figure tirée de Planck Collab. XIII, *A&A* **593** (2015) A13.)

© ESA and the Planck Collaboration.

le mieux compte du modèle complet du ciel, étant données les observations. Seuls sont retenus les modèles, et par conséquent l'ensemble des paramètres, qui s'accordent au plus près avec les observations et leurs incertitudes.

Grâce à la qualité inégalée des données de Planck, des mesures d'une précision jamais atteinte ont été obtenues pour les paramètres cosmologiques. Planck a révisé la « composition » de l'Univers. La quantité de matière ordinaire et de matière sombre doit être augmentée d'environ 10% par rapport aux précédentes estimations. La quantité d'énergie sombre, quant à elle, doit être diminuée d'autant. Le plus remarquable dans les plus récents résultats de Planck est la précision extrême des mesures des paramètres, de l'ordre de 0,6 et 1,1 % pour les densités de baryons et de matière sombre respectivement. Planck mesure un paramètre de courbure de l'Univers de l'ordre de – 0,004 et établit donc que l'Univers est plat et que notre espace a une géométrie euclidienne. Les derniers résultats de Planck utilisant la polarisation du CMB confirment que la constante de Hubble mesurée, 67,27 km/s/Mpc, est environ 10% plus faible que les précédentes estimations. La qualité des données de Planck, et l'accès aux nombreux pics acoustiques dans le spectre de puissance, ont permis pour la première fois de détecter l'effet des neutrinos primordiaux, « émis » lorsque l'Univers était âgé d'une seconde, sur la carte du rayonnement fossile. Cet effet est en accord avec le scénario du Big Bang et le modèle standard de la physique des particules. Planck montre bien que le nombre d'espèces de neutrinos est de trois, tel que prédit par la théorie.

Avec cet ensemble de mesures qui utilisent les spectres de puissance en intensité/température et en polarisation, il suffit de six paramètres cosmologiques[d] pour en ajuster parfaitement les dix-neuf pics. L'un des résultats majeurs de Planck est donc que le modèle cosmologique « standard » le plus simple (appelé aussi « modèle de concordance ») est favorisé par les données et qu'aucune remise en cause profonde n'est envisageable, même si quelques tensions existent.

L'inflation cosmique

L'analyse statistique du CMB permet de mieux cerner le processus d'inflation cosmique[e] et donc l'état de l'Univers une fraction infime de seconde après le Big Bang.

Les mesures de Planck renforcent considérablement le modèle de l'inflation dans son expression la plus simple et standard. La mesure d'une très faible valeur du paramètre de courbure de l'Univers (- 0,004) indique que l'hypothèse de sa « platitude », conséquence de l'inflation, est confirmée. Par ailleurs, et pour la première fois, Planck a permis la mesure non ambigüe de l'indice spectral scalaire[f] n_s = - 0,9645, avec une précision telle que l'écart à la valeur -1 (caractérisant le cas indépendance de la taille physique) est indiscutable. Cette mesure est conforme aux prédictions de l'inflation, où l'indice n_s doit être compris entre - 0,96 et 0,97. D'autre part, le caractère gaussien de la distribution des inhomogénéités de température du CMB, stipulé par les modèles les plus simples et usités d'inflation standard, est maintenant établi avec la plus grande précision jamais obtenue, rejetant ainsi toute une famille de modèles d'inflation. De plus, grâce à la mesure la plus précise obtenue à ce jour de la polarisation du CMB aux échelles angulaires inférieures au degré ($\ell > 100$) sur tout le ciel, Planck établit définitivement la nature adiabatique des perturbations de matière, c'est-à-dire que les perturbations de densité sont en équilibre thermique les unes avec les autres.

Une avancée majeure pour conforter de manière déterminante le paradigme de l'inflation standard serait la mesure directe de la polarisation, dite de mode B[b], aux échelles angulaires supérieures au degré. Cette polarisation est la signature claire des ondes gravitationnelles primordiales générées par la phase d'inflation cosmique. Sa mesure représente la nouvelle limite posée aux expériences visant à mesurer le CMB depuis le sol ou dans l'espace. L'importance que revêt la confirmation « ultime » d'une phase d'inflation cosmique par la mesure des modes B de polarisation impose une approche très sérieuse et prudente du traitement des données, en particulier de la séparation du signal cosmologique de celui associé à notre Galaxie qui domine aux grandes échelles angulaires. Ce type d'analyse poussée a été réalisé avec les données de Planck combinées à celles du télescope au sol BICEP2/KECK. Elle a mis en évidence que la part d'émission due à la poussière galactique avait été significativement sous-estimée, ce qui avait conduit l'équipe BICEP à une interprétation erronée de leur signal comme étant un signal cosmologique. Aujourd'hui, l'analyse des données de Planck seules et celles les combinant aux données de BICEP2/KECK indiquent que le paramètre mesurant l'importance du signal produit par les ondes gravitationnelles primordiales, correspond à une valeur supérieure – pas encore à une détection. La quête de la trace des ondes gravitationnelles primordiales dans la polarisation du CMB ne fait que commencer.

La reionisation de l'Univers

Une autre période énigmatique de l'histoire de l'Univers est la « reionisation » qui désigne l'époque, quelques centaines de millions d'années après la recombinaison, lors de laquelle les atomes d'hydrogène sont de nouveau séparés en électrons et protons. La reionisation est communément associée à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires (fig. 3). Seules des observations de l'ensemble de la voute céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité t de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue (t = 0,055 ± 0,009) permet de déduire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

>>>

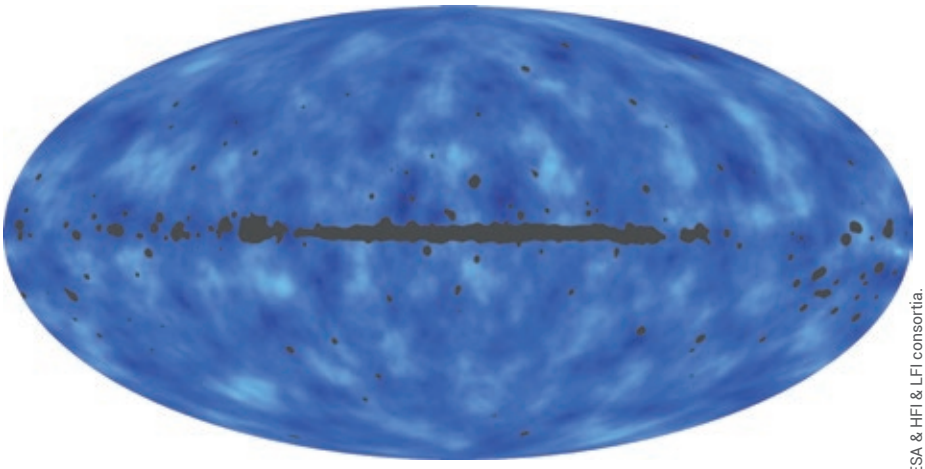
>>>
avant un décalage de 15 n'auraient pas pu libérer efficacement des photons ionisants. Ces nouvelles mesures de Planck semblent confirmer les observations de galaxies très lointaines par le télescope spatial Hubble, dont on pense qu'elles sont responsables de l'émission de grandes quantités de photons ionisants.

Les grandes structures

Les perturbations initiales de densité générées aux premiers instants de l'Univers accrètent de la matière sous l'effet de la gravité et croissent. Elles continuent de grandir par fusions successives et s'organisent sous la forme d'un réseau de matière baryonique et de matière sombre. Lorsqu'elles sont assez denses, elles forment en leur sein les premières étoiles et donnent naissance aux toutes premières galaxies, qui évoluent ensuite sous la forme de structures cosmiques complexes.

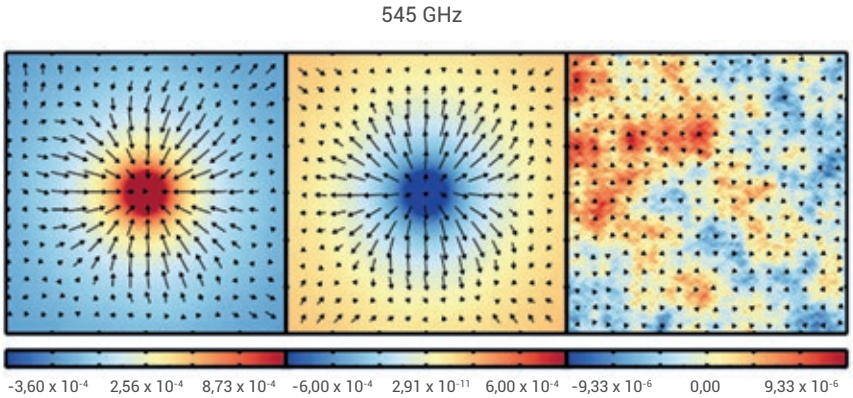
Il existe deux méthodes pour visualiser le réseau de filaments de matière sombre. La première consiste à observer comment les galaxies se distribuent dans l'espace (et dans le temps). La seconde consiste à identifier comment la gravité, induite par la matière sombre dans les filaments, courbe les rayons lumineux issus des galaxies distantes et distord leurs images. C'est l'effet de lentille gravitationnelle faible. Cet effet intervient aussi en distordant et lissant les motifs les plus petits (quelques minutes d'arc sur le ciel) de l'image du CMB utilisée comme lumière d'arrière-plan. Ces distorsions sont employées dans l'analyse fine des cartes du CMB effectuée par la collaboration Planck pour reconstituer la distribution sous-jacente de matière sombre. Grâce à l'effet de lentille gravitationnelle faible, Planck a permis pour la première fois de visualiser l'accumulation (sur la ligne de visée) de matière sombre sur la totalité du ciel (fig. 4), et en a ainsi fourni une cartographie complète et une caractérisation de ses propriétés statistiques.

Cette carte représente en quelque sorte l'ensemble des écrins de matière sombre dans lesquels les galaxies vont se former et évoluer. On les désigne sous la terminologie de « puits de potentiel de matière sombre ». Le gaz des amas de galaxies va aussi s'y agréger, pour y atteindre des températures extrêmes jusqu'à des centaines de millions de degrés.



© ESA & HFI & LFI consortia.

4. Carte du potentiel gravitationnel obtenu par l'analyse de l'effet de lentille gravitationnelle faible sur la carte du fond diffus cosmologique. Ce potentiel est relié à la présence de matière sombre projetée sur la ligne de visée. Les régions avec plus de masse sont en couleur claire, celles avec moins de masse en foncé. (Figure tirée de Planck Collab. I, **A&A** *593* (2015) A1.)



© ESA & HFI & LFI consortia.

5. Visualisation dans l'espace réel de la corrélation entre le fond diffus infrarouge (FDI) de galaxies et le potentiel gravitationnel. Extraits de un degré carré de la carte des températures du fond diffus infrarouge mesurée à la fréquence 545 GHz de Planck-HFI, réalisés en superposant les zones centrées sur les 20 000 pics d'intensité les plus brillants (à gauche), les moins brillants (au milieu) ou choisies aléatoirement (à droite, pour s'assurer que la méthode n'induit aucun effet systématique). Les couleurs traduisent l'intensité de l'émission du fond diffus infrarouge, les flèches tracent par leur longueur et leur direction la déflexion par effet de lentille gravitationnelle sur le rayonnement fossile. On voit que les maxima de température du FDI (en rouge) défléchissent la lumière vers l'intérieur et correspondent donc à des puits de potentiel gravitationnels, alors que les minima de température (en bleu) correspondent à des maxima de potentiel. (Figure tirée de Planck Collab. XVIII, *A&A* **571** (2013) A18.)

En corrélant la carte de matière sombre déduite de l'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB aux positions des galaxies et aux amas connus, la collaboration Planck a montré de manière magistrale que le modèle hiérarchique de formation des structures cosmiques décrit dans ses grandes lignes parfaitement bien la distribution et l'agrégation des objets astronomiques jusqu'à des époques très reculées, correspondant à un décalage vers le rouge de l'ordre de 2.

Par ailleurs, la corrélation des cartes de l'effet de lentille gravitationnelle et de l'émission du FDI (fond diffus infrarouge, qui représente l'ensemble de l'émission des galaxies de l'Univers le long de son histoire et trace la formation stellaire dans les galaxies), toutes deux mesurées par Planck, illustre parfaitement la concomitance de la formation des étoiles dans les galaxies avec la présence d'une densité de matière sombre distordant le CMB (fig. 5).

Enfin, l'analyse des images du FDI révèle des objets inconnus qui apparaissent « froids » dans le jargon des astrophysiciens, c'est-à-dire présentent une émission spectrale très décalée vers le rouge. Ces « points froids du FDI » pourraient être des proto-amas de galaxies (le chainon manquant dans la formation des structures) ou des galaxies individuelles très fortement amplifiées par effet de lentille gravitationnelle. Dans les deux cas, ces objets se situeraient à des décalages spectraux supérieurs à 2. Un grand ensemble d'observations, notamment de l'observatoire européen spatial Herschel, a permis de prouver qu'en effet, sur des centaines d'objets « froids », certains se situent bien à des *redshifts* supérieurs à 2 (fig. 6).

La qualité des données de Planck nous permet donc de sonder aussi la formation des toutes premières structures individuelles et de compléter la « généalogie » des galaxies et des amas.

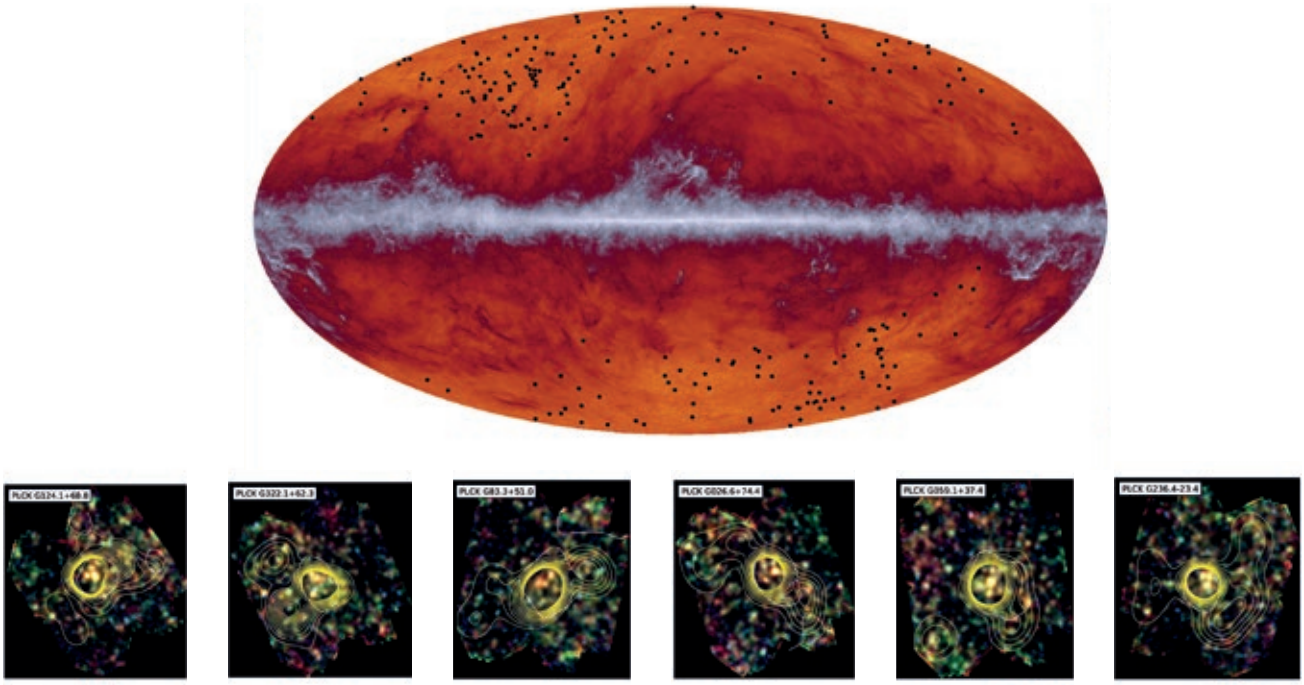
Les amas de galaxies

Les galaxies se regroupent pour former des amas à l'intersection des filaments du réseau cosmique. La matière ordinaire sous forme d'un gaz est chauffée à des températures de l'ordre de dizaines à la centaine de millions de degrés dans les puits de potentiel de matière sombre. Les photons du CMB interagissent avec ce gaz chaud. Ils acquièrent un peu plus d'énergie à la sortie des amas qu'à leur entrée – un effet dénommé « Sunyaev-Zel'dovich » (SZ). Grâce à cette manifestation spectrale unique et caractéristique (voir l'encadré, p. 10), Planck est particulièrement adapté pour la découverte des amas de galaxies. Une combinaison de techniques adaptées a permis à la collaboration Planck de mettre en évidence plus d'un millier d'amas de galaxies (dont plus de 500 nouveaux amas), ainsi que des super-amas. Environ vingt ans après le premier catalogue d'amas complet dans le domaine des rayons X – produit par le satellite ROSAT – les catalogues établis par Planck dans les domaines millimétrique et submillimétrique ont révélé une population d'amas massifs et lointains jamais observés auparavant.

L'observation de ces amas permet de mieux comprendre leur physique, mais aussi de mesurer certains paramètres cosmologiques, puisque la formation de ces objets massifs y est très sensible. Avec un sous-échantillon de plusieurs centaines de ces amas, la collaboration Planck a obtenu les mesures les plus précises de ces paramètres, notamment la densité de matière et l'amplitude des perturbations initiales. De plus, pour la première fois, la mesure de l'effet SZ intégrée sur toute la sphère céleste, effectuée par Planck, a mis en évidence la contribution des amas non résolus. Avec ce signal intégré de l'effet SZ, les paramètres cosmologiques ont été contraints.

Cependant, les résultats obtenus avec les mesures SZ ne sont pas tout à fait en accord avec les paramètres cosmologiques issus de la mesure du CMB par Planck, en particulier l'amplitude des perturbations initiales S_8. Cet écart n'est pas assez important pour remettre en cause fondamentalement le modèle, mais il est suffisamment grand pour provoquer un débat dans la communauté, car il ouvre la possibilité d'une mesure indirecte de la masse des neutrinos, ou d'une révision des estimations des masses des amas de galaxies.

>>>



© Dole, Guéry, Hurier, ESA, Planck Collab., HFI Consortium (IAS, CNES, Univ. Paris Sud, CNRS).

6. Les points froids du fond diffus cosmologique, observés par les observatoires Planck et Herschel. En haut : la totalité du ciel observé par Planck, à la fréquence de 545 GHz (soit environ 550 µm de longueur d'onde). La bande blanche horizontale correspond aux poussières de la Voie lactée. Les points noirs indiquent la position des candidats observés ultérieurement par Herschel. En bas, les images dans les directions de six de ces points froids, prises par l'instrument SPIRE de Herschel à 250, 350 et 500 µm de longueur d'onde, avec les contours de densité surfacique des galaxies observées. (Figure tirée de Planck Collab., Planck intermediate results, XXVII, *A&A* **582** (2015) 30).

>>>

Conclusion

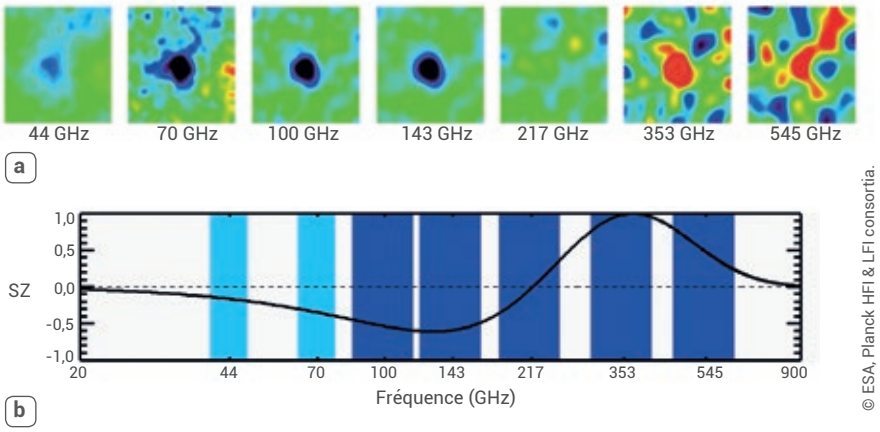
Grâce à sa cartographie complète du ciel à neuf longueurs d'onde et avec une résolution angulaire de 4,5 minutes d'arc, Planck, le satellite européen dédié à l'étude du fond diffus cosmologique, a ouvert une fenêtre d'observation complètement nouvelle entre 100 et 900 GHz (de 3 millimètres à 350 microns de longueur d'onde). Planck a permis de faire des avancées significatives dans de nombreux domaines de l'astrophysique et de la cosmologie. Il a révisé la détermination des paramètres cosmologiques, comme la composition ou l'âge de l'Univers. Il a découvert des centaines de nouveaux amas, superamas et proto-amas de galaxies, et des pouponnières d'étoiles. Finalement, Planck a permis d'établir solidement le paradigme de l'inflation, de sonder la reionisation et de vérifier la validité du scénario hiérarchique de formation des structures cosmiques. ■

Références

- Articles scientifiques de la collaboration Planck : www.cosmos.esa.int/web/planck/publications
- Site grand public en français, avec images et vidéos : www.planck.fr
- Productions scientifiques de la collaboration Planck : www.cosmos.esa.int/web/planck

L'effet Sunyaev-Zel'dovich

L'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ) provient de l'interaction (Compton inverse) entre les photons issus du fond cosmologique avec le gaz chaud présent à l'intérieur des amas de galaxies, provoquant de légers changements de fréquence des photons. L'effet SZ est très caractéristique car, observé aux fréquences inférieures à 217 GHz (soit 1,3 mm de longueur d'onde), l'amas de galaxies apparait comme une zone donnée du ciel plus sombre que la moyenne (signal négatif), alors qu'il est plus brillant (signal positif) aux plus hautes fréquences (fig. E1). L'effet est nul à la fréquence 217 GHz, il n'y a alors pas de variation de brillance.



© ESA, Planck HFI & LFI consortia.

E1. (a) La frise d'images illustre l'effet SZ dans le cas d'un amas de galaxies connu et proche, Abell 2319. La variation de couleur due à cet effet est observée avec les deux instruments de Planck, LFI et HFI, de 44 à 545 GHz. Le signal négatif (zone sombre centrale) à basse fréquence est indiqué en bleu, alors que le signal positif (zone brillante centrale) à haute fréquence est indiqué en rouge.
(b) Le schéma en bas de la figure montre la perte ou le gain en énergie, d'un point de vue théorique, dus à l'effet SZ (bandes de sensibilité de LFI à 44 et 70 GHz en bleu clair, bandes de sensibilité de HFI de 100 à 545 GHz en bleu foncé). L'accord entre prédiction et observation est remarquable.

(a) Conséquence directe de la dilatation de l'espace (l'expansion de l'Univers), les raies caractéristiques des éléments chimiques qui composent étoiles et galaxies apparaissent à des longueurs d'onde décalées vers le rouge par rapport à celles qu'on leur connait en laboratoire : c'est le décalage spectral (*redshift*, en anglais), qui est d'autant plus grand que l'objet est plus éloigné de nous et que la lumière qui nous en parvient a été émise tôt dans l'histoire de l'Univers. Le décalage spectral est défini comme $z = (\lambda_{reçu} - \lambda_{émis}) / \lambda_{émis}$ entre les longueurs d'onde λ reçue et émise. Le décalage vers le rouge appliqué aux galaxies proches ($z < 0{,}02$) permet d'en estimer la distance, en utilisant la relation de Hubble-Lemaître entre la distance et la vitesse radiale apparente des objets observés.

(b) Le fond diffus cosmologique est un rayonnement légèrement polarisé. L'origine est la diffusion Thomson : quand un photon diffuse sur un électron, le premier ressort polarisé dans la direction orthogonale au plan de diffusion. La polarisation nette du CMB, qui résulte des gradients de vitesse dans le plasma, fournit un signal beaucoup plus faible que celui de sa température. Ce signal comprend deux termes, le mode E et le mode B, qui se distinguent par leur comportement vis-à-vis d'une réflexion : E est invariant (c'est un scalaire) et B change de signe. Les fluctuations de densité ne produisent que le mode E, alors que les modes B ne peuvent être produits que par des sources tensorielles, telles que les ondes gravitationnelles. La polarisation B, considérablement plus faible que la polarisation E, n'a pas encore pu être mise en évidence expérimentalement (voir la section sur « L'inflation cosmique », p. 7).

(c) Pour quantifier les inhomogénéités de température du CMB, on le décompose dans la base des harmoniques sphériques à l'aide des coefficients $a_{\ell m}^{T}$. Le CMB étant *a priori* isotrope, il n'y a statistiquement aucune information dans l'indice m, et toute l'information se trouve dans les coefficients $C_\ell^{TT} = \Sigma|a_{\ell m}^{T}|^2 / (2\ell+1)$. Le spectre de puissance angulaire des anisotropies de température du CMB est la distribution des valeurs des coefficients C_ℓ^{TT} en fonction de ℓ (moment multipolaire, inverse d'un angle), qui correspondent à des images ayant des résolutions spatiales de plus en plus grandes. Un pic dans la courbe du spectre de puissance angulaire indique qu'un grand nombre de structures ont la taille correspondante : le premier pic, situé vers 1 degré ($\ell = 200$), correspond à la taille des petites taches visibles sur la figure 1a. La même méthode appliquée à la carte du champ de polarisation du CMB donne accès au spectre de puissance C_ℓ^{EE} en polarisation E (fig. 3a). Enfin, le spectre de puissance en corrélation croisée C_ℓ^{TE} (fig. 3b) est obtenu à partir de la somme des produits $|a_{\ell m}^{T}\, a_{\ell m}^{E}|$.

(d) Les six paramètres du modèle de concordance (ou modèle ΛCDM, pour *Lambda dominated Cold Dark Matter*) sont : la densité baryonique, la densité de matière sombre, l'âge de l'Univers, l'indice spectral n_s des perturbations primordiales scalaires de densité, l'amplitude des fluctuations de courbure de l'Univers et l'épaisseur optique de reionisation.

(e) L'inflation est un modèle cosmologique selon lequel l'Univers a connu une expansion très brutale à ses tous premiers âges (avant 10^{-32} seconde). Le concept d'inflation offre une solution aux problèmes de l'horizon (homogénéité de l'Univers à très grande échelle) et de la platitude de l'Univers.

(f) L'indice spectral scalaire n_s est la pente, en terme de loi de puissance dans l'espace de Fourier, du spectre des fluctuations primordiales de densité engendrées par l'inflation : $P_s(k) \propto k^{(ns-1)}$. Un indice n_s égal à 1 signifie que les fluctuations ont un spectre identique à toute échelle.

MAGNÉTIQUE

05.11.19 ∨ 03.05.20

#ExpoMagnétique
Franklin Roosevelt
Champs-Élysées Clemenceau
palais-decouverte.fr

Une exposition originale conçue par l'institut Jean-Lamour, unité mixte de recherche CNRS – université de Lorraine

PRODUITE PAR

AVEC LE SOUTIEN DE

EN PARTENARIAT AVEC

Imagerie sismique par corrélation de bruit ambiant : du laboratoire à l'échelle globale

Pierre Boué (pierre.boue@univ-grenoble-alpes)
et **Anne Paul** (anne.paul@univ-grenoble-alpes)
Institut des Sciences de la Terre (Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR), 1381 rue de la Piscine, BP 53, 38041 Grenoble Cedex

L'énergie sismique libérée par une source naturelle ou artificielle est habituellement utilisée pour éclairer la structure interne de la Terre. Aujourd'hui, de nouvelles méthodes permettent de se passer de ces sources conventionnelles *via* l'utilisation du bruit sismique ambiant qui, après corrélation de longs enregistrements, transforme virtuellement chaque récepteur en source. Cette méthode d'imagerie du sous-sol est également répétable dans le temps, donnant ainsi accès à une multitude d'applications pour la surveillance des structures géologiques.

Cet article présente le principe de l'interférométrie sismique par corrélation du bruit ambiant à travers différents exemples, de l'échelle du laboratoire à l'échelle globale.

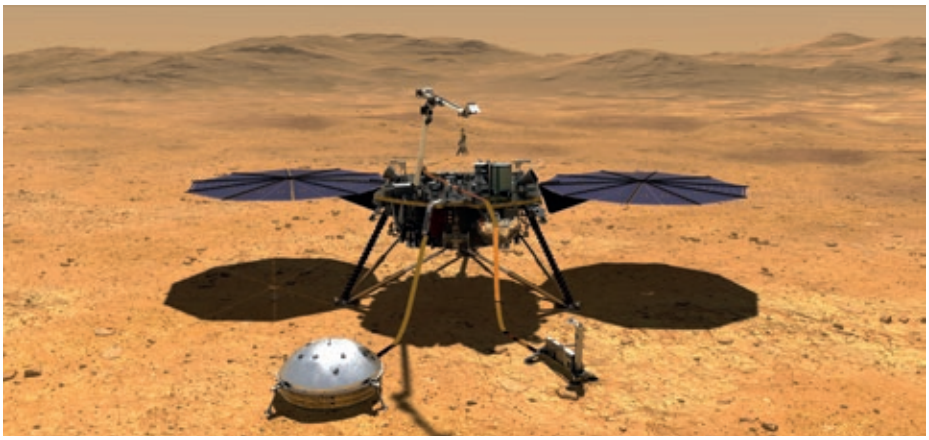
Introduction à l'imagerie sismique

L'analyse des enregistrements du mouvement du sol à la suite d'un séisme ou du déclenchement d'une source artificielle est à l'origine d'une grande partie de nos connaissances sur la structure interne de la Terre. À l'échelle globale, les séismes de magnitude supérieure à ~ 5,5 sont utilisés pour déterminer les grandes structures de notre planète – croute, manteau et noyau – et leurs hétérogénéités. L'emploi de sources déclenchées par l'homme (explosion, camion vibreur, chute d'une masse...) permet d'étudier les structures les plus superficielles présentant des enjeux économiques et sociétaux autour, par exemple, des réservoirs d'hydrocarbures et géothermiques, des gisements miniers, de la caractérisation géotechnique du proche sous-sol. Dans un article récent [1], B. Romanowicz a discuté les grands principes et les enjeux de l'utilisation des ondes sismiques pour l'imagerie ou la modélisation de la Terre profonde.

L'imagerie sismique est principalement basée sur l'analyse des temps de parcours entre deux positions, ainsi que sur l'amplitude des ondes sismiques : mesure absolue entre source et récepteur, ou mesure relative entre deux récepteurs. Selon les objectifs de l'étude et les paramètres de la source, différents types d'ondes et bandes de fréquence sont utilisés. Dans le domaine pétrolier par exemple, l'imagerie des réservoirs d'hydrocarbures est très majoritairement basée sur l'analyse des ondes P (ondes de compression) entre 10 et 1000 Hz. Pour la Terre profonde, les ondes P et S (cisaillement) sont employées conjointement et à plus basse fréquence (environ 0,1 à 10 Hz). Les propriétés de dispersion (vitesse dépendant de la fréquence) des ondes de surface (Rayleigh, Love) sont très largement utilisées pour imager les structures de la croute terrestre et du manteau supérieur dans la bande de fréquence entre 0,01 et 1 Hz. Enfin, à encore plus basse fréquence, les modes propres de la Terre permettent aussi de contraindre les grandes échelles jusqu'au noyau interne.

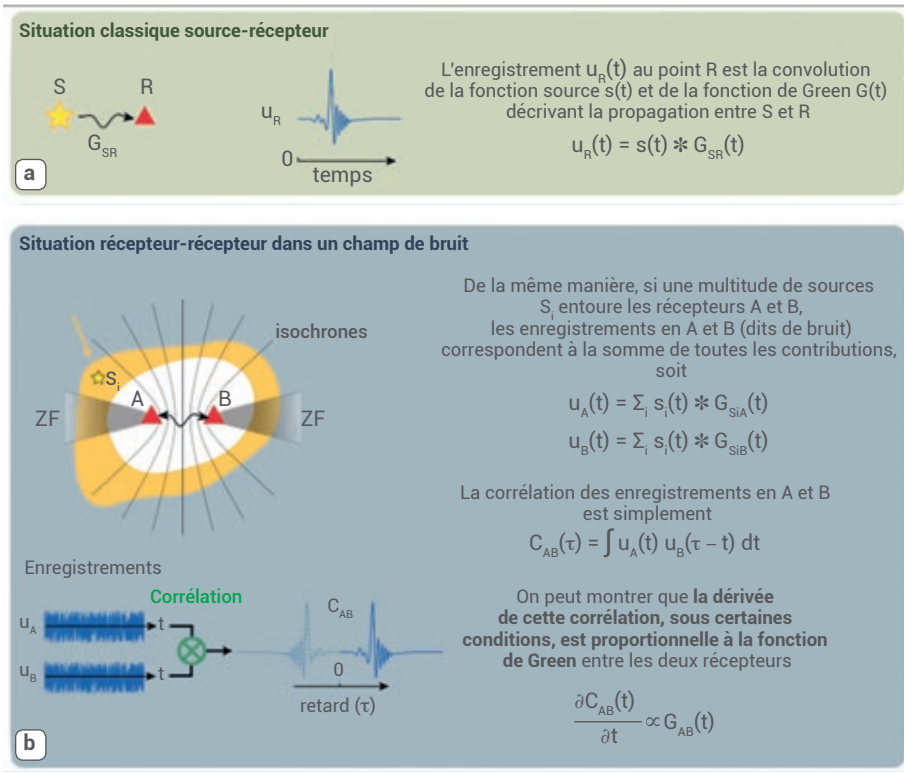
Fonction de Green et corrélation

Un signal sismique issu d'une source quelconque et enregistré par un récepteur distant, porte à la fois l'information relative à la source (énergie, durée, directivité, etc.) et celle sur le trajet parcouru par les ondes entre source et récepteur. Au premier ordre, seule l'information portant sur le trajet est utile pour imager la structure ; il est donc nécessaire de s'affranchir au maximum de l'information liée à la source. On appelle fonction de Green la fonction de transfert élastodynamique du milieu de propagation. C'est la réponse de la structure à une sollicitation ponctuelle en temps et en espace, qui décrit entièrement et de manière unique la propagation des ondes élastiques entre source et récepteur (fig. 1a). Plusieurs stratégies existent pour estimer la fonction de Green à partir de signaux sismiques, la plus rapide étant simplement de considérer la



© NASA/-JPL-Caltech.

Vue d'artiste de la sonde spatiale InSight de la NASA à la surface de la planète Mars, où elle s'est posée le 26 novembre 2018. Le sismomètre SEIS (en avant-plan à gauche), conçu par l'Institut de Physique du Globe de Paris et supervisé par le CNES, est destiné à l'étude de la structure interne de Mars.



1. Principe de la détermination de la fonction de transfert élastodynamique d'un milieu par enregistrement des ondes sismiques.
(a) Méthode utilisant l'enregistrement de l'onde émise par une source (plus ou moins) ponctuelle. Le signal $u_R(t)$ (en bleu) enregistré par le récepteur R correspond à la combinaison du signal de la source S et de la propagation entre les deux positions, décrite par la fonction de Green $G_{SR}(t)$.
(b) Méthode utilisant les enregistrements par deux récepteurs (A et B) d'un champ d'ondes émis par une multitude de sources (symbolisées par la surface jaune), simulant le bruit sismique. Ces enregistrements continus sont intercorrélés pour reconstruire un signal proportionnel à la fonction de Green élastodynamique $G_{AB}(t)$ entre les deux récepteurs. Sur l'image en haut à gauche, les hyperboles noires symbolisent les positions où les sources interfèrent à des temps constants (isochrones). Les zones grises représentent les positions où les sources de bruit interfèrent de manière cohérente (zones de Fresnel, ZF) pour que la corrélation puisse tendre vers la réponse du milieu entre A et B. Pour que la corrélation des enregistrements en A et B soit proportionnelle à la fonction de Green G_{AB}, il faut que le bruit sismique contienne toutes les ondes et trajets possibles dans le milieu (condition d'équipartition du champ).

source réelle comme ponctuelle. Si cette simplification n'est pas justifiée, les propriétés de la source doivent être estimées au mieux pour corriger les signaux.

Une approche radicalement différente a été proposée en acoustique, puis appliquée en sismologie dès le début des années 2000. Plutôt que d'utiliser les enregistrements issus d'une source plus ou moins ponctuelle comme un séisme, l'idée est de reconstruire directement la fonction de Green entre deux récepteurs. Il faut pour cela que ces derniers enregistrent un champ d'onde complexe *a priori* chaotique. Un schéma conceptuel de la méthode est présenté en figure 1b.

En 2001, une première expérience a démontré dans le domaine ultrasonore que la corrélation d'un bruit diffus enregistré par deux récepteurs placés à la surface d'un bloc d'aluminium, converge vers la fonction de Green entre les deux récepteurs [2]. Dans cette expérience, le champ diffus (équivalent ici à la coexistence de tous les modes élastiques) est obtenu par réverbérations multiples sur les parois du volume. La qualité de la convergence vers la fonction de Green augmente alors avec la durée du signal effectivement corrélé. En d'autres termes, l'opération de corrélation (ou interférométrie) entre deux enregistrements synchrones et distants permet de reconstruire un signal déterministe simple correspondant à l'enregistrement par l'un des deux récepteurs du champ d'onde émis par une source ponctuelle impulsionnelle positionnée sur l'autre récepteur. Tout se passe comme si le champ initial comprenait

>>>

>>>

toutes les ondes et trajets possibles dans la structure et dans les bonnes proportions (on parle alors d'équipartition du champ d'onde), et que l'opération de corrélation permettait d'extraire (de filtrer) uniquement l'information correspondant à la propagation entre les deux récepteurs. On reconstitue ainsi la fonction de Green entre les deux points de mesure.

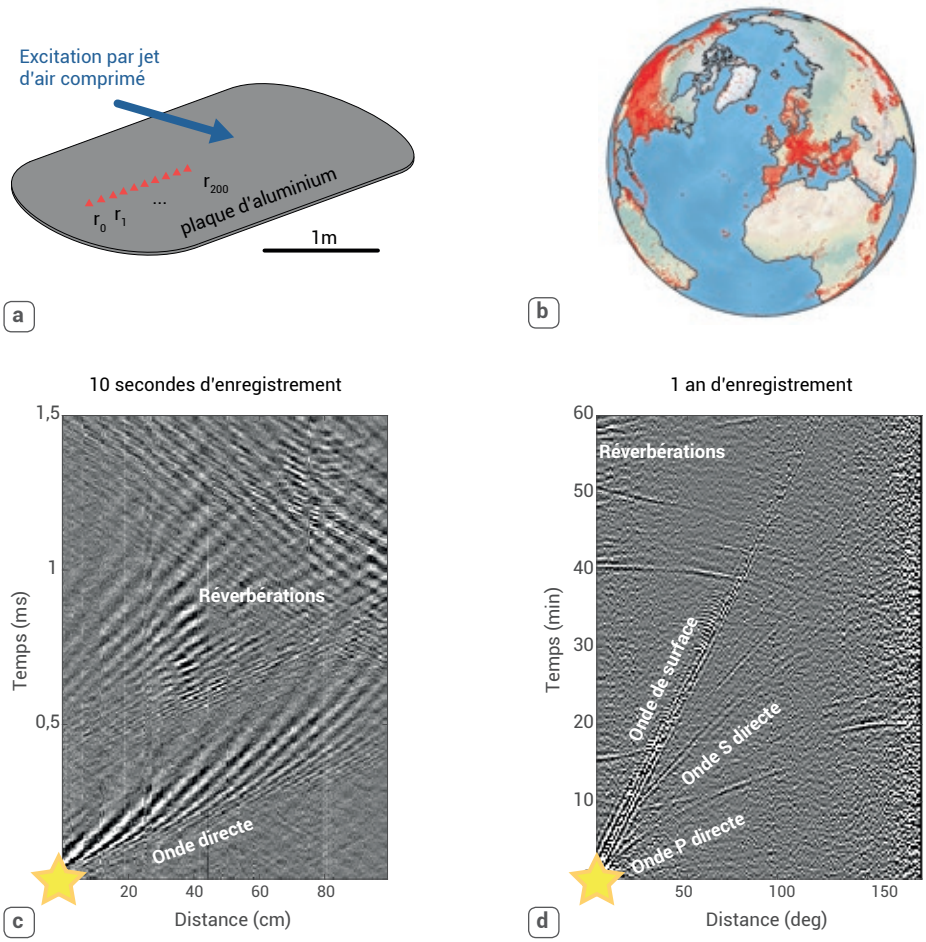
L'idée de reconstruire une information déterministe utilisable pour l'imagerie à partir de signaux chaotiques et dont les sources sont modélisables par des processus aléatoires, avait déjà été abordée en sismologie, principalement de manière théorique, dès la fin des années 1950. L'héliosismologie a également exploré et appliqué au Soleil, avec succès, ce type d'approche dans les années 1990.

Une expérience similaire à celle du bloc d'aluminium décrite plus haut est présentée en figure 2a. Un champ complexe d'ondes élastiques est généré à partir d'un jet d'air comprimé à la surface d'une plaque d'aluminium pendant quelques secondes. Une ligne de récepteurs enregistre le signal sur un temps long. La figure 2c montre le résultat de la corrélation de l'enregistrement mesuré par un récepteur de référence en extrémité de ligne (r_0) avec ceux mesurés par tous les autres récepteurs. Des ondes (dites de Lamb) directes et réverbérées sont clairement visibles à la surface de la plaque. Après corrélation, tout se passe comme si une source avait été déclenchée à la position du récepteur de référence r_0. Dans cette représentation en temps et distance, on peut par exemple mesurer très facilement la vitesse (et la dispersion) de l'onde dans la plaque. Ce résultat est transposable à la surface de la Terre, comme expliqué dans la section suivante. On peut noter que plusieurs réalisations de l'expérience (excitation de la plaque, corrélation des enregistrements) doivent être moyennées pour atteindre un résultat exploitable.

La corrélation de bruit en sismologie : des applications devenues standard

Pour transposer à la Terre l'expérience du bloc d'aluminium de Lobkis et Weaver, Campillo et Paul [3] ont d'abord montré que les ondes de surface qui forment l'essentiel de la fonction de Green entre des sismomètres distants de plusieurs dizaines de kilomètres peuvent être reconstruites par corrélation de la *coda*, train d'ondes diffuses visible après la partie principale (balistique) des signaux émis par un séisme, et dont l'énergie décroît rapidement avec le temps. Une étape importante a été franchie lorsque ce même résultat a été obtenu en utilisant non pas la *coda* des enregistrements de séismes, mais les vibrations naturelles et perpétuelles de la surface du sol qui forment le bruit sismique ambiant. Alors qu'il avait toujours été considéré comme nuisible pour la détection et l'étude des séismes, le bruit sismique ambiant est devenu, grâce à la corrélation, une source d'énergie universelle, stable dans le temps et gratuite, permettant d'étudier la structure de la Terre [4].

Le bruit sismique ambiant a de multiples origines selon la gamme de fréquences considérée. Aux fréquences supérieures à 1 Hz, le bruit est dominé par des processus locaux à régionaux, anthropiques (infrastructures urbaines, activités industrielles, etc.) et/ou météorologiques (vent, pluie, etc.). En deçà de 1 Hz, le bruit est très largement dominé par l'interaction de l'océan avec la Terre solide. Son contenu fréquentiel est dominé par deux pics caractéristiques vers 0,07 Hz et 0,14 Hz : ces deux pics, dits microsismiques, corres-

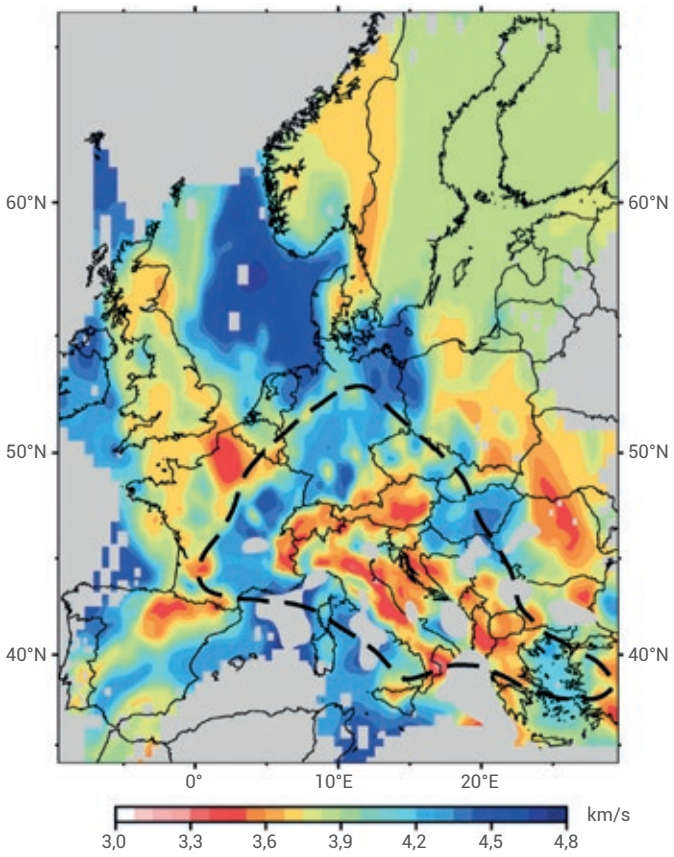


2. Expériences réelles de corrélation du champ d'ondes ambiant : (a et c) à l'échelle du laboratoire, (b et d) à l'échelle de la Terre.
(a) Génération et détection d'ondes élastiques à la surface d'une plaque d'aluminium ; les capteurs sont représentés par des triangles rouges.
(b) Distribution des stations sismiques (points rouges) à la surface de la Terre.
(c et d) Variations temporelles des fonctions de corrélation, classées selon la distance à un récepteur de référence (r_0 dans le cas de la plaque). L'amplitude est représentée en niveaux de gris. L'axe du temps correspond à l'axe du retard dans la figure 1. Dans les deux cas, la fonction de corrélation converge vers la réponse élastodynamique du milieu (une plaque d'aluminium ou la Terre).
Sources : (c) Ludovic Moreau. (d) Modifié de Boué *et al.* [6].

pondent respectivement à la fréquence dominante de la houle et à l'interaction non linéaire de deux trains de houle se propageant en sens opposés, interaction qui génère des variations de pression sur le plancher océanique. À plus basses fréquences (en dessous de 0,01 Hz), les mécanismes à l'origine du bruit sismique sont toujours débattus mais semblent principalement liés à des forçages atmosphériques et océaniques.

Par chance, la bande de fréquence des deux pics microsismiques correspond précisément aux besoins de l'imagerie par ondes de surface pour les structures de la croute terrestre à l'échelle régionale (quelques centaines de kilomètres). Pour ce type de besoin, l'utilisation de sources conventionnelles (séismes, explosions) est aujourd'hui quasiment éclipsée par celle du bruit sismique ambiant qui, par interférométrie de longues séries temporelles, transforme virtuellement chaque récepteur en une source fictive. Le développement de grands réseaux d'observation sismologique constitués de plusieurs centaines de sismomètres enregistrant en continu sur des temps longs (plusieurs mois à années) a permis la progression rapide de l'imagerie par corrélation de bruit sismique, en remplacement des techniques basées sur les sources conventionnelles. En s'appuyant sur l'analyse des ondes de surface, l'imagerie sismique des structures de la croute et du manteau supérieur est devenue possible à l'échelle de continents entiers et avec une résolution jamais atteinte auparavant, y compris en l'absence totale de séismes. La démarche standard de ce type d'imagerie est la construction d'un modèle de vitesse des ondes S par inversion des mesures de dispersion des ondes de surface reconstruites à partir du bruit sismique ambiant. La figure 3 présente une carte de vitesse des ondes S à 30 km de profondeur sous l'Europe de l'Ouest, issue de ce type d'analyse. Pour atteindre ce niveau de résolution sur une zone aussi étendue, il a fallu intercorréler plusieurs années de bruit sismique enregistré par près de 1300 stations sismologiques.

Un second atout majeur de la méthode de corrélation de bruit sismique est sa *répétabilité* dans le temps. Surveiller les variations temporelles de vitesse des ondes sismiques associées à la dynamique de structures géologiques comme des failles ou des volcans était quasiment impossible faute de pouvoir éclairer ces structures par des sources identiques et répétées dans le temps. Le bruit sismique dans la bande de fréquences microsismique (autour de 0,1 Hz) étant un processus permanent et assez stationnaire (en temps et surtout en fréquence), sa corrélation donne des signaux significatifs sur des fenêtres de temps relativement courtes, de l'ordre d'une heure. Ainsi, il devient possible de sonder régulièrement le milieu et de mesurer de manière extrêmement fine son évolution. Par cette méthode et à une échelle spatiale de plusieurs kilomètres (par exemple sur un volcan ou une faille active), on peut mettre en évidence des variations relatives des vitesses des ondes sismiques de l'ordre de 0,01% avec une résolution temporelle de l'ordre de quelques heures. Plusieurs exemples de ce type d'applications sont présentés dans la référence [5]. Le défi le plus important reste encore aujourd'hui d'observer des variations des propriétés mécaniques du milieu géologique avant l'occurrence d'un séisme, observation déjà réalisée à l'échelle du laboratoire.



3. Carte de vitesse des ondes de cisaillement à 30 km de profondeur sous l'Europe de l'Ouest. Mesures réalisées par analyse de la dispersion des ondes surfaciques de Rayleigh, reconstruites par corrélation des enregistrements continus de bruit sismique par les réseaux sismologiques européens permanents et temporaires. La région où l'image est la mieux résolue est délimitée par le trait en tirets noirs. Source : Lu *et al.* [7].

Des limitations et des solutions en développement

Au-delà du succès des méthodes d'imagerie qui lui sont associées, il faut noter que la technique de corrélation du bruit sismique possède un certain nombre de limitations. La fonction de corrélation ne converge que très partiellement vers la véritable fonction de Green élastodynamique du milieu, puisque ce sont majoritairement les ondes de surface qui sont reconstruites du fait de leur surreprésentation dans le champ de bruit naturel. Une conséquence directe est donc la limitation *a priori* de la résolution des images en profondeur, puisque la sensibilité des ondes de surface aux structures qu'elles traversent décroit rapidement avec la profondeur. La bande de fréquences accessible étant fatalement limitée à celle du bruit ambiant, elle ne permet en général que la reconstruction du mode fondamental des ondes de surface. L'amplitude des

>>>

>>>

ondes reconstruites par corrélation de longues séries temporelles de bruit est souvent biaisée et son utilisation directe n'est que rarement possible. Ces amplitudes ont pourtant une importance cruciale pour mesurer l'atténuation du milieu ou encore caractériser les effets de site – amplifications ou atténuations par les structures locales – pour l'évaluation du risque sismique. Calibrer l'amplitude des corrélations à partir d'enregistrements de séismes ou du calcul de sismogrammes synthétiques reste généralement nécessaire pour ce type d'application. Enfin, il peut arriver que le bruit sismique ne provienne que d'une seule direction, ce qui compromet même la reconstruction des ondes de surface par corrélation pour certains couples de stations.

Qu'il s'agisse de mesurer des amplitudes ou des vitesses de propagation, les biais éventuels proviennent toujours d'un défaut de convergence des corrélations vers la fonction de Green lié au non-respect de la condition d'équipartition du champ d'onde généré que constitue le bruit ambiant (équilibre d'énergie entre les ondes P et S par diffusion et isotropie du champ). Aux fréquences qui intéressent les sismologues, le problème trouve généralement son origine dans une répartition spatiale ou temporelle inadéquate des sources de bruit autour de la zone étudiée. Il est intéressant de constater que les limitations évoquées ici sont finalement très proches de celles que l'on espérait éviter en remplaçant les séismes par des corrélations de bruit : il est toujours préférable de connaitre les paramètres de la source du signal. En s'attaquant directement à l'étude de l'origine et des propriétés du bruit ambiant, une multitude de travaux récents montrent qu'il est encore possible de repousser les frontières du domaine d'utilisation des corrélations de bruit pour l'imagerie et la surveillance sismique à toutes les échelles.

À l'échelle globale, on sait depuis des dizaines d'années que le bruit sismique ambiant contient des ondes de volume qui se propagent à travers toute la planète et trouvent leur source dans les grandes tempêtes océaniques. La corrélation de bruit entre deux récepteurs placés à la surface de la Terre et distants de plusieurs milliers de kilomètres permet-elle de reconstruire ces ondes de volume et d'accéder ainsi à de nouvelles informations sur la structure profonde de la Terre ? La réponse positive à cette question a largement bénéficié de l'implantation récente de réseaux denses de plusieurs centaines à milliers de sismomètres de haute qualité fonctionnant pendant plusieurs années en continu, et de la distribution libre de leurs données. Le résultat est une augmentation significative de la qualité des enregistrements, permettant l'émergence dans les corrélations de bruit d'une multitude de trajets habituellement visibles seulement dans les enregistrements de forts séismes. La figure 2d montre les signaux obtenus par corrélation d'une année de bruit enregistré par des stations sismologiques réparties à la surface de la Terre (fig. 2b). Les corrélations sont ici classées en fonction de la distance (en degrés) qui sépare les couples de stations. En plus de l'onde de surface, on distingue nettement les ondes directes P et S ayant traversé le manteau. Les arrivées tardives, à partir de 40 mn, correspondent à des ondes réverbérées à l'antipode et ayant transité à travers le manteau et le noyau.

L'utilisation d'un grand nombre de stations réparties à la surface de la Terre (fig. 2b) met en lumière la structure moyenne, radiale, de la Terre. Pour aller au-delà et caractériser des hétérogénéités de structure, ce type de reconstruction doit rester possible pour des trajets, et donc des couples de stations précis correspondant à des signaux extrêmement ténus. Afin d'optimiser les capacités d'observation de ces signaux faibles, on regroupe des stations sismologiques en antennes (ou mini-réseaux) pour abaisser le seuil de détection.

Différentes stratégies de filtrage permettent aussi de réduire les signaux parasites. Plutôt que de corréler de longues séries de bruit ambiant, une stratégie alternative pour reconstruire ces ondes de volume est de corréler des séries temporelles plus courtes, mais bien situées dans la *coda* (signaux tardifs) d'enregistrements de forts séismes. Ceux-ci génèrent en effet un champ riche en ondes de volume qui se réverbèrent à l'intérieur de la Terre pendant plusieurs jours après l'évènement. Des travaux récents discutent les avantages et inconvénients de l'utilisation de la *coda* des séismes plutôt que du bruit sismique pour sonder la Terre profonde. Dans les deux cas, la possibilité de réaliser des mesures locales par corrélations entre deux stations est une approche très prometteuse, alors que l'imagerie de la Terre profonde à partir des séismes est très limitée par leur distribution hétérogène à la surface du globe. On peut notamment citer la résolution limitée des modèles d'anisotropie de vitesse sismique de la graine (noyau interne), simplement due à l'absence de séismes en zones polaires (Arctique et Antarctique).

À plus petite échelle, des travaux récents permettant d'améliorer la convergence de la corrélation de bruit vers la fonction de Green ouvrent des perspectives importantes pour la surveillance à haute résolution en temps et en espace de structures géologiques actives. On retrouve notamment ce type d'applications de surveillance « passive » dans des domaines de recherche aujourd'hui très dynamiques, comme les nombreux travaux sur le rôle des fluides dans l'initiation des séismes. Il s'agit par exemple de mieux comprendre les mécanismes responsables de la sismicité à proximité de certaines zones d'exploitation d'hydrocarbures (sismicité induite).

Enfin, les méthodes présentées dans cet article trouvent une résonance particulière aujourd'hui, alors qu'un sismomètre vient d'être déployé sur Mars par la mission spatiale InSight (voir la photo, p. 13). L'utilisation du bruit de fond et plus généralement de la corrélation de champs complexes, ou de l'autocorrélation dans le cas de l'unique station InSight, pourrait se révéler déterminante dans la caractérisation de la structure interne d'autres corps du système solaire, pour certains dépourvus de tectonique active et donc de séismes. ■

Références

1• B. Romanowicz, *Reflets de la physique* **56** (2018) 4-9.

2• O.I. Lobkis et R.L. Weaver, *J. Acoust. Soc. Am.*, **110** (2001) 3011-3017.

3• M. Campillo et A. Paul, *Science*, **299** (2003) 547-549.

4• N.M. Shapiro et M. Campillo, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (2004) L07614.

5• N. Nakata, L. Gualtiéri et A. Fichtner (eds.), *Seismic ambient noise*, Cambridge University Press (2019).

6• P. Boué *et al.*, *Geophys. J. Int.*, **194** (2013) 844-848.

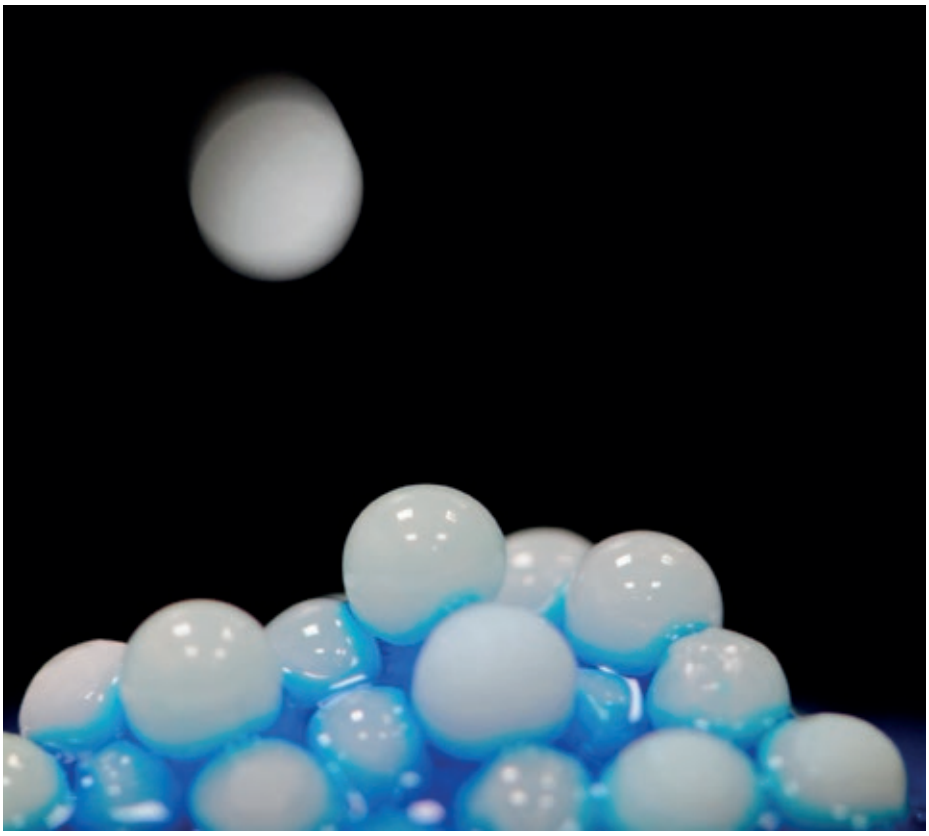
7• Y. Lu *et al.*, *Geophys. J. Int.*, **214** (2018) 1136-1150.

Érosion et accrétion de matériaux granulaires humides

Alban Sauret[1,2], **Guillaume Saingier**[1] **et Pierre Jop**[1] (pierre.jop@saint-gobain.com)
(1) Surface du Verre et Interfaces (UMR125 CNRS/Saint-Gobain), 93303 Aubervilliers Cedex
(2) Department of Mechanical Engineering, University of California,
Santa Barbara, CA 93106, USA

Le comportement des matériaux granulaires humides hétérogènes, éléments incontournables de nombreux processus industriels et géophysiques, résiste encore à une modélisation complète. L'interaction des grains avec une phase liquide doit être éclaircie afin d'optimiser les procédés de mélange, notamment la dispersion des grains d'un agrégat cohésif. Modéliser ces interactions permettrait aussi de mieux décrire des éboulements granulaires dont les propriétés mécaniques évoluent avec des variations de teneur en liquide et de répartition spatiale.

Des recherches actuelles se tournent vers la compréhension des échanges dans ces matériaux, pour isoler les mécanismes par lesquels des grains se mélangent à un liquide ou à une phase granulaire humide.



1. **Exemple de milieu granulaire** (billes de sucre de 3,8 mm de diamètre) **saturé par de l'eau bleue, et sur lequel tombe un grain sec.**

Mélanger des grains et un liquide

Quiconque a déjà préparé une pâte à crêpe ou une sauce béchamel a été confronté à la question des grumeaux. Cet exemple, bien qu'ordinaire, d'incorporation d'un liquide, en l'occurrence le lait, à une poudre, ici la farine, permet rapidement de cerner toutes les problématiques liées à ce type de mélange. L'objectif est d'obtenir une pâte lisse et homogène, le plus rapidement possible et avec le moins d'effort. L'apparition de grumeaux, des agrégats de farine encore secs, dispersés dans le lait, constitue le principal écueil à éviter, en ajoutant progressivement le lait et en mélangeant énergiquement.

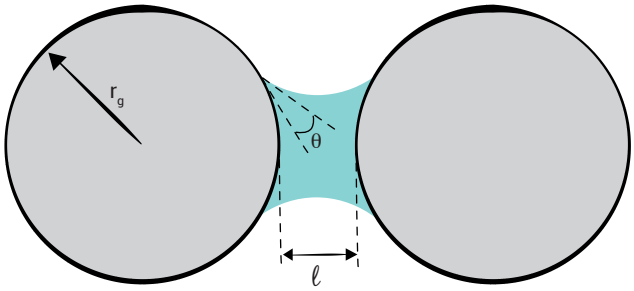
La cuisine est loin d'être le seul domaine où des mélanges granulaires sont réalisés. Ces phénomènes d'incorporation de liquide à des matériaux dispersés sont primordiaux dans de multiples applications industrielles et nombre de phénomènes naturels. On estime par exemple que 50% des produits vendus dans le monde sont issus de

>>>

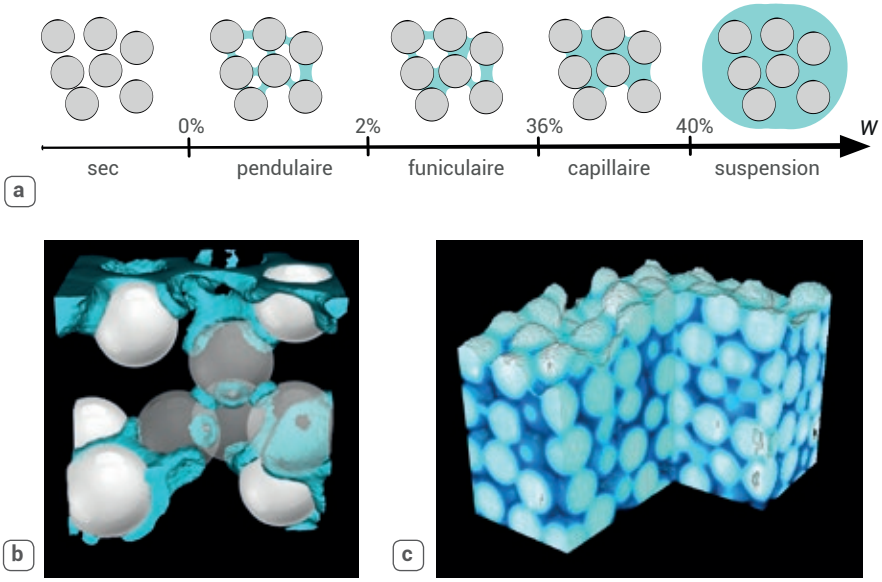
Force d'origine capillaire des ponts liquides

Encadré 1

Assimilons dans un premier temps les grains de sable à des billes sphériques de rayon r_g. Lorsque l'on dépose un peu de liquide entre deux billes, il se crée un petit pont liquide (« pont capillaire »), qui persistera tant que sa longueur ℓ ne dépasse pas la longueur de rupture (fig. E1). Pour des grains hydrophiles, l'interface entre le liquide et l'air présente une courbure dominante tournée vers l'extérieur. Cette courbure engendre une pression de Laplace (différence de pression entre l'air et le liquide) négative, proportionnelle à la tension de surface γ entre le liquide et l'air. La pression de Laplace vient donc réduire celle du liquide par rapport à la pression atmosphérique. Cette différence de pression engendre une force d'attraction entre les deux grains de sable, qui s'ajoute à la force de traction sur la ligne triple (grain/air/liquide), et les garde collés ensemble. L'amplitude de la force de cohésion résultante, due à la capillarité, s'écrit au premier ordre : $F_{cap} = 2\,\gamma\, r_g \cos\theta$, où γ est de l'ordre de 70 mN/m pour l'eau, et θ est l'angle de mouillage du liquide sur le grain [4]. Pour des grains de sable de rayon r_g = 250 µm, la présence de liquide engendre une force adhésive d'amplitude de l'ordre de 100 µN. Le poids du grain, quant à lui, a une valeur de l'ordre du µN. Ainsi, la force capillaire est une centaine de fois plus grande que la force de pesanteur, et c'est donc bien l'ajout d'une petite quantité d'eau qui permet à un château de sable de ne pas s'effondrer !



E1. Schéma d'un pont capillaire dans l'état pendulaire entre deux grains.



2. Les différents états d'un matériau granulaire humide statique. (a) Représentation schématique de la répartition du liquide au sein d'un matériau granulaire humide en fonction de la fraction liquide *W*. (b-c) Exemples de reconstruction de matériaux granulaires humides (billes de verre de 400 µm de diamètre) obtenue par microtomographie par rayons X, à faible fraction liquide au début du régime funiculaire (b), puis à plus grande fraction liquide dans le régime capillaire (c). Les billes sont en blanc, le liquide en bleu.

>>>

matières premières sous forme de grains, faisant des matériaux granulaires le second type de matériau le plus utilisé dans l'industrie après l'eau. Les principaux domaines d'activités concernés sont l'extraction minière, le génie civil, l'agro-alimentaire, les industries chimique et pharmaceutique, ainsi que l'industrie verrière, qui utilisent des matières premières ou finales granulaires [1].

Comment peut-on décrire les interactions entre des grains secs et des grains déjà humides pour mieux comprendre les mélanges entre des grains et de l'eau ? Afin de montrer les récentes avancées dans ce domaine, nous allons commencer par rappeler des éléments de la physique des milieux granulaires humides statiques, notamment les forces de cohésion entre grains. Nous pourrons alors ensuite discuter des deux cas limites : l'érosion d'un agrégat humide où des grains secs en écoulement peuvent arracher des grains collés à l'agrégat par des ponts capillaires. Puis nous illustrerons l'autre extrême où des grains secs peuvent adhérer à un agrégat humide et faire croitre sa taille. Ces deux situations illustrent la complexité de la physique des granulaires humides.

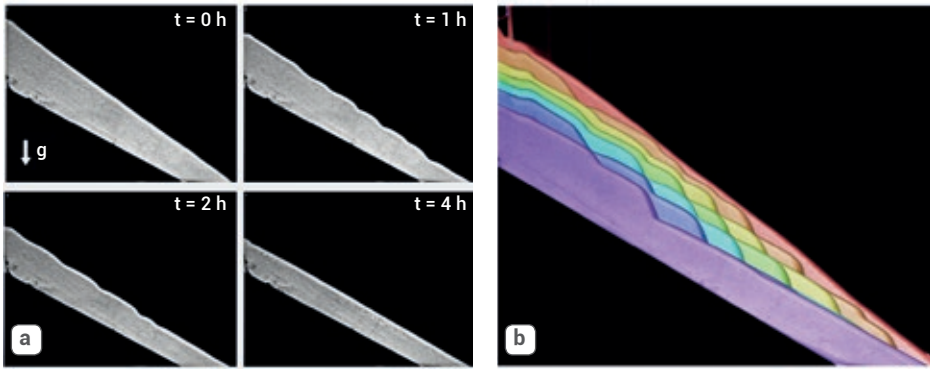
Matériaux granulaires humides et forces capillaires

Quand on parle de grains de sable humides, on pense souvent aux châteaux de sable que l'on peut réaliser étant enfant sur le bord de la plage [2]. Ces exemples de structure démontrent les effets spectaculaires de la cohésion capillaire induite par le liquide, comme illustré sur la figure 1 (p. 17). L'apport d'une faible quantité de liquide est suffisant pour changer profondément les propriétés mécaniques du matériau granulaire [3]. Ce comportement cohésif résulte de la formation de ponts liquides entre les grains (voir encadré 1).

Si les interactions capillaires sont faciles à décrire à l'échelle de deux grains, leur prise en compte dans un tas de grains est plus délicate. En effet, la répartition spatiale hétérogène du liquide modifie localement les propriétés mécaniques du matériau granulaire humide [5]. À l'échelle des grains, plusieurs états ont été historiquement définis (il y a un siècle, en 1917, par Versluys), en référence à la configuration géométrique que le liquide adopte en fonction de la fraction liquide *W*, c'est-à-

dire le volume de liquide divisé par le volume total. Les différents états d'un matériau granulaire humide statique sont représentés sur la figure 2a par ordre croissant de fraction liquide : l'état *sec* (sans liquide) est suivi de l'état *pendulaire* où le liquide, suspendu entre deux grains, forme des ponts capillaires indépendants. Ensuite vient l'état *funiculaire* (car le liquide forme des « cordons »), lorsque les ponts capillaires commencent à fusionner et le liquide relie plusieurs grains entre eux, formant ainsi des chapelets de pores complètement saturés et connectés. Puis l'état *capillaire* (nommé ainsi car l'eau envahit les pores des roches, « fins comme des cheveux ») intervient lorsque l'empilement granulaire est quasiment saturé (sauf en périphérie), mais reste cohésif en raison de la dépression capillaire appliquée par les ménisques liquides à l'interface liquide/air. Enfin, le milieu est sous forme de *suspension* lorsque les grains sont complètement immergés dans un excès de liquide. Des exemples de la morphologie d'un échantillon partiellement saturé, obtenue par microtomographie par rayons X, sont représentés sur les figures 2b et 2c. Dans cet article nous allons considérer les deux cas limites présentant une cohésion : le *régime pendulaire* où le matériau peut être érodé par des grains en écoulement, et le *régime capillaire* où de nouveaux grains peuvent être capturés par accrétion.

La majorité des études s'est pour l'heure intéressée aux propriétés mécaniques des matériaux granulaires humides statiques, dans lesquels le liquide est réparti spatialement de manière uniforme. Néanmoins, pour réussir à percer les mystères de la transition d'un milieu granulaire sec à un matériau humide au cours d'un mélange, il faut définir les mécanismes et la dynamique d'interaction entre des grains et du liquide au niveau des interfaces. Dans la suite, nous présentons des résultats récents liés aux deux cas limites de fraction liquide W, menant à l'érosion ou à l'accrétion d'un milieu granulaire humide.



4. Expérience d'érosion à la surface pentue d'un tas bidimensionnel humide.
(a) Évolution temporelle de la morphologie d'un tas granulaire humide (aspect granuleux) sur lequel s'écoule un milieu granulaire sec (fine couche blanche) qui l'érode et induit la formation transitoire de marches (les grains sont des billes de verre de 300 µm de diamètre).
(b) Superposition d'images acquises toutes les 30 minutes montrant la progression des marches vers l'amont de l'interface du tas humide sous l'effet de l'érosion [7]. Le temps va du rouge (image du fond) au violet (image au premier plan).
La largeur des images correspond à 27 cm.
(Voir la vidéo : http://svi.cnrs.fr/spip/IMG/avi/erosion_heap.avi).

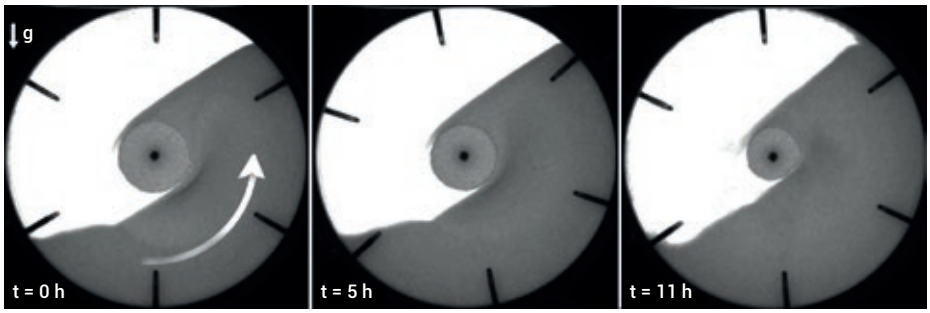
Érosion : casser les ponts capillaires

Nous nous plaçons ici dans le régime pendulaire : $W < 2\%$. La question est de savoir à quelle vitesse un tel agrégat humide et cohésif s'érode lorsqu'il interagira avec un écoulement granulaire sec. Ce phénomène d'érosion intéresse particulièrement les géophysiciens qui cherchent à comprendre la morphologie des sols à la suite d'un éboulement ou d'une coulée pyroclastique (écoulement volcanique très violent, mélange de gaz et de particules voire de rochers, dévalant les flancs à grande vitesse). Dans son principe, l'érosion par l'écoulement granulaire ressemble grandement à l'érosion des sédiments au fond des rivières, où la force exercée par le courant sur une particule du lit permet de vaincre son poids apparent et ainsi d'éroder le fond. La principale différence, ici, réside dans la nature de la force imposée par l'écoulement sur le matériau cohésif humide.

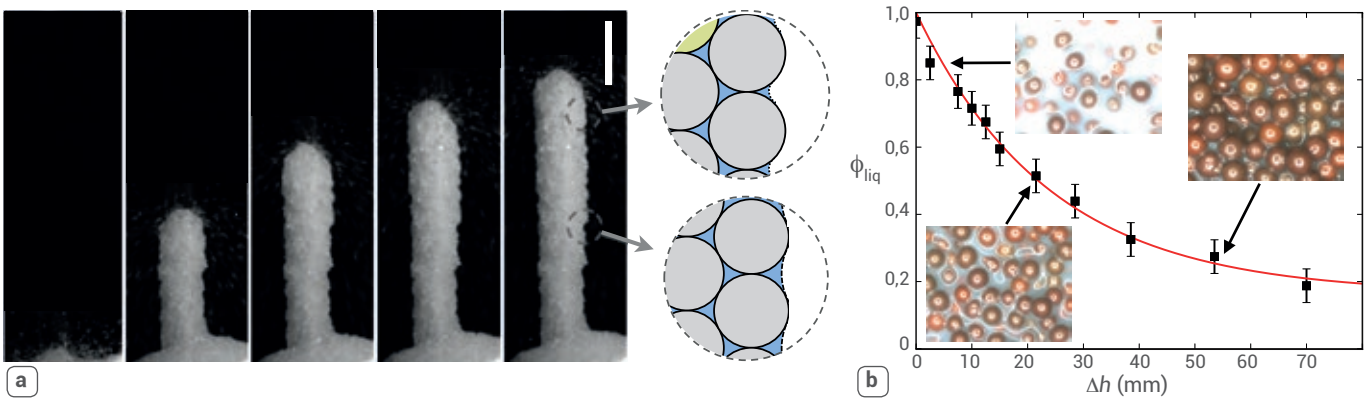
Afin de comprendre ce mécanisme d'érosion, du matériau granulaire humide (homogène et cohésif) est tout d'abord préparé par ajout contrôlé d'un liquide (eau ou huile), puis il est soumis à un écoulement granulaire sec. Pour cela nous utilisons deux configurations. La première est un cylindre tournant d'axe horizontal, de faible épaisseur, qui permet de fixer un agrégat humide cylindrique en son centre et d'entrainer les grains secs par rotation afin qu'ils s'écoulent par-dessus l'agrégat (fig. 3). Cet écoulement granulaire arrache des grains à l'agrégat humide et ainsi l'érode. En pratique, le matériau ne s'érode que si l'énergie transférée par les chocs est suffisante pour casser les ponts capillaires et emporter le grain.

Nous avons mesuré la vitesse d'érosion des agrégats humides en fonction des paramètres du liquide [6]. Une diminution de la vitesse d'érosion est observée pour une augmentation de la fraction liquide W et de la viscosité du fluide.

>>>



3. Exemple d'érosion d'un agrégat humide de billes de verre (disque central clair), retenu au centre d'un tambour tournant d'axe horizontal. (Diamètre des billes : 300 µm. Diamètre du tambour : 14 cm. En gris foncé, le sable sec. Le vecteur **g** représente la gravité sur l'image de gauche). L'écoulement granulaire de surface, engendré par la rotation du tambour, arrache régulièrement des billes du pourtour de l'agrégat humide. Remarquer la diminution du diamètre de l'agrégat au cours du temps. (Une vidéo stroboscopique avec des grains plus grossiers est disponible à http://svi.cnrs.fr/spip/IMG/avi/erosion_coarse.avi) [6].



5. Croissance d'une tour granulaire sur du sable humide.
(a) Photographies de la croissance de la tour, pour des billes de verre de 340 µm de diamètre et une dépression hydrostatique de 50 mm d'eau. La barre d'échelle est de 1 cm. À droite : schémas illustrant la diminution du volume des ménisques capillaires extérieurs lorsqu'ils se rétractent avec la hauteur.
(b) Évolution de la fraction surfacique de liquide à la surface d'un matériau granulaire humide en fonction de la dépression imposée dans le liquide, proportionnelle à la hauteur Δh de la surface au-dessus du réservoir de liquide.

>>>

Une seconde série d'expériences d'érosion a été réalisée à la surface pentue (plane au départ) d'un tas bidimensionnel humide (fig. 4, p. 19). Cette seconde configuration permet en effet de mieux contrôler la vitesse d'écoulement des grains secs et la pente de l'interface entre l'écoulement sec et le tas humide. La vitesse d'érosion de l'interface augmente alors avec la densité des grains qui s'écoulent et avec leur vitesse. Cette expérience d'érosion a par ailleurs mis en évidence, à haute vitesse d'écoulement, une déstabilisation de la forme de l'interface initialement plane, qui module spatialement le taux d'érosion (fig. 4).

Pour interpréter ces résultats, on s'intéresse dans un premier temps à l'influence du liquide. Une fraction de liquide W plus importante permet d'augmenter le volume des ponts capillaires (et leur nombre), allongeant ainsi leur longueur de rupture (voir l'encadré 1), et la viscosité module le temps nécessaire pour rompre un lien. La modélisation de l'effet des grains secs en écoulement est plus subtile. Premièrement, la densité des grains joue deux rôles : elle agit sur le poids de la couche en écoulement, donc sur la force de friction à l'interface, et elle intervient aussi dans la force d'impact, collisionnelle, des grains sur l'interface. Or, en considérant les caractéristiques moyennes de l'écoulement, l'évaluation des forces d'érosion issues de ces phénomènes donne des valeurs 10 à 100 fois inférieures à la force des ponts capillaires (voir encadré 2). Cette approche moyenne n'est donc pas la bonne explication : considérer l'ensemble de la distribution des valeurs des forces de contact, dont certaines dépassent la force des ponts capillaires, permet de modéliser les vitesses d'érosion. La deuxième subtilité a été révélée par l'instabilité de surface (fig. 4), analogue à la formation des cascades par les torrents. Expérimentalement, l'instabilité, tout comme la vitesse d'érosion, est plus prononcée pour les fortes pentes. Or dans ces conditions, l'épaisseur de l'écoulement, donc la pression, et la force de friction sont les plus faibles, au contraire de la vitesse des grains secs. Ce constat exclut le lien entre les forces de friction et l'érosion et souligne le rôle des forces d'impact. L'énergie cinétique des grains secs est donc la clé de ces phénomènes d'érosion [7]. Cette découverte permet ensuite de modéliser l'instabilité par l'intermédiaire de l'inertie des grains secs, qui implique que la vitesse d'érosion n'est plus en phase avec la pente locale du tas humide.

La validité de notre modèle a confirmé que l'érosion d'un agrégat humide, dans le régime pendulaire, est un phénomène probabiliste, sensible aux grandes fluctuations de forces d'impact qui sont reliées à la vitesse des grains secs en écoulement.

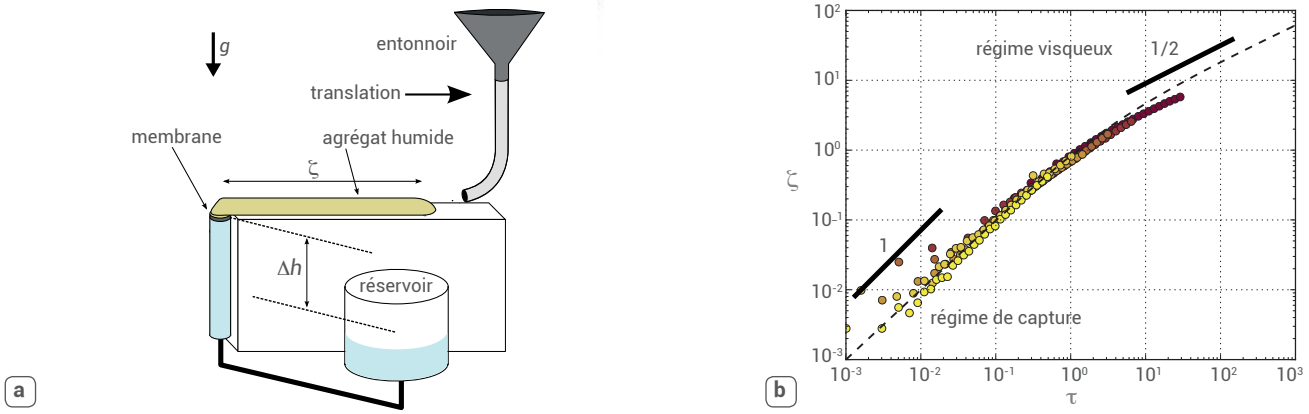
Voyons maintenant les mécanismes d'échanges lorsque la fraction liquide W augmente fortement, en nous plaçant dans le régime capillaire.

Encadré 2

Forces moyennes et modélisation probabiliste de l'érosion

Les forces moyennes exercées par l'écoulement sur un grain humide de surface typique πr_g^2 peuvent être estimées et comparées à celle d'un pont capillaire. Pour la force frictionnelle : $F_{fric} \approx \mu\rho g h.\pi r_g^2 \approx 10$ µN, où $\mu \approx 0{,}5$ est le coefficient de friction de l'écoulement sec sur l'interface, ρ la masse volumique de la couche sèche en écoulement (1500 kg.m^{-3}), h l'épaisseur de la couche (5 mm) et g la gravité. Pour la force collisionnelle provenant des impacts, la modélisation de Bagnold prédit $F_{coll} \approx \rho\dot{\gamma}^2 r_g^2.\pi r_g^2 \approx \rho g r_g.\pi r_g^2 \approx 1$ µN, où le taux de cisaillement à l'interface $\dot{\gamma}$ est approché en ordre de grandeur par $(g/r_g)^{1/2}$. Ces deux forces moyennes sont alors inférieures à la force capillaire typique F_{cap}, de l'ordre de 100 µN. Il faut donc considérer toute la distribution de probabilité des forces agissant sur l'interface (présentant une décroissance exponentielle pour les grandes forces).

La vitesse d'érosion globale résulte alors de l'intégrale de toutes les contributions des forces qui dépassent le seuil donné par la force du pont capillaire F_{cap}.



6. Croissance d'agrégats granulaires humides horizontaux.
(a) Schéma du dispositif expérimental permettant de créer des agrégats granulaires horizontaux saturés en liquide, à dépression hydrostatique Δh contrôlée. (b) Courbe globale prédisant l'évolution de la longueur adimensionnée ζ d'un agrégat granulaire saturé horizontal en fonction d'un temps adimensionné τ. Les lois d'échelle correspondant aux deux régimes limites sont commentées dans le texte. La couleur des symboles, du foncé au clair, indique l'augmentation de la dépression hydrostatique (Δh = 5 à 62 mm) [10].

Accrétion : capture des grains par le liquide

Pour visualiser l'accrétion à l'échelle du milieu granulaire, il suffit de verser du sable sec sur du sable humide. Si la quantité de liquide contenue dans le substrat humide est suffisamment importante (régime capillaire), on voit croitre une structure verticale là où un simple tas de grains conique se serait formé si le substrat avait été sec [8]. La croissance d'une tour granulaire est visible sur la figure 5a et montre à quel point la structure est fine et stable. Cette expérience, simple à mettre en œuvre, démontre le processus d'accrétion où de nouveaux grains viennent se coller à la structure en même temps que le liquide progresse. Le liquide peut se propager et l'agrégat peut croitre en captant des grains, on parle alors d'accrétion granulaire. Mais comment grandit une tour granulaire ? L'analyse de sa structure et de sa croissance permet d'élucider une partie des mécanismes de piégeage des grains.

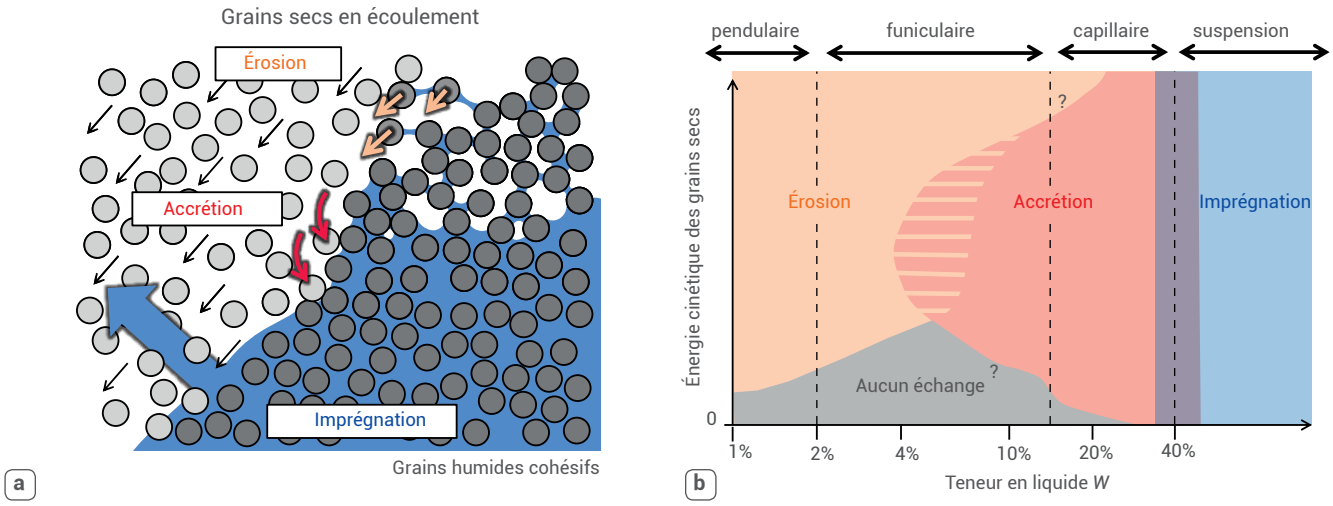
Des mesures par tomographie de rayons X au laboratoire ont montré que l'intérieur de la tour granulaire humide est complètement saturé en liquide. Les seuls ménisques avec de l'air sont donc sur le pourtour de la colonne. Une première hypothèse est de considérer que le liquide monte dans la tour par imbibition capillaire. Ce phénomène est rencontré lorsque l'on plonge un morceau de sucre dans du café : le liquide monte spontanément dans le sucre jusqu'à une certaine hauteur (avant que le sucre ne se désagrège !). Cette situation a été décrite dans le cas de tubes capillaires au début du XXe siècle par Washburn [9], puis adaptée à des milieux poreux. Physiquement, le liquide pénètre dans les pores sous l'effet de la tension de surface et de la dépression capillaire due à la courbure de l'interface liquide/air. Pour des hauteurs assez faibles, où l'influence du poids de la colonne de liquide dans le poreux est encore négligeable, l'évolution temporelle de la hauteur de liquide ralentit proportionnellement à la racine carrée du temps à cause de la dissipation visqueuse grandissante avec la longueur traversée par le liquide.

En revanche, la dynamique de croissance de la tour suit une loi logarithmique. Ainsi, considérer uniquement l'écoulement du liquide dans le milieu poreux n'est pas suffisant pour décrire ces phénomènes d'accrétion, et il faut aussi tenir compte de la probabilité de coller un grain à l'agrégat humide lors de l'impact. Dans la tour granulaire, du fait de la dépression hydrostatique qui augmente avec la hauteur, les ménisques sur la paroi de la tour sont de plus en plus rétractés, comme schématisé à droite de la figure 5a, et il devient donc de plus en plus difficile pour un nouveau grain d'impacter sur une zone où du liquide est présent. La fraction surfacique de liquide est donc un élément majeur pour comprendre la dynamique de croissance d'un granulaire humide. En effet, en impactant sur une poche liquide, le grain pourra être capté grâce à la dissipation visqueuse qui le freine et à la force capillaire qui le retient.

Des mesures par microscopie optique de l'aire du liquide disponible à la surface de l'agrégat ont permis de montrer que, sous l'effet de la dépression hydrostatique, la fraction surfacique de liquide Φ_{liq} diminue exponentiellement avec la hauteur, comme représenté sur la figure 5b, et de manière similaire à l'évolution de la probabilité de capture obtenue expérimentalement.

Afin de contrôler cette dépression hydrostatique, des expériences de croissance de tours horizontales ont été réalisées avec le dispositif expérimental présenté sur la figure 6a. L'avantage de cette configuration est que la dépression hydrostatique, et ainsi l'aire de liquide disponible pour capturer des grains, est constante pour chaque expérience effectuée à Δh fixé. Deux régimes de croissance d'agrégats saturés, avec le temps t, ont alors pu être mis en évidence : (i) un régime gouverné par l'écoulement visqueux dans la structure poreuse à faible dépression (donnant une loi de croissance horizontale en $t^{1/2}$) et (ii) un régime limité par l'efficacité du processus de capture de nouveaux grains à plus grande dépression (engendrant une loi linéaire en temps car la dépression hydrostatique, donc la fraction surfacique de liquide, est constante). Toutes les dynamiques peuvent être reproduites grâce à ce double mécanisme, et l'évolution des tours horizontales est représentée sur la figure 6b où les résultats sont tracés en

>>>



7. Vue synthétique des interactions entre un agrégat humide et un écoulement granulaire sec.
(a) Schéma des différents phénomènes d'échanges entre une phase granulaire sèche en écoulement et une phrase granulaire humide.
(b) Diagramme de phase qualitatif présentant les frontières attendues en fonction de l'énergie cinétique des grains secs et de la fraction liquide *W* dans l'agrégat humide. Les points d'interrogation illustrent les zones d'ombre entourant les mécanismes exacts de la capture des grains.

>>>

fonction d'une longueur ζ et d'un temps adimensionné τ avec les différents paramètres du problème, tels que les propriétés de transport liquide dans la colonne (la porosité de l'agrégat, la viscosité), le débit des grains impactant, ainsi que la valeur de la probabilité de capture à dépression nulle [10]. Bien que nous ayons identifié le principe du mécanisme, différents paramètres comme les propriétés physiques du liquide, des grains ou du jet, modifient les sources de dissipation lors de l'impact et donc la croissance d'agrégats humides de manière non triviale. Par exemple, alors que l'effet de la viscosité sur le transport du liquide est modélisé, son rôle dans la capture est ambigu. Une grande viscosité freine davantage le grain, favorisant la capture, mais rigidifie aussi la structure granulaire lors de l'impact, favorisant au contraire le rebond. Il reste ainsi à modéliser comment ces propriétés physiques modifient directement la probabilité de capturer des grains.

Vers une prédiction du mélange ?

Nos études ont montré que selon la répartition de liquide contenu dans un milieu granulaire hétérogène, des grains secs en écoulement peuvent soit éroder des agrégats humides dans le régime pendulaire, soit au contraire être capturés pour de plus grandes fractions liquides (fig. 7), les faisant ainsi croitre. Il en résulte une situation typique des mélangeurs réels, décrite sur la figure 7, où les différentes interactions de milieux granulaires humides et secs en écoulement sont présentes simultanément.

L'optimisation des procédés industriels de mélange et la compréhension des phénomènes géophysiques tel que le transport éolien de sable sur sols humides nécessitent de mieux caractériser ces situations. Nous avons identifié des processus élémentaires d'échange de grains entre les phases, mais l'influence précise des propriétés du liquide ou des grains reste à comprendre (comme les influences de la viscosité ou de la densité de l'écoulement). Il faudra coupler ces effets à la déformation du matériau humide lui-même afin de pouvoir décrire toutes les étapes d'un mélange granulaire réaliste, partant d'un état initial fortement hétérogène vers une pâte granulaire finale homogène.

Ces principes décrivant l'interaction de grains secs avec des grains humides sont une première approche pour percer les mécanismes de mélange entre des grains et de l'eau tels qu'ils sont réalisés quotidiennement dans l'industrie, et apporter de nouveaux éclairages sur la physique des milieux granulaires humides. Des résultats expérimentaux modèles de ces systèmes complexes, tels que des géométries de mélanges simples avec des mélanges de grains et de liquide simples, permettront d'améliorer les approches numériques triphasiques impliquant des grains solides, une phase liquide et l'air. ■

Références

1• B. Andreotti, Y. Forterre et O. Pouliquen, *Les milieux granulaires : Entre fluide et solide*, EDP sciences (2012).

2• M. Pakpour, M. Habibi, P. Møller et D. Bonn, "How to construct the perfect sandcastle", *Scientific reports* (2012) 549.

3• S. Herminghaus, "Dynamics of wet granular matter", *Advances in Physics*, **54** (2005) 221-261.

4• P.-G. De Gennes, F. Brochard-Wyart et D. Quéré, *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*, Springer (2003).

5• M. Scheel, R. Seemann, M. Brinkmann, M. Di Michiel, A. Sheppard, B. Breidenbach et S. Herminghaus, "Morphological clues to wet granular pile stability", *Nature Materials*, **7** (2008) 189.

6• G. Lefebvre et P. Jop, "Erosion dynamics of a wet granular medium", *Physical Review E*, **88** (2013) 032205.

7• G. Lefebvre, A. Merceron et P. Jop, "Interfacial Instability during Granular Erosion", *Physical Review Letters*, **116** (2016) 068002.

8• F. Pacheco-Vazquez, F. Moreau, N. Vandewalle et S. Dorbolo, "Sculpting sandcastles grain by grain: self-assembled sand towers", *Physical Review E*, **86** (2012) 051303.

9• E. W. Washburn, "The dynamics of capillary flow", *Physical review*, **17** (1921) 273.

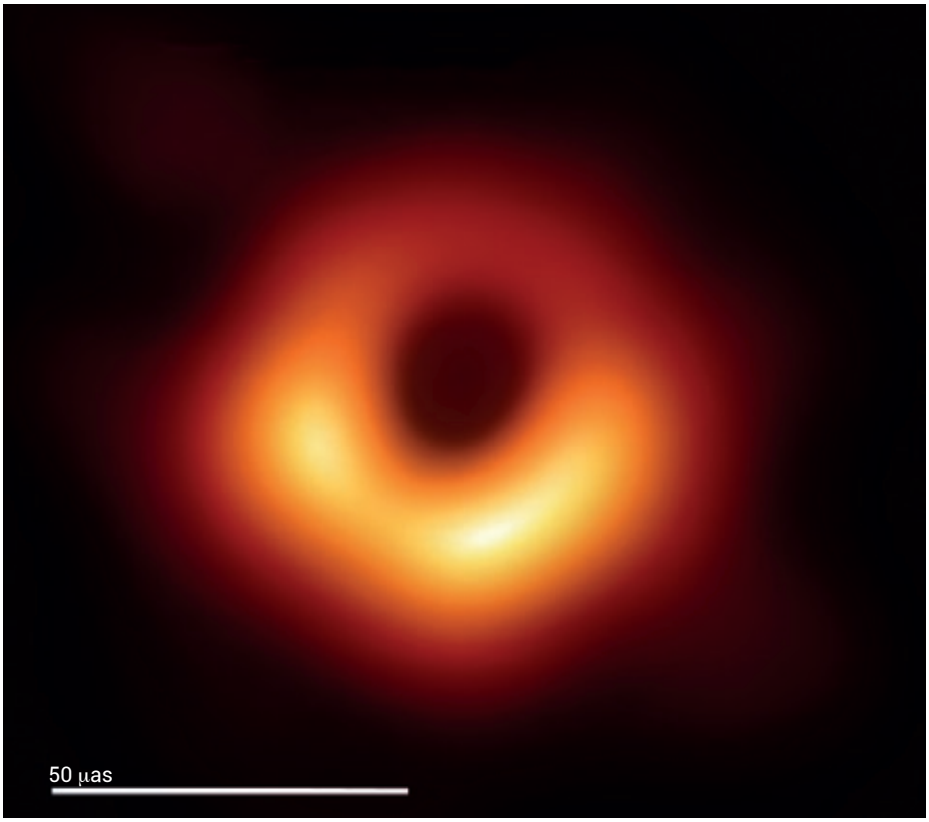
10• G. Saingier, A. Sauret et P. Jop, "Accretion dynamics on wet granular materials", *Physical Review Letters*, **118** (2017) 208001.

Première image d'un trou noir

Françoise Combes (francoise.combes@obspm.fr)
LERMA (UMR CNRS 8112), Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

La nouvelle est arrivée le 10 avril 2019 : une grande collaboration internationale d'astronomes a réussi à réaliser l'image d'un trou noir supermassif, tel qu'il en existe dans pratiquement tous les noyaux de galaxies [1].

Il s'agit du trou noir au centre de la galaxie Messier 87 (M87), galaxie principale de l'amas de la Vierge, situé à 50 millions d'années-lumière de la Terre, et dont la masse est de 6,5 10^9 masses solaires (M_{sol}).



1. Image du trou noir au centre de la galaxie Messier 87, obtenue par la collaboration EHT (Event Horizon Telescope). L'ombre du trou noir est mise en évidence par le gaz chaud et ionisé qui tourne autour, dans un disque d'accrétion, à une vitesse relativiste. L'axe de rotation du disque est orienté de 20 à 30 degrés par rapport à la ligne de visée. L'émission du gaz n'est pas symétrique, car elle est amplifiée par les effets relativistes lorsque le gaz s'approche de nous. La barre donne l'échelle en microsecondes d'arc (µas), et correspond environ à 5 jours-lumière, à la distance de M87.

L'image (fig. 1) a été obtenue avec huit radiotélescopes répartis sur le globe terrestre, agissant comme un interféromètre géant, afin de bénéficier de la plus grande ligne de base possible : le diamètre de la Terre (fig. 2). La résolution angulaire des images obtenues est en effet fonction de la distance D (ou ligne de base) entre les couples de télescopes, qui reçoivent les signaux cohérents émis par la source. La résolution est plus précisément proportionnelle à λ/D, où λ est la longueur d'onde.

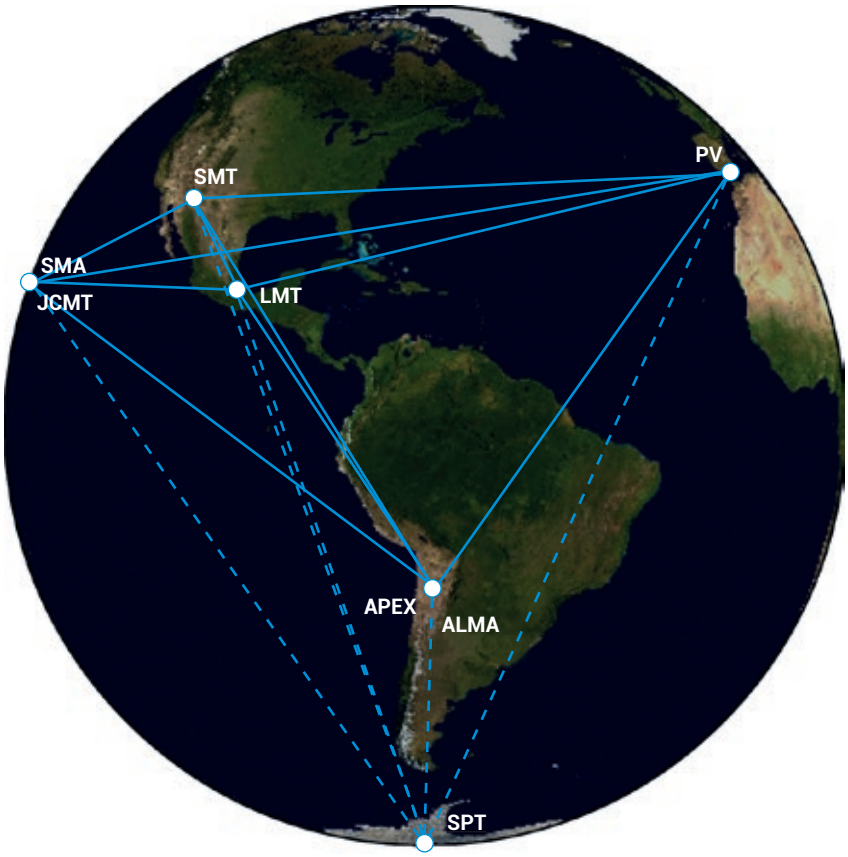
Des observations à λ de l'ordre du centimètre sont effectuées couramment, mais leur résolution angulaire est insuffisante. Les présentes observations ont donc été faites dans la longueur d'onde de 1,3 mm, ce qui donne une résolution de 20 microsecondes d'arc (soit 20 mas). C'est un exploit, car l'atmosphère pose des problèmes à cette longueur d'onde, où les effets de la vapeur d'eau sont très sensibles. L'indice optique de l'eau est 30% plus grand que celui de l'air, et la présence de

>>>

>>>
vapeur d'eau peut modifier sensiblement et aléatoirement l'indice global, selon l'humidité. La turbulence de régions de l'atmosphère de différents indices optiques produit alors un brouillage des images et une perte de cohérence de la phase des signaux. De plus, il existe une limite supérieure intrinsèque à la longueur d'onde utilisable, car l'image d'une source est brouillée par la diffusion au cours de la traversée de régions ionisées dans le milieu interstellaire des galaxies, ou même dans le milieu interplanétaire du système solaire (ces régions ionisées diffusent le signal de façon proportionnelle à λ^2). Par exemple, la mesure de la taille de la source radio centrale de notre Galaxie, appelée Sagittarius A★ (SgrA★), ne peut être obtenue qu'à des longueurs d'onde inférieures à 2 mm. Dans le cas de M87, la diffusion empêche les observations à des λ supérieures à 2,5 mm.

Un trou noir est un objet compact, au voisinage duquel la gravité est si forte que la vitesse requise pour s'en échapper est supérieure à la vitesse de la lumière. La distance où cela se produit définit une sphère appelée l'horizon des évènements, car aucune matière ni aucune information sur ce qui se passe à l'intérieur ne peut en sortir. Le rayon R_h de l'horizon est proportionnel à la masse M du trou noir : $R_h = 2\ GM/c^2$, où G est la constante de gravitation, et c la vitesse de la lumière. Il n'est possible de visualiser le trou noir que par le rayonnement du gaz qui tourne autour, proche de l'horizon. Ce gaz est capturé par le trou noir avec son moment cinétique propre, indépendant de celui du trou noir, et de direction aléatoire à chaque accrétion ; c'est ainsi qu'est défini l'axe du disque d'accrétion. L'inclinaison est l'angle entre la direction du moment cinétique et la ligne de visée, soit un angle nul pour un disque que nous voyons de face. Le disque d'accrétion dans M87 est incliné de 20 à 30 degrés. La période de rotation de la matière dans ce disque est elle aussi proportionnelle à la masse du trou. Le gaz ionisé qui rayonne autour de M87 met près de 50 jours à faire un tour.

La masse du trou noir joue le rôle d'une lentille gravitationnelle. Elle dévie les rayons lumineux émis par le gaz. Les rayons provenant du disque derrière le trou noir sont déviés au-dessus et au-dessous de ce dernier. Ainsi, l'observateur peut voir un halo de lumière autour du trou noir. Pour qu'un rayon lumineux puisse échapper à l'attraction du trou et parvenir jusqu'à nous, il lui faut un paramètre d'impact minimum de 2,6 R_h. Les rayons lumineux passant plus près de l'horizon sont si déviés qu'ils « tombent ». Le trou noir lui-même apparait ainsi comme une ombre approximativement circulaire au centre de l'image, avec un rayon égal à 2,6 R_h, soit 20 microsecondes d'arc pour M87. L'image du halo serait la même pour un disque très incliné, presque vu par la tranche (ce qui n'est pas le cas de M87), la principale différence étant qu'une partie du disque se projette en avant-plan de l'ombre du trou noir, et qu'alors la zone centrale de l'image n'apparaitrait pas complètement sombre.



2. Les divers télescopes de la collaboration EHT sur le globe terrestre, qui ont participé aux observations les 5, 6, 10 et 11 avril 2017 : SPT, South Pole Telescope ; ALMA, Atacama Large (sub)Millimeter Array (Chili) ; APEX, Atacama Pathfinder EXperiment (Chili) ; LMT, Large Millimeter Telescope (Mexique) ; SMT, SubMillimeter Telescope (Arizona, USA) ; SMA, SubMillimeter Array (Hawaii) ; JCMT, James Clerck Maxwell Telescope (Hawaii) ; PV, Pico Veleta, *i.e.* télescope de 30 mètres de l'IRAM (Espagne).
M87, située dans le ciel de l'hémisphère Nord, est visible de tous les télescopes, sauf du pôle Sud (SPT). Les lignes continues représentent les lignes de base (couples de télescopes) qui ont pu observer M87, et les lignes en tirets, les bases qui n'ont servi qu'aux sources de calibration. Les télescopes localisés au Chili et SPT sont en revanche nécessaires pour observer SgrA*, située dans le ciel de l'hémisphère Sud.

La collaboration Event Horizon Telescope EHT[(a)] a bien sûr essayé de faire l'image du trou noir de notre propre galaxie, la Voie lactée. Ce trou noir (SgrA★) est bien plus proche de nous, à 25 000 années-lumière, soit 2000 fois plus proche que M87. Par coïncidence, le rapport des masses des trous noirs respectifs est aussi proche de 2000 : SgrA★ a une masse de $4\ 10^6\ M_{sol}$. Comme le rayon de l'horizon, et donc celui de l'ombre du trou noir, est proportionnel à la masse, la taille de notre trou noir SgrA★ est bien plus petite que celle de M87. Mais comme il est plus proche, la taille angulaire attendue est très similaire. Le gaz ionisé qui rayonne autour de SgrA★ met 45 minutes à faire un tour.

Cette période a pu récemment être mesurée grâce à l'observation de sursauts d'émission infrarouge proche (2 mm de longueur d'onde) autour de SgrA★ par la collaboration GRAVITY[(b)]. Cet interféromètre infrarouge très performant a suivi les points lumineux de plusieurs sursauts dans leurs orbites proches de l'horizon de SgrA★, à 30% de la vitesse de la lumière. Ces orbites sont quasi circulaires, de rayon de l'ordre de 50 mas. La lumière détectée correspond à un pic d'émission synchrotron infrarouge du gaz faisant partie du disque d'accrétion.

Cette variabilité est liée au rythme d'accrétion de gaz des trous noirs supermassifs. L'accrétion n'est pas continue, mais des nuages de gaz de diverses tailles et masses sont capturés par le trou avec leur moment cinétique propre. Le gaz stationne pendant une ou plusieurs rotations dans le disque, puis tombe dans le trou ; ensuite, le trou noir « jeûne » jusqu'à son prochain « repas ». Ces épisodes d'accrétion durent moins d'une heure dans SgrA★, et plusieurs mois dans M87.

Il est donc beaucoup plus difficile de faire l'image du disque d'accrétion autour de SgrA★, composé de points lumineux variables qui restent brillants pendant un quart d'heure environ, que l'image du disque plus tranquille de M87, qui est resté stable pendant les quelques jours d'observation de la collaboration EHT en avril 2017. Pendant quatre jours, une quantité considérable de données a été stockée par chaque télescope de l'expérience EHT, puis il a fallu deux ans pour calibrer ces données, et essayer de combiner les données cohérentes, en éliminant beaucoup d'artefacts. Pour le trou noir de M87, le résultat se révèle tout à fait compatible avec ce qui était attendu des modèles. En revanche, pour SgrA★ les problèmes de calibration et de variabilité de la source ont empêché de réaliser l'image du disque d'accrétion ; l'expérience sera tentée à nouveau avec plus de télescopes (donc plus de sensibilité), et notamment avec l'interféromètre NOEMA de l'IRAM[(c)]. ■

(a) La collaboration EHT ou Event Horizon Telescope rassemble plus d'une douzaine de radiotélescopes de toutes les régions du globe. Plus d'une trentaine d'instituts y participent. Les observations ont commencé en 2006, et la collaboration n'a fait que croitre et devenir plus performante depuis.

(b) GRAVITY est un instrument de 2e génération sur le Très Grand Télescope (VLT) européen au Chili. Il permet de combiner les faisceaux provenant des quatre télescopes de 8 mètres, et de faire de l'interférométrie à grande base (maximum 130 m) en infrarouge proche ($\lambda = 2\ \mu m$), en utilisant l'optique adaptative.

(c) NOEMA est un interféromètre composé de douze radiotélescopes, observant dans le domaine des longueurs d'ondes millimétriques, et situé sur le Plateau de Bure, près de Grenoble. Il est opéré par l'IRAM, Institut de RadioAstronomie Millimétrique, organisme franco-allemand-espagnol.

Références

1• The Event Horizon Telescope Collaboration, "First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole", *ApJ* **875** (2019) L1.

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

Brève

Des météorites nous éclairent sur les tout débuts du Système solaire

Extrait du communiqué de presse IPGP/Université de Paris/CNRS/MNHN du 12 décembre 2019

Les météorites primitives, ou chondrites, sont les vestiges des premiers millions d'années du Système solaire. Elles renferment différents solides nés dans le disque de gaz et de poussière, dit disque protoplanétaire, qui environnait le jeune Soleil avant que ne se constituent les planètes. Parmi ces solides, les plus anciens sont des inclusions alumino-calciques (ou CAI) datées de 4567 millions d'années. On pense que les CAI se sont formées à plus de 1500°C par condensation d'un gaz de même composition que notre Soleil. De telles températures sont attendues près du jeune Soleil. Cependant, les CAI sont les plus abondantes dans une catégorie de météorites, appelées chondrites carbonées, qui se sont formées loin du Soleil. Ce paradoxe du « chaud-froid météoritique » est une pierre d'achoppement de la plupart des modèles de formation du Système solaire.

Les modèles « classiques » considèrent généralement un disque protoplanétaire isolé. Or les CAIs se sont constituées dans un temps si court (~ 200 000 ans) que le disque protoplanétaire devait être encore en train de se former, à partir d'un nuage interstellaire en contraction.

Une équipe de chercheurs de l'Institut de physique du globe de Paris, d'Université de Paris, du CNRS et du Muséum national d'Histoire naturelle a modélisé cette époque, et a suivi l'histoire et le transport de différents composants dans le Système solaire primitif [1]. Dans ces simulations, des CAI sont bien produites près du jeune Soleil (à l'intérieur de l'actuelle orbite terrestre) par vaporisation du matériau interstellaire. Mais le disque en formation, d'abord compact, s'étale rapidement, emportant une partie des CAI vers l'extérieur froid du Système solaire primitif. Les CAI qui n'ont pu « surfer » sur cette vague sont rapidement avalées par le jeune Soleil. Il est ainsi possible d'expliquer la surabondance des CAI dans les chondrites carbonées (lointaines) par rapport à leurs homologues formées dans le Système solaire interne.

[1] *ApJL* **867** (2018) L23, *ApJ* **844** (2019) 31, *ApJ* **844** (2019) 32.

Vidéo : youtu.be/IjHAP6oH_R0

Contact :
Francesco Pignatale
(pignatale@ipgp.fr)

Les membres de la Société Française de Physique et la culture scientifique

Daniel Hennequin[1] (daniel.hennequin@univ-lille.fr) et **Fernande Vedel**[2]
(1) Président de la commission Culture scientifique de la SFP
PhLAM, UMR8523, Université de Lille, Bât. P5, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
(2) Professeur émérite, PIIM, UMR7345, Université d'Aix-Marseille, 13397 Marseille Cedex 20

Cet article présente la synthèse des résultats d'une enquête de la SFP auprès de ses adhérents, sur la culture scientifique dans la société française. Elle fait suite à une tribune sur ce sujet, parue en février 2018 dans le *Huffington Post*.

La publication des résultats de cette enquête a été plusieurs fois reportée, pour des raisons techniques et éditoriales. Cette publication est donc très tardive, mais ses résultats quant à la perception de l'importance et du rôle de la culture scientifique dans notre société et au sein de la SFP restent d'actualité.

Peu après la journée Sciences et Médias consacrée à la désinformation scientifique [1] en janvier 2018, une tribune « *La culture scientifique est à reconquérir* », écrite par Virginie Tournay, membre du conseil scientifique de l'OPECST – Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques –, et signée par une soixantaine de personnalités scientifiques et acteurs de la culture scientifique, a été publiée sur le site du *Huffington Post* [2]. La SFP avait préféré ne pas s'associer aux autres soutiens, jugeant l'argumentaire trop simpliste. Cette tribune avait été proposée au *Monde*, à *Libération*, au *Point*, aux *Échos* qui, soit l'ont refusée, soit ont demandé sa révision.

Les réactions à cette tribune ont été nombreuses sur les réseaux sociaux et les blogs [3,4]. Nous avions en particulier remarqué celle de Sylvestre Huet [4]. Le bureau de la SFP a alors proposé à sa commission Culture scientifique de demander à l'ensemble des adhérents leur avis sur la tribune, sur la réaction de la SFP et sur ce que pourraient être ses actions [5]. Cet article propose une synthèse des réponses, commentées par la commission.

Le titre de la tribune de V. Tournay est complété par le sous-titre *« La reconquête de la culture scientifique nécessite de réfléchir à des mécanismes suscitant le désir de culture, à des médiations conduisant à une rencontre vivante avec la science »*. En effet, cette tribune affirme que « *la connaissance sociale de la science s'éloigne des considérants scientifiques »*, autrement dit que tout public non scientifique a tendance actuellement à refuser la science, sa méthode et ses applications. Mais ce plaidoyer se limite à énumérer les « progrès technologiques » touchant à la vie de tous les jours, tout en dénonçant sans subtilité un « précautionisme » populiste, freinant des avancées scientifiques majeures. La tribune note que les travaux de l'OPECST ont peu d'impact sur les parlementaires et propose de créer une structure de médiation, notamment numérique, qui assisterait les médias, les politiques, les associations, et créerait un désir de culture scientifique auprès des étudiants et du grand public.

La riposte « *Polémique sur la culture scientifique* » de Sylvestre Huet, publiée sur le blog du *Monde*, pointe que le problème est réel, mais mal traité par V. Tournay. En fait, ce sujet est même central pour la société : il est en relation forte avec des défis immédiats, qui doivent être relevés en opérant démocratiquement des choix. S. Huet considère qu'il faut changer de paradigme : on ne peut pas imaginer, par exemple, que nous pourrons continuer sur les logiques agricoles et technologiques actuelles. Le « noble et gai savoir », respecté par l'opinion publique, offre son lot de turpitudes humaines (Bhopal, Tchernobyl...), et absoudre les technologies de leurs risques au nom de leurs origines scientifiques n'est pas judicieux. Grâce à la culture scientifique, l'État devrait être l'arbitre de conflits entre intérêts sociétaux, alors que les moteurs du profit et du pouvoir n'hésitent pas à tromper le consommateur : c'est l'*agnotologie* de R. Proctor, « la construction sociale de l'ignorance », organisée par exemple par les cigarettiers. L'expertise scientifique, à travers des agences pourvues de pouvoir, peut aussi être dévoyée : la solution est une action publique continue et la disponibilité d'experts indépendants issus d'une recherche publique bien financée. Devant l'étendue de l'inculture scientifique citée dans la tribune de V. Tournay, S. Huet rappelle que de fausses idées peuvent aussi être répandues par des scientifiques eux-mêmes (comme récemment Luc Montagnier). Il conclut en dénonçant une vision au service des technologies, qui pourrait contrarier le combat vers un débat public de qualité en induisant une attitude de défiance systématique.

© Espace des sciences

« Si la constitutionnalité [du principe de précaution] est désormais acquise, elle s'accompagne hélas d'un populisme précautionniste omniprésent...
Or, la précaution ne signifie pas résistance au changement, mais elle a pour visée la protection de la santé des personnes et de l'environnement.
Ôter de façon systématique les vaccins, les produits pharmaceutiques, les micro-ondes, les fertilisants… à l'humanité aurait certainement des effets plus négatifs que positifs… ».

Virginie Tournay

Ce que nous enseigne l'enquête

Seulement 40 réponses sont parvenues à la SFP, soit un peu moins de 1,5 % des adhérents. 17% d'entre elles viennent de femmes (20,7% des adhérents), 47% de retraités (29% des adhérents) et 7,5% de doctorants ou de postdocs. Cette enquête ne reflète sans doute pas toutes les opinions des membres de la SFP. Malgré tout, les idées exprimées, parfois même par un seul individu, méritent réflexion.

En ce qui concerne la tribune de Virginie Tournay, une très large majorité des réponses (80%, mais 100% des femmes) approuve les réserves de la SFP et sa position. *La « brutalité » du texte, son « arrogance », l'usage immodéré de l'argument d'autorité* sont soulignés, ainsi qu'une *confusion entre le titre et le contenu. On y parle assez peu de l'inculture scientifique, mais on y mélange recherche scientifique, culture scientifique, applications technologiques ou encore usages des données de la science, ce qui produit un effet contre-productif dans la lutte contre les obscurantismes*. La plupart des soutiens à la tribune partagent les mêmes analyses, mais prônent au contraire, compte tenu de la situation, une position radicale, comme celle de l'AFIS (Association française pour l'information scientifique), et estiment que *la SFP devrait soutenir ce type de contribution qui dénonce l'obscurantisme, sans mettre en exergue des différences jugées minimes*. Les recommandations proposées à la fin de la tribune (création d'une structure pour assister les médias, sensibilisation des étudiants, développement des médiations numériques) sont en général jugées assez timides, *pas si drastiques que cela*, voire *dérisoires*.

Les avis sur la réponse de Sylvestre Huet sont plutôt en accord avec ceux sur la tribune de Virginie Tournay : ceux qui émettent des réserves sur la tribune approuvent en général la réponse de Sylvestre Huet, et inversement. Cependant, la plupart considèrent que cette dernière ne constitue pas une véritable réponse. On y trouve *des points assez justes, en particulier lorsqu'il s'agit de combattre le point de vue scientiste de la tribune et de relever qu'il faut parfois se poser des questions sur les retombées sociétales des avancées technologiques résultant de la recherche*. Certains reprochent à S. Huet des *positions contradictoires, tiraillées entre l'écologie et l'humanitaire*. Les plus radicaux l'accusent *d'argumentation fallacieuse, de sophisme par association*.

Dans le détail, la tribune de Virginie Tournay constate *a priori* un recul de la culture scientifique dans l'ensemble de la société. De nombreuses réponses partagent cette affirmation. *Les causes en seraient les médias, les politiques, l'absence d'intérêt de la population, l'existence de minorités opposées à la science et au progrès, les réseaux sociaux souvent utilisés par les activistes*. Certains

>>>

>>>

évoquent *le contexte,* où *l'on distingue culture scientifique et culture humaniste, et qui conduit à placer la première au second plan. On devrait pourtant accorder à la culture scientifique une place bien plus importante dans notre société technologique, appelée à prendre des décisions et faire des choix relevant de la science.* Notons que le recul de la culture scientifique est loin d'être un constat indiscutable, et cette impression est peut-être bien une excellente illustration des biais de nos systèmes d'information contemporains, dénoncés par ces mêmes personnes qui « tombent dans le panneau » : en effet, des opinions qui s'expriment haut et fort peuvent donner cette impression, alors même qu'elles sont en réalité minoritaires. Pour évaluer l'image de la science dans le grand public, mieux vaut se tourner vers des études et des sondages. Citons par exemple le sondage « Regards et attentes des Français sur la recherche scientifique » [6], publié en octobre 2017, qui montre qu'une très grande majorité des Français a confiance dans les chercheurs et estime que la recherche scientifique est source d'espoir. L'absence d'intérêt de la population est plutôt contredite par les études réalisées. Une bonne référence dans le domaine est celle du Crédoc, d'avril 2013, intitulée « La curiosité scientifique des Français et leur désir de développer leurs connaissances » [7]. Il existe de nombreuses autres contributions : citons encore « Inculture scientifique des Français : pourquoi c'est un problème » [8].

Parmi les soutiens à la tribune de V. Tournay, il apparaît un fort sentiment critique vis-à-vis des médias. Le refus de publication de la tribune par *Le Monde* et *Libération* semble focaliser ce sentiment. Ce refus est alors attribué au fait que *ces journaux ne publient que du sensationnel où l'émotion jouerait un rôle prépondérant, donnant ainsi parfois une visibilité trop importante à des avis très minoritaires.* On reproche aux médias *un manque de culture scientifique « abyssal ». Les journalistes scientifiques ne sont pas assez nombreux, les autres ont dans l'ensemble une formation littéraire.* Ils sont parfois perçus comme étant de mauvaise foi. L'expertise scientifique est utilisée par les médias pour attiser des débats contradictoires en utilisant des arguments d'autorité, ce qui affaiblit la parole des scientifiques, alors que le fait scientifique est en deçà de la construction d'un avis et ne devrait pas entrer en compétition dans un débat contradictoire (et « démocratique »). Enfin, les fausses informations scientifiques ne sont pas dénoncées. Il y a sans doute des journaux auxquels ces arguments s'appliquent, mais on peut difficilement reprocher au *Monde* de ne publier que des articles spectaculaires et d'ignorer les controverses. Rappelons que la SFP a cosigné plusieurs tribunes au cours des dernières années, dont celle sur l'avenir du Palais de la découverte [9], qui n'a rien de « sensationnel ». On peut aussi citer la tribune de Julien Bobroff [10], intitulée « Scientifiques et médiateurs doivent collaborer pour réinventer la vulgarisation », publiée en juillet 2018, et qui elle aussi traite d'un problème de fond.

La commission Culture scientifique, et plus généralement la SFP, qui interagissent régulièrement avec des journalistes, ne peuvent pas approuver un reproche de manque de culture scientifique fait aux médias. La situation est en effet beaucoup plus subtile que cela, comme on pouvait s'en rendre compte en assistant aux quatre premières éditions des journées Sciences et Médias. Lors de la première édition, en 2012, nous avions par exemple découvert que c'était plutôt le rédacteur en chef de certains journaux qui posait problème, les journalistes se heurtant à un refus de publier leur article jugé « sans intérêt » [11]. À l'inverse, certains journaux font un travail tout à fait honnête, notamment en chassant et corrigeant les fausses informations (scientifiques ou pas). On peut citer les *Décodeurs du Monde* et l'initiative Cross Check, qui regroupe une vingtaine de médias français et internationaux. Les divergences qui apparaissent dans ces réponses relèvent davantage de la forme que du fond, mais ceux qui soutiennent la tribune de V. Tournay estiment que la forme doit l'emporter sur le fond quand la situation l'exige. Or, justement, lors de la journée Sciences et Médias consacrée à la désinformation scientifique [12], plusieurs intervenants ont mis en garde contre le manque d'efficacité d'une telle attitude. Le scientifique doit au contraire montrer l'exemple, en veillant à diffuser des informations étayées à 100% par des arguments scientifiques, et en ne cédant par exemple jamais à l'argument d'autorité. Gary Dagorn, journaliste aux *Décodeurs*, s'interroge même sur la nécessité de toujours dénoncer la désinformation : est-ce que dans certains contextes, « décoder » des contrevérités ne produit pas l'effet inverse, à savoir celui de les amplifier [12] ?

« Cet appel à la culture scientifique peut donc facilement se caricaturer, à ses dépens, en une injonction brutale : acceptez tout ce que l'industrie et l'État vous proposent à base de technologies et de sciences… L'ennui, c'est que ce texte ne livre aucun exemple d'une précaution utile ou nécessaire…
Cette asymétrie totale ne peut que susciter le trouble… »

Sylvestre Huet

Les propositions des participants

Si le « recul » de la culture scientifique en France est discutable, il n'en reste pas moins qu'elle est encore, en France, trop absente dans le public, dans les médias et chez les politiques, tout comme d'ailleurs le respect du savoir scientifique.

Dans les réponses à l'enquête, la plupart des solutions proposées pour combattre cette inculture concernent l'enseignement. *Il faudrait donner plus de considération aux matières scientifiques, en augmentant les heures [de sciences] à tous les niveaux, et notamment dans les petites classes. Il faudrait donc aussi améliorer la formation des enseignants, en particulier dans le primaire, où la plupart ont suivi une formation littéraire. Plus largement, un enseignement scientifique pourrait être donné dans les formations universitaires non scientifiques, comme en économie.* La nouvelle réforme dans les programmes de lycées ne va pas dans le bon sens, puisqu'en réduisant les heures de sciences, elle va restreindre la culture scientifique des futurs scientifiques à une seule discipline !

L'accent est souvent mis sur *l'apprentissage de l'esprit critique et de la démarche/méthode scientifique, et ce dès le primaire. On pourrait de ce point de vue s'inspirer de ce qu'on trouve ailleurs.* Sur ce point, un témoignage

mérite d'être livré intégralement : « *[Je suis] actuellement aux USA, avec mon fils en CE1. Il a des cours de STEM (Science, Technology, Engineering and Maths). Ce sont des cours durant lesquels il va apprendre à coder, à construire (ponts, catapultes miniatures…). Des sorties dans des centres d'expériences avec un encadrement spécifique sont prévues (en particulier en chimie). Il a un emploi du temps et des enseignants spécifiques pour certaines matières, comme au collège.* » En effet, des études montrent que lorsque les lacunes en science commencent très tôt dans la vie d'un enfant, elles persistent ensuite [13]. Il est donc important de faire découvrir la démarche scientifique dès le plus jeune âge.

Une autre proposition concerne *les sciences participatives, auxquelles on pourrait davantage faire appel pour familiariser le citoyen aux enjeux de la recherche scientifique*. Rappelons que les sciences citoyennes, comme les appellent les Anglo-saxons, ont pour ambition de faire produire de la connaissance scientifique par tout citoyen qui le désire. Dans les domaines où de nombreux projets existent, comme en astronomie, en botanique ou en zoologie, les sciences participatives permettent incontestablement de sensibiliser les citoyens à la recherche scientifique et à ses méthodes. Malheureusement, en physique, les opportunités de faire avancer la recherche en impliquant le grand public sont rares. Mais il y a peut-être des pistes à explorer, comme celle du projet Foldit, en biochimie, qui permet de tester l'assemblage numérique de nouvelles protéines au travers d'un jeu vidéo public [14].

Des pistes pour agir

Lorsqu'il s'agit du rôle que pourrait jouer la SFP dans tous les domaines évoqués ci-dessus, les réponses sont unanimes : elle n'en fait pas assez.

La SFP devrait amplifier son rôle critique vis-à-vis des thèses obscurantistes que l'on trouve sur la toile. Elle pourrait en particulier être beaucoup plus active sur les réseaux sociaux, en dénonçant ces thèses, et plus généralement les conspirationnistes ou les pratiques prédatrices (éditeurs, conférences). Elle pourrait aussi maintenir un site de réfutation sur des questions de physique (Terre plate, mouvement perpétuel...). De ce point de vue, elle devrait aussi se rapprocher de l'AFIS.

Il faudrait lancer des débats sur les aspects sociaux, économiques, politiques, éthiques, culturels, sur l'introduction massive des nouvelles technologies dans la société. La SFP pourrait être « experte en expertise » et plus présente dans les débats de société où l'éducation interfère avec la politique, et où l'information contenue dans les journaux est au mieux déficiente : les sources d'énergie, la reconstruction de l'industrie française, les questions de science et défense, les programmes de physique au collège et au lycée...

Conclusion

Le premier enseignement de cette enquête semble être que les membres de la SFP se soucient fort peu de culture scientifique. Cette remarque peut sûrement être tempérée par l'espoir que nombreux sont les adhérents qui se sentent concernés mais n'ont pas trouvé le temps de répondre à l'enquête. Et l'on touche bien là au principal frein à la mise en place des propositions ci-dessus : la SFP est une association qui, comme toutes les associations, ne peut compter que sur l'engagement et le soutien financier de ses membres. Pour atteindre ces objectifs, il lui faudrait davantage de personnes impliquées, et ça, c'est l'affaire de tous ! La commission Culture scientifique est ouverte à tous et à toutes : n'hésitez pas à nous rejoindre !

On peut cependant remarquer que dans les réponses à cette enquête, nos adhérents n'évoquent pas le manque d'engagement des scientifiques eux-mêmes, et en particulier des physiciens. Pourtant la diffusion de la culture scientifique est aussi de notre ressort, et l'on dispose dans ce domaine d'une très grande marge de progression. La commission Culture scientifique continuera à mener une réflexion sur les résultats de cette enquête, et engagera, sur les sujets qui la concernent et dans la mesure de ses moyens, des actions allant dans le sens des orientations suggérées. ■

Références

1• www.sciencesetmedias.org
La session Culture scientifique du Congrès général de la SFP, à Nantes, en juillet 2019, était aussi consacrée à la désinformation scientifique.

2• www.huffingtonpost.fr/virginie-tournay/ne-nous-reposons-pas-sur-nos-lauriers-en-france-la-culture-scientifique-est-a-reconquerir_a_23369215/

3• https://blogs.mediapart.fr/michel-pinault/blog/010318/crise-de-la-culture-scientifique-crise-de-la-science

4• http://huet.blog.lemonde.fr/2018/02/27/polemique-sur-la-culture-scientifique/

5• Lien vers le texte de la consultation https://www.sfpnet.fr/uploads/tinymce/2020/sfp-culture-enquete.pdf

6• www.opinion-way.com/fr/sondage-d-opinion/sondages-publies/opinion-societe/societe/opinionway-pour-quattrocento-regards-et-attentes-des-francais-sur-la-recherche-scientifique-octobre-2017.html

7• www.credoc.fr/pdf/Rapp/R289.pdf

8• www.contrepoints.org/2018/03/11/311455-inculture-scientifique-un-probleme

9• www.lemonde.fr/sciences/article/2018/06/19/la-mutation-du-palais-de-la-decouverte-ne-doit-pas-alterer-son-adn_5317678_1650684.html

10• www.lemonde.fr/sciences/article/2018/07/12/scientifiques-et-mediateurs-doivent-collaborer-pour-reinventer-la-vulgarisation_5330195_1650684.html

11• D. Bideau *et al.*, « Une journée "Science et Médias" au Palais de la découverte », *Reflets de la physique* **31** (2012) 26-29. www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2012/04/refdp201231p26.pdf

12• R. Farhi, « Comment lutter contre la désinformation scientifique ? Journée Sciences et Médias 2018 », *Reflets de la physique*, **58** (2018) 33-37. www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2018/03/refdp201858p33.pdf

13• P. Morgan *et al.*, "Science Achievement Gaps Begin Very Early, Persist, and Are Largely Explained by Modifiable Factors", *Educational Researcher,* **45** (2016) 18-35.

14• https://fold.it/portal/

© Académie des sciences / Simon Cassanas

Jocelyn Bell en décembre 2018, lorsqu'elle a reçu la grande médaille de l'Académie des sciences à Paris.

Jocelyn Bell Burnell, découvreuse des pulsars

Françoise Combes[1] (francoise.combes@obspm.fr) **et Florence Durret**[2] (durret@iap.fr)

(1) LERMA (UMR CNRS 8112), Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

(2) Institut d'Astrophysique de Paris (UMR CNRS 7095 et Sorbonne Université), 98 bis Bd Arago, 75014 Paris

Née en 1943 à Belfast (Irlande du Nord), Jocelyn Bell est une astrophysicienne britannique reconnue internationalement, pionnière dans le domaine de la radioastronomie : elle a découvert les pulsars en 1967 durant sa thèse à Cambridge (Royaume-Uni). Elle s'est ensuite confirmée comme un des leaders de son domaine.

Tout au long de sa carrière, elle a été également très active au niveau de l'enseignement et de la diffusion des connaissances. Elle a aussi beaucoup œuvré pour la promotion des femmes dans le milieu scientifique.

Thèse de doctorat et découverte des pulsars

Après avoir obtenu son diplôme de Master of Science à l'université de Glasgow, Jocelyn Bell commence sa thèse à Cambridge en 1965, et aide activement à construire le "Four Acre Array", un grand radiotélescope à 81 MHz (longueur d'onde 3,7 m) destiné à observer des quasars, astres lointains tout juste découverts en 1964 par Maarten Schmidt. Son directeur de thèse, Anthony Hewish, et son conseiller de thèse, Martin Ryle, avaient conçu ce projet de radiotélescope spécialisé dans la détection de signaux très variables : les quasars pouvaient être détectés grâce à l'effet de scintillation interplanétaire et interstellaire en radioastronomie (phénomène de turbulence du gaz ionisé, comparable à celui de l'atmosphère en optique), qui doit permettre de distinguer les sources compactes de celles plus étendues.

En 1967, le radiotélescope, constitué de 2048 dipôles couvrant plus de 16 000 m^2, devient opérationnel et Jocelyn Bell est chargée de traiter et d'analyser les données qu'il produit (fig. 1). Tout le ciel dans le domaine de déclinaison entre $-8° < \delta < 44°$ est scanné une fois par semaine. Après avoir passé des heures interminables à scruter les cartes et analysé des centaines de mètres de papier de résultats (avec un enregistrement toutes les 0,03 secondes), elle remarque certaines anomalies qui ne correspondaient pas aux prédictions des modèles de quasars, et les soumet à l'attention de son directeur de thèse Anthony Hewish. Les signaux proviennent d'une position constante sur la sphère céleste (donc ne correspondent pas à des interférences terrestres), et les pulsations, d'environ une par seconde, sont régulières. Au cours des mois qui ont suivi, l'équipe a systématiquement éliminé toutes les sources possibles de ces impulsions radio, jusqu'à pouvoir en déduire qu'elles ont été produites par des étoiles à neutrons, étoiles effondrées trop peu massives pour former des trous noirs.

La source, qui avait été temporairement baptisée LGM-1 (*Little Green Men-1*) ou « Petits Hommes verts-1 », en référence à une origine potentiellement artificielle, est donc par la suite identifiée comme étant une étoile à neutrons en rotation rapide, émettant à chaque tour une impulsion radio vers l'observateur, d'où le nom de « pulsar » qui lui a été donné. En l'espace de quelques mois, Jocelyn Bell a ensuite détecté quatre autres pulsars, de périodes également de l'ordre d'une seconde, venant de différentes régions du ciel.

Ces découvertes ont été publiées dans le numéro de février 1968 de la revue *Nature* [1] et ont eu un impact fort et immédiat. Intriguée tant par la nouveauté et l'originalité d'une femme scientifique que par la signification astronomique de la découverte de l'équipe, la presse a beaucoup repris l'histoire et Jocelyn Bell a été l'objet de toutes les attentions. Cette même année, elle a obtenu son doctorat en radioastronomie de l'Université de Cambridge.

Cependant, en 1974, seuls Hewish et Ryle ont reçu le prix Nobel de physique pour leur travail commun, et notamment pour la découverte des pulsars. Beaucoup de membres de la communauté scientifique

© Mullard Radio Astronomy Laboratory

1. Le radiotélescope "Four Acre Array" du Mullard Radio Astronomy Observatory, près de Cambridge (UK), que Jocelyn Bell (à droite sur la photo) a aidé à construire et qui lui a servi à découvrir les pulsars en 1967.

ont soulevé des objections, estimant que Jocelyn Bell avait été injustement oubliée. Mais Jocelyn Bell elle-même a humblement rejeté cette objection, estimant que le prix avait été décerné correctement compte tenu de son statut de doctorante lors de la découverte, bien qu'elle ait également reconnu que la discrimination fondée sur le genre pouvait avoir contribué dans une certaine mesure.

Poursuite de la carrière de Jocelyn Bell

Jocelyn Bell a ensuite travaillé dans les longueurs d'onde X et gamma, sans abandonner la radioastronomie, et a étudié les phénomènes rapidement variables autour des étoiles binaires X, sursauts gamma et quasars. Elle n'a pas vraiment continué à observer les pulsars, mais s'est spécialisée dans les objets très variables, comme les miniquasars dans la Voie lactée (par exemple SS433) ou bien les trous noirs de masse stellaire possédant un compagnon et un disque d'accrétion, qui sont sujets à des sursauts et des variations sur des périodes de quelques jours, comme Cygnus-X1. Ses connaissances approfondies en matière de radioastronomie et dans tout le spectre électromagnétique lui ont valu toute une vie de respect dans la communauté scientifique et une carrière prestigieuse dans le milieu universitaire. Après avoir reçu son doctorat de Cambridge, elle a enseigné et étudié l'astronomie gamma à l'Université de Southampton. Elle a ensuite passé huit ans comme professeure à l'University College London, où elle s'est concentrée sur l'astronomie en rayons X. Les travaux de Jocelyn Bell ne concernent pas seulement l'astronomie, mais aussi le traitement du signal, notamment la détection des signaux d'amplitude variable et de période extrêmement petite par rapport à la durée de l'expérience.

Au cours de cette même période commence son affiliation à l'Open University, où elle travaillera plus tard en tant que professeure de physique en étudiant les étoiles binaires et à neutrons, et effectuera des recherches en astronomie infrarouge au Royal Observatory à Edimbourg. Elle a été doyenne de la faculté des sciences à l'University of Bath de 2001 à 2004 et professeure invitée dans des institutions aussi prestigieuses que Princeton et Oxford.

La découverte des pulsars a ouvert un nouveau champ d'étude en physique fondamentale. En effet, la très grande stabilité dans le temps des impulsions radio des pulsars permet de les utiliser dans diverses expériences, en particulier dans les tests de la théorie de la relativité générale et la mise en évidence d'ondes gravitationnelles. Une description des propriétés des pulsars et de leurs applications peut être consultée dans l'article récent d'Ismaël Cognard [2].

Une carrière marquée par de nombreux honneurs

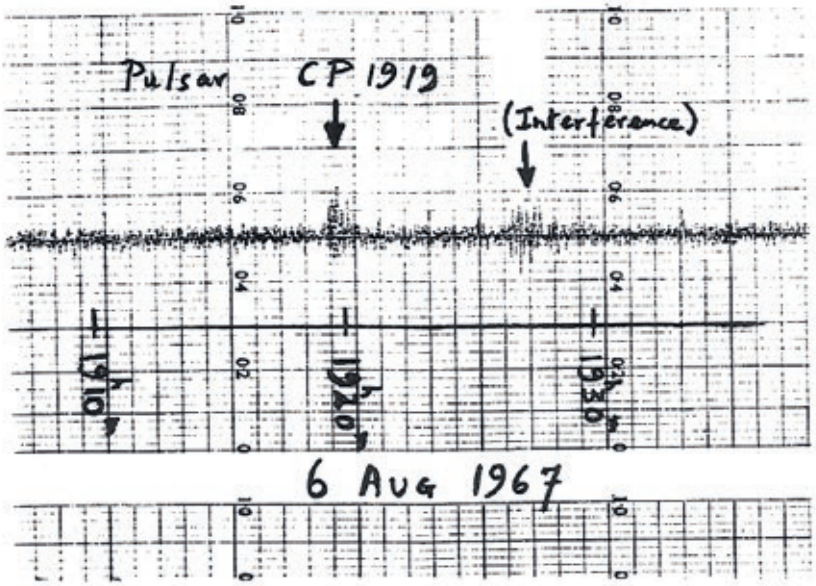
En reconnaissance de ses réalisations, Jocelyn Bell a obtenu d'innombrables récompenses et honneurs, y compris ceux de Commandeur puis de Dame de l'Ordre de l'Empire britannique en 1999 et 2007, respectivement ; un prix Oppenheimer en 1978 ; et la médaille Herschel 1989 de la Royal Astronomical Society, dont elle sera présidente de 2002 à 2004. Elle a été présidente de l'Institute of Physics britannique de 2008 à 2010 et présidente de la Royal Society of Edinburgh de 2014 à 2018. Jocelyn Bell a également reçu des diplômes honorifiques d'un éventail d'universités, trop nombreuses pour être mentionnées.

En décembre 2018, elle a reçu la grande médaille de l'Académie des sciences française. À cette occasion, elle a donné une conférence pleine d'humour retraçant son parcours. Elle raconte notamment son syndrome de l'imposteur, au début de sa thèse, lorsqu'elle arrive de Belfast, région peu considérée par les intellectuels de Cambridge. La pression exercée sur les étudiants était tellement forte, qu'une grande partie d'entre eux décidaient eux-mêmes d'abandonner pour éviter d'être renvoyés. Mais elle s'accroche et décide d'aller jusqu'au bout, de donner le meilleur d'elle-même. Elle s'empare des outils qui lui sont donnés à son arrivée, une tenaille, une pince, un fer à souder, pour construire

>>>

>>>

et câbler le réseau de plus de 2000 antennes du radiotélescope "Four Acre Array" (fig. 1). L'instrument est fixe, et le ciel passe devant les détecteurs : le signal est enregistré en continu sur un rouleau de papier qui défile (fig. 2) et qu'il faut remplacer au moins une fois par jour. Lorsque son œil acéré et expérimenté détecte une anomalie (fig. 3), que quiconque aurait confondue avec une interférence, les discussions avec son directeur de thèse, sceptique quant à la réalité du signal, concluent à la nécessité de faire défiler le papier plus rapidement, pour avoir plus de résolution temporelle. Mais cela implique de changer le rouleau toutes les heures ! Ou alors d'accélérer sa vitesse uniquement lors du passage de l'astre. C'est donc Jocelyn Bell qui, juste avant le passage de l'objet mystérieux, à n'importe quelle heure du jour et de la nuit, devait courir dans la cabane de contrôle pour accélérer la vitesse d'un facteur 10 ou plus.



3. Enregistrement du signal radio ayant conduit à la découverte des premiers pulsars grâce à leur signal périodique. Dans un premier temps, on a cru à des signaux d'origine humaine, et les premiers pulsars ont été nommés LGM1, LGM2, etc. (LGM pour *Little Green Men*, petits hommes verts). Ici, le pulsar CP1919 (Cambridge Pulsar 1919, aujourd'hui appelé PSR B1919+21).

Parmi les points saillants de sa présentation, on relèvera celui-ci : les pulsars ont failli être découverts plusieurs fois, mais à chaque fois, et pour diverses raisons, le signal a été considéré comme défectueux, et il a fallu toute l'opiniâtreté de Jocelyn Bell pour que la réalité de ce signal soit confirmée. Par exemple, lors d'une journée « portes ouvertes » dans un observatoire, les astronomes montraient au public la nébuleuse du Crabe, qui est le résultat de l'explosion de la supernova observée par des astronomes chinois en 1054. Au centre de la nébuleuse, le résidu de l'étoile qui a explosé est une étoile à neutrons. On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'un pulsar ayant une période de rotation de 33 millisecondes (ms). Une région lumineuse nous envoie donc un signal dans les longueurs d'onde visibles toutes les 33 ms. Une visiteuse dit alors à l'astronome guidant le public, que l'étoile au centre est variable, elle papillote et envoie des flashs. L'astronome lui explique de façon condescendante qu'il s'agit de la turbulence de l'atmosphère qui fait scintiller les étoiles. Mais la visiteuse lui répond sèchement : « je suis pilote d'avion, je connais la scintillation, monsieur : cette étoile est variable ! ». Il existe en effet des humains capables de détecter des variations de lumière à l'échelle de trois centièmes de seconde !

2. Jocelyn Bell en 1967, analysant les signaux sur des rouleaux de papier, de 5,3 km de long au total. Tout se faisait à l'œil, les ordinateurs n'étant pas encore répandus.

Lorsqu'il s'est agi de publier les résultats obtenus par Jocelyn, son directeur de thèse, Anthony Hewish, a signé le papier en premier auteur. Lors de la conférence de presse qui a suivi, les journalistes posaient des questions scientifiques à Hewish, mais demandaient à Jocelyn uniquement des détails sur sa vie privée ! Ceci a fortement choqué la jeune scientifique à l'époque, et est certainement à l'origine de toutes ses actions en faveur des femmes et de la science.

Jocelyn Bell s'est beaucoup investie pour améliorer les conditions de carrière des femmes scientifiques. Elle a été présidente de "Women in Science" pour la Société Royale d'Edimbourg, et active pour l'association des femmes en STEM (Science, Technology, Engineering and Maths). Infatigable, elle est intervenue dans de nombreuses conférences à ce sujet, dont on peut voir des vidéos sur Internet [3].

En 2018, elle a aussi reçu le prix de trois millions de dollars du "Breakthrough Prize" en physique fondamentale, prix créé en 2012 par les fondateurs de Facebook et Google. Jocelyn Bell a aussitôt décidé de consacrer cette somme au financement des travaux de thèse menés par des jeunes femmes et des membres de toutes les minorités, sans oublier les chercheurs réfugiés. Elle met ainsi sa générosité au service de la diversité en science, une valeur qui lui est très chère. ■

Références

1• A. Hewish, S.J. Bell *et al.*, *Nature* **217** (1968) 709-713.

2• I. Cognard, « Les pulsars radio : 50 ans de découvertes ! », *Reflets de la physique* **59** (2018) 26-31.

3• www.youtube.com/watch?v=jp7amRdr30Y

Évolutions du site *web* de la Société Française de Physique

Le site *web* de la Société Française de Physique, www.sfpnet.fr, a fait peau neuve le 15 octobre dernier. Cette refonte graphique marque le début d'évolutions à venir, résumées ci-dessous.

La Société Française de Physique (SFP) est une association à l'origine de nombreuses actions et évènements. La refonte de son site *web* devenait indispensable pour mieux valoriser ces initiatives, mieux faire connaitre l'association et donner envie de s'y investir.

Au-delà de l'aspect communication, le nouveau site de la SFP a également pour objectif de donner à ses membres les moyens d'échanger et de s'entraider. Plusieurs outils développés en ce sens verront le jour début 2020.

Un **forum emploi** donnera aux adhérents la possibilité de consulter des offres de thèse et d'emploi dans les secteurs public et privé, en France et à l'international. Les partenariats mis en place à cette fin continueront à se développer après l'ouverture du forum, pour proposer aux membres une sélection d'offres toujours plus vaste et diversifiée.

Un **forum de discussion** ouvrira au premier trimestre 2020 et permettra aux adhérents d'échanger sur des sujets aussi bien disciplinaires que sociétaux. Cette plateforme sera un lieu de partage et de débats, essentiellement animé par les responsables de commissions et divisions de la SFP en fonction des sujets.

Un **programme de mentorat** sera lancé en février, dans un premier temps par les divisions Matière condensée et Physique des plasmas. Le mentorat est une forme de compagnonnage qui associe une personne expérimentée – le/la mentor – et une plus jeune – le/la mentoré.e. Cette dernière bénéficie ainsi de l'expérience de son aîné.e et de sa connaissance du monde professionnel dans lequel il ou elle évolue.

Les **pages des composantes de la SFP** (sections locales, divisions de spécialité, commissions, réseau Jeunes) vont également évoluer et gagner en dynamisme, grâce à une administration directe par leurs bureaux respectifs.

Enfin, l'**espace membre** sera revu pour proposer aux utilisateurs une navigation plus ergonomique et permettre une meilleure gestion administrative de leurs données. La communication digitale de la SFP sera également améliorée, grâce à la mise en place d'outils marketing plus performants et personnalisés, à la fois pour les adhérents de la SFP et les bureaux de ses composantes. Ces derniers pourront, par exemple, envoyer directement des courriels ou des *newsletters* à leurs membres, ce qui devrait multiplier les échanges et accroitre la visibilité de leurs actions.

Mayline Verguin
Responsable Communication de la SFP

Quelques chiffres sur les initiatives de la SFP menées en 2019

70 Conférences organisées
scientifiques et de vulgarisation

241 membres actifs bénévoles

3 expos montées

340 participants
aux Olympiades de Physique France

1520 jeunes
ont découvert le monde de la recherche

6 concours et tournois lancés

538 jeunes chercheurs rassemblés
à l'occasion de rencontres, soirées jeunes, tournois, etc.

163 dossiers de candidatures
étudiés pour les différents prix de la SFP

Prix scientifiques

Prix **Louis Ancel 2017** (matière condensée) **: Éric Collet**

Éric Collet, 46 ans, est professeur à l'université de Rennes 1 et directeur-adjoint de l'Institut de Physique de Rennes. Il y est responsable de l'activité « transitions de phase photo-induites ». Il porte le laboratoire international associé France-Japon *"Impacting Materials with Light and Electric fields and watching real time Dynamics"*.

Éric Collet pousse ses études jusqu'aux échelles de temps ultra-rapides (femtoseconde) au travers d'expériences pionnières. Un de ses résultats phares, obtenu en utilisant la technique pompe optique - sonde rayons X à l'ESRF, est d'avoir pu démontrer qu'une impulsion laser peut gouverner l'ordre entre molécules.
La combinaison de mesures optiques et XANES femtoseconde au laser d'électrons libres (X-FEL) de Stanford, permet alors d'observer comment le changement ultrarapide d'état magnétique d'une molécule, dû à l'absorption d'un photon, est stabilisé par un transfert d'énergie vers des modes de vibration. Éric Collet a également apporté des contributions remarquées à la compréhension de la dynamique structurale ultrarapide hors équilibre des transitions de phases photo-induites, ou encore sur les mises en ordre apériodiques de molécules bistables photo-commutables. Sa production scientifique, jalonnée de résultats marquants, lui a valu de nombreuses présentations invitées dans des conférences internationales.

Avec l'attribution du prix Ancel 2017 à Éric Collet, la SFP met en lumière les travaux de l'un des plus brillants représentants d'un domaine en pleine expansion, l'analyse structurale ultrarapide de la matière.

Prix **Aimé Cotton 2017** (physique atomique, optique) **: Patrice Genevet**

Patrice Genevet, 36 ans, a soutenu en 2009 sa thèse à l'Institut Non Linéaire de Nice. Il est depuis 2015 Chargé de recherche CNRS au Centre de Recherche sur l'Hétéro-Épitaxie et ses Applications (CRHEA, Sophia-Antipolis), au sein duquel il pilote les activités du groupe « Métasurfaces ».

Durant un séjour postdoctoral de 5 ans à l'Université de Harvard, Patrice Genevet s'est consacré au domaine émergent de la nano-photonique planaire, qui consiste à manipuler les propriétés de la lumière à l'aide de motifs sublongueur d'onde formant des structures planaires (métasurfaces). Par son dynamisme et sa créativité, il a su apporter au sein d'un groupe de renommée mondiale un ensemble de contributions remarquables : mise en évidence de lois de réflexion/réfraction généralisées, première lentille ultra-mince achromatique et non aberrante...
Son programme de recherche au CNRS propose d'incorporer des semi-conducteurs à grand *gap* dans des métasurfaces optiques, pour étendre leur plage spectrale de fonctionnement au domaine visible et concevoir des composants optoélectroniques reconfigurables ultra-minces. Ce programme est le cœur du projet ERC *Starting Grant* "FLATLIGHT", que Patrice Genevet a obtenu en 2015 et qui l'a conduit à produire des résultats marquants tels que des métasurfaces permettant la mise en œuvre de concepts d'optique transformationnelle pour du camouflage, par exemple.

Le jury du prix Aimé Cotton 2017 félicite Patrice Genevet pour l'ensemble de ses travaux théoriques et expérimentaux sur les métasurfaces optiques.

Prix **Joliot-Curie 2017** (physique des particules) **: Sylvie Rosier-Lees**

Sylvie Rosier-Lees, directrice de recherches CNRS au Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules, dont elle a été directrice-adjointe, est une personnalité de premier plan en physique des particules et des astroparticules.

Au sein de l'expérience L3 au LEP, collisionneur e^+-e^- du CERN, elle s'est distinguée par ses recherches sur le neutralino, une particule prédite par la supersymétrie et candidate de matière noire. Son travail a été récompensé en 2002 par l'attribution du prix Thibaud de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon.
À partir de 1996, elle rejoint l'expérience AMS sur la station spatiale internationale (ISS). Ses mesures précises de la fraction de positons dans le rayonnement cosmique ont donné lieu à de nombreuses publications. Sylvie Rosier-Lees s'est aussi intéressée au spectre d'antiprotons : en collaboration avec des théoriciens, les modèles ont été raffinés et la mesure est désormais compatible avec les prédictions théoriques, excluant un signal de matière noire.
À partir de 2005, le groupe de Sylvie rejoint l'expérience HESS en Namibie. Elle y poursuit ses études autour de la matière noire, en recherchant des excès exotiques dans les spectres de rayons gamma cosmiques de très haute énergie. Elle a coordonné le projet de construction du système d'asservissement de la camera du cinquième télescope de HESS, le plus grand télescope au monde pour l'astronomie gamma.

En conclusion, le jury est heureux de remettre à Sylvie Rosier-Lees le prix Joliot-Curie 2017.

Prix **Louis Ancel 2018** (matière condensée) : **Anna Minguzzi**

Anna Minguzzi, 45 ans, ancienne élève de l'École Normale Supérieure de Pise (Italie), y a soutenu sa thèse en 1999. Recrutée par le CNRS en 2005, elle travaille au LPMMC (Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés) de Grenoble, qu'elle dirige depuis 2014.

Les recherches d'Anna Minguzzi portent sur l'étude théorique des systèmes quantiques en interaction. Elle a obtenu des résultats originaux et s'est imposée comme une référence au niveau international sur plusieurs sujets : l'étude des systèmes bosoniques en une dimension et en très forte interaction répulsive, l'extension de la solution exacte aux systèmes fermioniques et aux mélanges boson-fermion, les bosons en forte interaction à température finie. Ses derniers travaux sont consacrés à la description théorique des excitons-polaritons et à l'étude de dispositifs atomiques pour des applications aux technologies quantiques.

Ces recherches sont source d'inspiration pour les expérimentateurs. La production scientifique d'Anna Minguzzi est très riche (près d'une centaine d'articles dans des revues à comité de lecture) et ses travaux lui ont valu de nombreuses conférences invitées, en particulier à l'international.
Elle participe activement à l'animation scientifique de la communauté à travers l'organisation de conférences, mini-colloques, écoles thématiques et activités éditoriales.
En décernant à Anna Minguzzi le prix Louis Ancel 2018, la SFP souhaite récompenser une physicienne brillante aux approches novatrices.

Prix **Aimé Cotton 2018** (physique atomique, optique) : **Nicolas Sisourat**

**Nicolas Sisourat, 38 ans, a obtenu sa thèse en 2008 sous la supervision d'Alain Dubois.
Après un postdoctorat à l'Université de Heidelberg, il a été recruté en 2010 comme Maître de conférences au Laboratoire de Chimie Physique Matière et Rayonnement (LCPMR) de l'Université Pierre et Marie Curie, Sorbonne Universités.**

Nicolas Sisourat a développé une expertise en dynamique moléculaire ultrarapide. Lors de son postdoctorat, son apport à l'étude théorique des échanges d'énergie dans le dimère d'hélium, un système particulièrement difficile à modéliser car extrêmement peu lié, fut remarquable.
Il s'est ensuite attaché à l'étude des processus de photo-ionisation en couche interne. Au LCPMR, il a développé des recherches qui touchent à la fois à la spectroscopie, au couplage avec des lasers intenses et aux collisions. Son activité scientifique de modélisation est riche et originale, avec de nombreux articles d'une qualité théorique remarquable, mais reste proche des avancées expérimentales.

Nicolas Sisourat a encadré plusieurs thèses. Des publications en commun avec des groupes mondialement reconnus, ainsi que de nombreuses conférences invitées dans des congrès internationaux attestent de la reconnaissance dont il jouit. Ses travaux trouvent des applications en physico-chimie, spectroscopie, physique des plasmas et astrophysique.

Le jury du prix Aimé Cotton félicite Nicolas Sisourat pour son développement d'approches théoriques et numériques permettant de décrire des processus électroniques et nucléaires ultrarapides lors des interactions de molécules avec du rayonnement ou avec des ions.

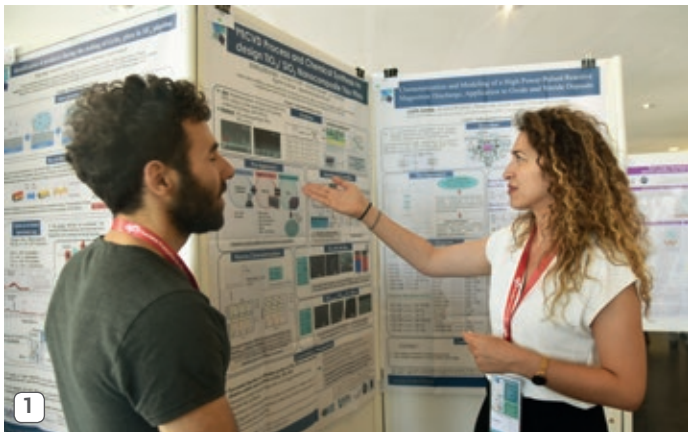
Prix **Joliot-Curie 2018** (physique nucléaire) : **Stéphane Grévy**

Stéphane Grévy, directeur de recherches au CNRS, a 48 ans. Après sa thèse à l'IPN d'Orsay portant sur les noyaux à halos, et un séjour postdoctoral au NSCL de Michigan State University, il est embauché en 1998 au LPC Caen. En 2010, il rejoint le CENBG (Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux-Gradignan), dont il est directeur-adjoint depuis 2017.

Stéphane Grévy est un expérimentateur en structures nucléaires de basse énergie, domaine dans lequel il a apporté des contributions majeures.
Au début de sa carrière, ses activités ont porté sur l'étude des nombres magiques dans les noyaux exotiques riches en neutrons. Sa contribution majeure fut la mise en évidence du développement progressif d'une région de déformation entre le noyau doublement magique et sphérique ^{48}Ca et le noyau fortement déformé ^{42}Si, noyau extrêmement exotique car comportant 28 neutrons pour « seulement » 14 protons.

En 2010, au CENBG, il prend la responsabilité du projet PIPERADE ayant pour but, dans le cadre du projet SPIRAL2, de développer un ensemble de piégeage de Penning innovant. L'objectif est de pouvoir accepter un grand nombre de noyaux exotiques (jusqu'à 10^6-10^7 ions par seconde) – afin de les trier avec un pouvoir de résolution dix fois supérieur à un spectromètre magnétique – et de les distribuer aux différentes expériences du hall DESIR.
Pour l'originalité de sa démarche scientifique, et pour son profil complet et diversifié, la Société Française de Physique est heureuse de décerner le prix Joliot-Curie 2018 à Stéphane Grévy.

Le Congrès général 2019 de la SFP



Le 25e Congrès général de la Société Française de Physique s'est déroulé du lundi 8 au vendredi 12 juillet 2019 à la Cité des congrès de Nantes, dans un cadre privilégié en centre-ville, à deux pas de la Loire et du château des Ducs de Bretagne. Organisé par un comité scientifique présidé par Jean Dalibard (Collège de France) et un comité local présidé par Jean-Luc Duvail (Institut des Matériaux Jean Rouxel), il a réuni 400 participants qui ont délivré 160 conférences et 66 communications par affiche.

Conférences, sessions science et société, sessions posters, exposition industrielle (18 exposants), exposition photo, remises de prix ont rythmé la semaine. Un grand merci aux participants, conférenciers, exposants, bénévoles, qui ont contribué à ce que cette édition reste dans nos mémoires !

Treize conférences plénières, dont plusieurs proposées par des récipiendaires de prix prestigieux de la SFP et de ses partenaires internationaux, ont livré au public les derniers développements remarqués en physique (voir tableau 1). Les principaux domaines d'actualité ont été ensuite approfondis lors de vingt-trois sessions scientifiques spécialisées (« minicolloques ») et de deux sessions par affiches (sessions « posters »).

Les sessions posters

Installées par les services de la Cité, elles étaient empreintes d'une atmosphère conviviale (fig. 1).

Des « prix posters » ont été attribués à trois doctorants, dont le jury a apprécié les résultats scientifiques, la clarté de la présentation et l'enthousiasme. De gauche à droite sur la figure 2 :

- **Thomas Le Néel** (Institut des Matériaux Jean Rouxel, Nantes), « Synthèse "verte" de nanoparticules d'or anisotropes pour spectroscopie Raman exaltée de surface et applications en biologie ».
- **Laila Dakroub** (Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay), « Nouvel instrument pour la métrologie temporelle des sources XUV ultra-brèves ».
- **Ophélie Bugnon** (Laboratoire Subatech, Nantes), « Mesure de l'excès de mésons J/Psi à très basse impulsion transverse à 5 TeV, au LHC du CERN avec le détecteur ALICE ».

Remise des prix SFP

Cinq prix scientifiques de la SFP ont été remis durant le congrès.

- Le prix Gentner-Kastler 2019 décerné – avec la DPG (Société allemande de physique) – à **Christof Wetterich** (Université d'Heidelberg), pour ses travaux théoriques sur la renormalisation fonctionnelle et les applications associées.
- Le prix Friedel-Volterra 2018 décerné – avec la SIF (Société italienne de physique) – à **Francesco Sette** (ESRF, Grenoble) pour ses travaux pionniers sur le rayonnement X synchrotron.
- Le prix Félix Robin 2017 à **Danielle Dowek** (ISMO, Orsay), pour ses travaux en physique atomique et moléculaire (voir *Reflets de la physique* n°61, p. 41).
- Les prix de spécialité Aimé Cotton (physique atomique et moléculaire, optique) 2017 et 2018, respectivement à **Patrice Genevet** (CRHEA, Sophia-Antipolis) et **Nicolas Sisourat** (LCPMR, Paris 6) (voir pp. 34-35).

Sessions science et société

Sept sessions ont porté sur les nouveaux programmes de lycée, l'égalité-parité hommes-femmes dans la recherche, les publications (le plan national pour la science ouverte), l'histoire des sciences, l'emploi en entreprises des jeunes docteurs en physique, la désinformation scientifique, et les actions de coopération scientifique avec les pays en voie de développement. Elles ont été complétées par un atelier pratique d'écriture d'*abstracts*, organisé par EDP Sciences.

Remise des prix du concours *Beautiful Science*

Dans le cadre du congrès, la SFP a lancé *Beautiful Science*, un concours d'images et de sons sur le thème : « Montrer la science dans ce qu'elle a de plus beau et de plus élégant, de l'infiniment petit à l'infiniment grand ! » (voir pp. 38-39). Une cinquantaine d'œuvres ont été exposées au Congrès général et les lauréats sont venus recevoir leur prix.

Bilan parité/égalité du congrès

Globalement, les femmes étaient bien représentées à ce congrès, principalement *via* les conférences plénières. En effet, ces dernières ont été données par sept femmes et sept hommes (bravo au comité scientifique et à son président !).

2

3

Le taux de femmes participant à la conférence était de 26%, ce qui est légèrement supérieur au taux de femmes physiciennes en France (~ 22%), mais très supérieur à la proportion de participantes au congrès de Strasbourg en 2015 (12%).
Sur l'ensemble des minicolloques, 33 présentations orales ont été données par des femmes, 108 par des hommes : donc 23% de présentations par des femmes, taux inférieur à l'objectif de la charte de parité qui est, en physique, d'atteindre 30%. On remarque une disparité entre les minicolloques, deux d'entre eux étant exclusivement masculins et deux autres totalement paritaires.

Évènements grand public

La SFP a organisé une conférence grand public, « *La physique au service du patrimoine culturel : quand un accélérateur de particules perce les secrets des œuvres (d'art) !* », donnée par Claire Pacheco (fig. 3), responsable de l'Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire (AGLAE), Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), Paris.
Trois visites de sites industriels ont été proposées le dernier jour : « Airbus Industries » (le site de production d'Airbus), « Technocampus Composites » et « Technocampus Océan » (deux plateformes de recherches technologiques mutualisées sur les matériaux et la robotique, dépendant de l'IRT Jules Verne).

Photos et gazette

Revivez quelques moments de la semaine au travers de la galerie de photos, disponible sur le site du congrès (www.sfp2019.fr).
Vous pouvez retrouver également sur ce site une vision décalée, toute en humour, de la semaine, en relisant les quatre numéros de la gazette *Le Canard Intriqué*, qui fut quotidiennement distribuée à la criée aux participants par notre joyeuse équipe de jeunes bénévoles.
Enfin, les organisateurs tiennent à remercier les nombreux partenaires qui ont soutenu le congrès avec enthousiasme.

Liste des conférences plénières

- *Les suspensions de particules actives,* Jean-François Joanny (ESPCI et Institut Curie, Paris).
- *Des réseaux de microcavités pour simuler la matière condensée avec de la lumière,* Jacqueline Bloch (C2N, Saclay/Polytechnique).
- *Making the invisible, visible : the beauty of synchrotron science,* Francesco Sette (ESRF, Grenoble).
- *Functional renormalization from quantum gravity and cosmology to superconducting solids,* Christof Wetterich ((Université de Heidelberg).
- *Observer et contrôler les électrons pendant l'ionisation des molécules : du rayonnement synchrotron aux impulsions XUV attosecondes,* Danièle Dowek (ISMO, Orsay).
- *Physique de la turbulence à l'échelle de Kolmogorov,* Bérangère Dubrulle (CEA/Saclay).
- *Un plasma de quarks et de gluons est-il produit dans les collisions proton-proton au LHC ?,* Sarah Porteboeuf-Houssais (LPC, Clermont-Ferrand).
- *Des masses des neutrinos à l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers,* Stéphane Lavignac (IPhT, Saclay).
- *Nanocomposants pour le calcul inspiré du cerveau,* Julie Grollier (UMR CNRS/Thalès, Palaiseau).
- *Étudier le problème à N-corps avec quelques atomes,* Antoine Browaeys (Institut d'Optique, Palaiseau).
- *Structures et évolution de la Voie Lactée à la loupe avec la mission spatiale Gaia,* Annie Robin (Observatoire de Besançon).
- *La physique des interfaces entre oxydes,* Jean-Marc Triscone (Université de Genève).
- *La fusion par confinement magnétique,* Xavier Garbet (CEA Cadarache).

1. ***Dans l'intimité d'une frontière franchie,*** par **Antoine Lagarde** (25 ans, doctorant en mécanique des fluides à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert, Paris).

Bulle d'air qui traverse une interface entre de l'eau et de l'huile.

Le concours *Beautiful Science* de la SFP

En mars 2019, la Société Française de Physique a lancé *Beautiful Science*, un concours d'images et de sons ouvert à tous et portant sur toutes les sciences. Une sélection des œuvres reçues a été présentée au Congrès général 2019 de la SFP et, depuis, elle fait l'objet d'une exposition itinérante.

Parce que science rime aussi avec **beauté, créativité et émerveillement,** la SFP a désiré inviter tout un chacun à redécouvrir le monde magnifique et mystérieux qui nous entoure à travers le concours *Beautiful Science*, lancé dans le cadre du Congrès général 2019.

Le thème : **Montrer la science dans ce qu'elle a de plus beau et de plus élégant, de l'infiniment petit à l'infiniment grand !**

Ce concours d'images et de sons était soutenu par trente-trois organisations partenaires, et parrainé par le collectif français *Obvious*, fondé par trois amis d'enfance, amateurs d'art et de *machine learning*, à l'origine de la première peinture d'intelligence artificielle intitulée *Edmond de Belamy*.

Plus de 360 propositions furent reçues au total : photos, peintures, schémas, dessins, vidéos et pistes audio. Les auteurs, âgés de 9 à 87 ans, présentaient une grande diversité de profils : des contributeurs scientifiques (travaillant dans les différents domaines de la physique, ainsi qu'en informatique, océanographie, paléontologie, agronomie, biologie ou médecine), mais aussi des artistes, une concierge ou encore un agent de sécurité ! Bref, pari réussi pour ce concours qui avait pour objectif de rassembler professionnels comme amateurs de science autour d'un thème fédérateur et enthousiasmant.

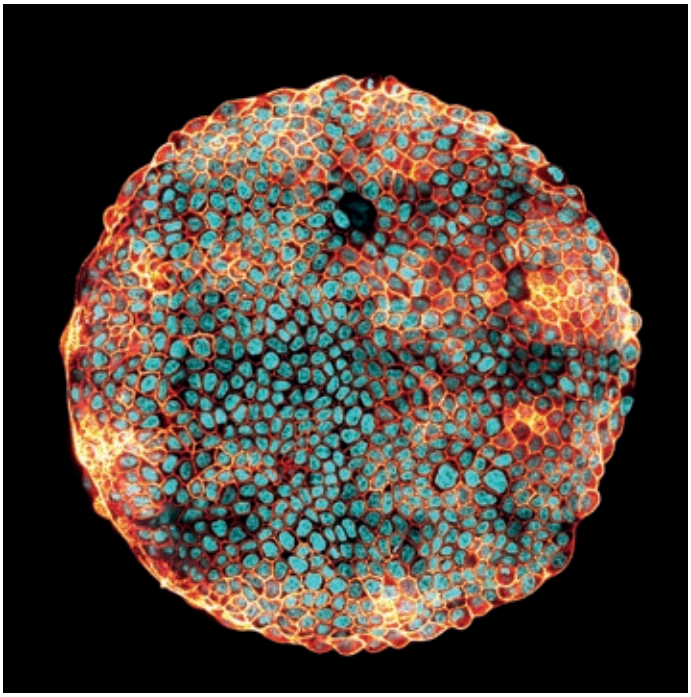
Le jury, composé des partenaires de l'opération (voir la bannière en bas de page), a sélectionné quatre œuvres lauréates (figures 1 à 4) et présélectionné dix autres œuvres soumises au vote du public (l'œuvre élue par le public est présentée en figure 5).

L'exposition *Beautiful Science*

Une sélection d'une cinquantaine d'œuvres a été exposée au Congrès général de la SFP, qui s'est tenu à la Cité des congrès de Nantes du 8 au 12 juillet 2019. L'exposition, conçue par Julie Villegas et Mayline Gautié, a ensuite voyagé à Saint-Brieuc, où elle fut proposée au public du 5 octobre au 19 novembre dans le cadre du Festival *Baie des Sciences,* puis du Festival *Photo Reporter*.

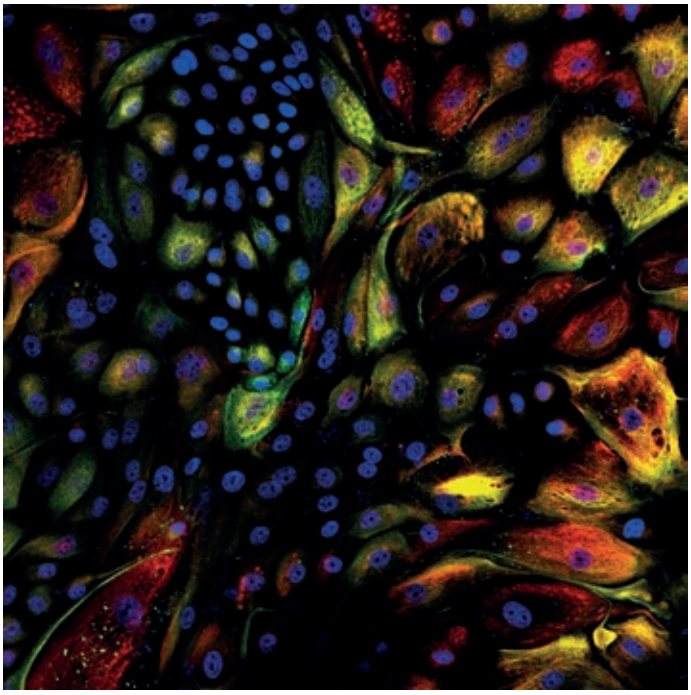
BEAUTIFUL SCIENCE

Vous souhaitez faire venir l'exposition dans vos locaux ?
Rendez-vous sur le site de la SFP
www.sfpnet.fr/



2. *Ilot de cellules,*
par **Nicolas Harmand** (26 ans, doctorant en biophysique), **David Pereira** (31 ans, postdoctorant en biophysique) et **Sylvie Hénon** (52 ans, professeure des universités à Paris), tous les trois du laboratoire MSC à l'université Paris Diderot.

Des cellules épithéliales ont été mises en culture sur un gel de polyacrylamide où l'on a disposé des disques de protéines d'adhérence à certains endroits. Sur l'image, prise par microscopie confocale à fluorescence, les noyaux des cellules sont de couleur cyan, et leurs contours dans une nuance de jaune-rouge.

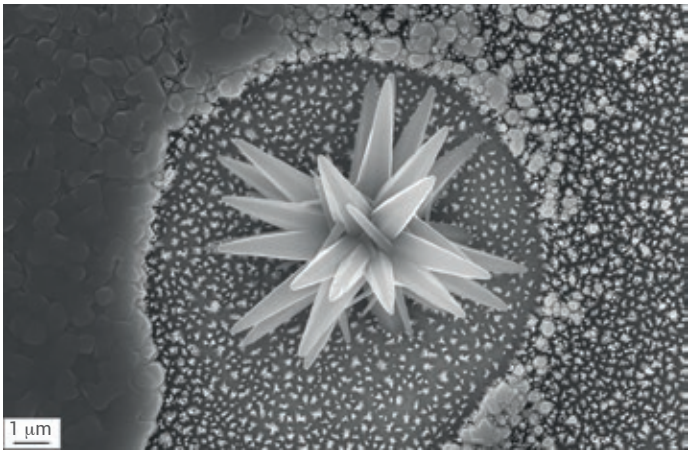


3. *Hallucination cellulaire,*
par **Martine Batailler** (62 ans, assistante ingénieure en neuroendocrinologie à l'INRA Val de Loire).

Cellules en culture. En vert et en rouge : marquage de deux protéines du cytosquelette. En bleu : visualisation des noyaux des cellules par coloration de l'ADN.

4. *Planète sous cloche,*
par **Hubert Klein** (47 ans, maitre de conférences au département de physique et chimie de l'université d'Aix-Marseille).

Photographie en champ sombre, au flash, d'une bulle de savon éclairée par le dessous. Une gélatine magenta colore la lumière du flash. On observe des turbulences sur le haut de la bulle, et une variation d'épaisseur du film d'eau savonnée, qui ne sont pas sans rappeler les planètes gazeuses de notre système solaire.



5. *Nano-needles in a tiny haystack,*
par **Pierre Gaffuri** (26 ans, doctorant au Laboratoire des matériaux et du génie physique de l'INP à Grenoble).

Les nanofils d'oxyde de zinc (ZnO) sont des structures prometteuses pour de nombreux dispositifs nanométriques. Leur synthèse par voie chimique peut réserver quelques surprises lorsqu'on les caractérise par microscopie électronique à balayage : on tombe parfois sur des inhomogénéités, amas, trous ou coalescences nanométriques, qui font penser à des nanofils dans une petite botte de foin et qui laissent rêveur.

© Cyril Frésillon / CNRS Photothèque

Astrid Lambrecht, la curiosité en partage

Spécialiste de mécanique quantique, cette théoricienne proche de l'expérience dirige l'Institut de physique (INP) du CNRS depuis juin 2018. Elle y encourage une recherche où l'exploration des fondements de la physique, ses interfaces avec les autres disciplines et l'innovation se nourrissent mutuellement.

« *Ce n'est pas en améliorant la bougie que l'on a inventé l'ampoule électrique !* » Par cette citation attribuée au célèbre physicien Niels Bohr, Astrid Lambrecht, à la tête de l'Institut de physique (INP) du CNRS depuis juin 2018, résume sa conception de la physique, de même que l'esprit de sa politique scientifique. Et la physicienne développe : « *La physique a pour but de découvrir les lois fondamentales de notre univers. En même temps, c'est une source inépuisable d'applications, et nombre de ses découvertes ont eu pour origine la réponse à des questions pratiques.* » Elle ajoute : « *Ce qui doit primer, c'est la curiosité !* » Qui, selon cette scientifique d'origine allemande, n'est jamais aussi bien éveillée que lorsque la physique devient cette formidable aventure collective où théoriciens et expérimentateurs travaillent de concert, explorant aussi bien les fondements de leur science que son interface avec les autres disciplines.

Au départ, cette spécialiste reconnue de l'effet Casimir, l'une des manifestations les plus déconcertantes de la mécanique quantique, n'imagine pourtant même pas faire de la physique, et s'inscrit en première année de médecine à l'issue de ses études secondaires. « *J'avais plus de goût pour la biologie et les sciences naturelles, plus concrètes, plus proches de la vie quotidienne* », se souvient-elle. Un cours de physique « *extraordinaire* » en décide autrement : « *J'ai découvert avec ravissement cette possibilité offerte par la physique de se poser des questions très fondamentales tout en allant au bout d'une interrogation* », précise Astrid Lambrecht.

Elle opte alors pour une réorientation au sein de l'Université d'Essen, en Allemagne, avant un séjour prédoctoral à l'Imperial College de Londres, en 1991. La future Médaille d'argent du CNRS y découvre l'optique quantique, alors en pleine révolution, et plus généralement « l'étrange » mécanique quantique et ses problèmes « *très ouverts, très difficiles, mais très intéressants !* » Après quoi, Astrid Lambrecht, recommandée par ses professeurs, rejoint le Laboratoire Kastler Brossel (LKB) à Paris, où elle effectue sa thèse de doctorat sous la direction d'Élisabeth Giacobino. Après un séjour postdoctoral dans le laboratoire de Theodor Wolfgang Hänsch, prix Nobel de physique 2005, à l'Institut Max Planck, à Garching, elle est recrutée par le CNRS en 1996.

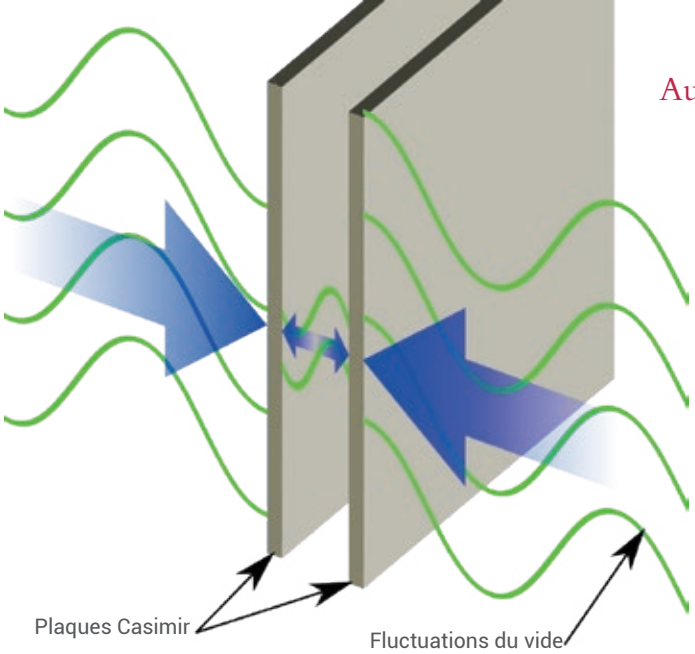
De retour au LKB, son goût pour les questions ardues pousse Astrid Lambrecht à s'intéresser à l'effet Casimir, du nom du physicien qui l'a prédit le premier, en 1948. Selon les calculs de ce dernier, deux plaques conductrices se faisant face exercent l'une sur l'autre une force attractive ayant pour origine ce que les physiciens appellent les « fluctuations du vide » (fig. 1). Celles-ci reposent sur l'idée qu'à l'échelle quantique, le vide n'est pas rien, mais un milieu qui, même en l'absence de toute matière, demeure agité de fluctuations quantiques irréductibles...

L'idée de la physicienne : rendre tangible cette manifestation déroutante de la mécanique quantique. Comme elle l'explique, alors même qu'en ce début des années 2000, l'étude de l'effet Casimir connait un renouveau sur le plan expérimental, « *avec Serge Reynaud, nous avons introduit un formalisme issu de l'optique quantique permettant de faire des prédictions dans des situations expérimentales à la fois réalistes et variées, notamment en tenant compte de la réflexion de la lumière forcément imparfaite des miroirs.* »

À la suite, la lauréate du Prix Aimé Cotton 2005 de la Société française de physique, en collaboration notamment avec Marc-Thierry Jaekel, poursuit des travaux très fondamentaux sur l'effet Casimir dynamique, selon lequel un miroir se déplaçant très rapidement dans le vide devrait émettre des photons « arrachés » à celui-ci. En parallèle, elle collabore avec des équipes expérimentales sur différents aspects concrets de l'effet Casimir, soit qu'il faille en tenir compte pour interpréter correctement les résultats d'une expérience de physique des particules, soit qu'il ait des implications dans le développement de composants nanotechnologiques.

Car, pour Astrid Lambrecht, la finalité importe peu pourvu qu'il y ait toujours quelque chose de nouveau à apprendre et à partager. Décrivant son activité de chercheuse, elle évoque en effet spontanément l'importance pour elle des discussions avec ses pairs, notamment les doctorantes et doctorants dont elle a eu la charge. De même, celle qui a été directrice adjointe scientifique de l'INP entre 2016 et 2018, possède cette conviction d'appartenir à une communauté, non sans lien avec son choix de s'investir dans l'administration du CNRS. « *C'est une façon de rendre à un établissement qui m'a accueilli et tant offert* », précise-t-elle.

Avec l'écoute comme méthode de travail : « *La politique scientifique de l'INP s'appuie en premier lieu sur les remontées des laboratoires*, détaille la successeuse d'Alain Schuhl, aujourd'hui directeur général délégué à la science du CNRS. *Les chercheuses et les chercheurs sont de fait les mieux placés pour savoir où sont les questions intéressantes, les sujets qui comptent ou les problématiques qui montent.* »



© Emok (Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license).

1. Forces de Casimir sur des plaques parallèles. L'effet Casimir, prédit par le physicien néerlandais Hendrik Casimir en 1948, est une force attractive entre deux plaques parallèles et non chargées. Il est dû aux fluctuations quantiques du vide.

Pour minimiser le risque de passer à côté de quelque chose, Astrid Lambrecht croise ainsi les regards à tous les niveaux, des Groupements de recherche (GdR) au Conseil scientifique de l'institut, ou des Directions adjointes scientifiques au Comité national du CNRS. Concrètement, à son initiative, la fréquence des séminaires regroupant les directrices et directeurs adjoints a été augmentée. Quant aux exercices de prospective des GdR, dont le dernier a fait l'objet d'une synthèse publiée cette année [1], ils seront réactualisés très régulièrement. « *Il est important de rechercher la cohérence des visions aux différents étages hiérarchiques, de même que de se donner les moyens d'identifier les signaux faibles* », appuie celle qui est également membre du Conseil scientifique de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Consulter, écouter, échanger... mais également décider : « *Je suis une pragmatique, et piloter la recherche, cela signifie l'aider à se structurer* », souligne Astrid Lambrecht. C'est pourquoi un chargé de mission a effectué sur le territoire le recensement des microscopes électroniques en transmission : « *Il s'agit d'optimiser le déploiement de ces instruments qui sont indispensables, et dont il faut assurer le cout de maintien et de fonctionnement* », explique la directrice.

Pour Astrid Lambrecht, structurer c'est aussi aider à l'émergence de nouvelles communautés. C'est le sens du GdR Polymères et Océans, créé en début d'année. Initié par l'INP, il regroupe des scientifiques de six instituts du CNRS et d'autres partenaires comme l'IFREMER, autour du devenir des matières plastiques dans les eaux marines. De même, à l'échelle internationale, la directrice se félicite de la mise en route, en 2019, d'un laboratoire commun international entre un laboratoire du CNRS, le CEMES, et l'entreprise japonaise Hitachi.

Au-delà, la théoricienne quantique insiste sur le caractère pivot de la physique qui, selon sa conception, est autant une discipline qu'une méthode ou une manière d'interroger le monde. D'où, pour elle et l'INP, l'importance d'encourager une recherche interdisciplinaire, tout en soutenant la recherche disciplinaire en physique, indispensable à la première. À cet égard, la lauréate 2016 du prix Gentner-Kastler, décerné conjointement par la Société française de physique et son homologue allemande, cite l'importance des liens entre physique, biologie et médecine, notamment dans le domaine de l'imagerie.

S'agit-il de science fondamentale, de science appliquée ? Pour Astrid Lambrecht, la question est presque sans objet, rappelant que la mécanique quantique est à l'origine du laser, aujourd'hui incontournable dans tous les segments de la société, et qu'à l'inverse, Hendrik Casimir a découvert l'effet qui porte son nom en travaillant au développement d'ampoules électriques chez Philips. Sublime illustration de cette dialectique avec, l'année passée, la réforme du Système international d'unités, désormais toutes fondées sur des constantes fondamentales de la physique, et sur lesquelles reposent les certifications métrologiques qui permettent au final d'acheter un kilo de pommes !

Ainsi, pour Astrid Lambrecht, il ne fait aucun doute que l'INP, à l'origine de 80 *start-up* en activité et qui a reçu cinq grands prix au concours d'innovation i-Lab 2018, doit encourager l'innovation. « *À cet égard, nous avons à l'Institut un programme de "coaching" afin d'aider nos chercheurs à franchir le pas, notamment en leur faisant comprendre que la valorisation d'un résultat ne signifie pas mettre leur recherche de côté, mais qu'au contraire, les deux activités sont complémentaires et se nourrissent l'une l'autre* », plaide-t-elle.

In fine, un seul mot d'ordre : l'excellence disciplinaire. Dans ce but, la directrice de l'INP insiste notamment sur l'importance de laisser aux chercheurs le temps nécessaire, parfois long, d'explorer au-delà des limites de notre connaissance. La nécessité de donner parfois un coup de pouce aux scientifiques en finançant des projets novateurs compte tout autant : « *C'est le sens des projets dits "Levée de verrous" qui ont permis l'année passée à quinze chercheurs de l'INP d'être accompagnés dans l'exploration de voies nouvelles, inédites dans leur champ disciplinaire.* » Telles celles empruntées par Astrid Lambrecht au cours de sa carrière de chercheuse. Seule façon de découvrir, qui sait, un jour, ce qui remplacera peut-être demain l'ampoule électrique ! ■

Mathieu Grousson,
journaliste scientifique

[1] https://inp.cnrs.fr/fr/node/1970

Climat, énergie, environnement : où va-t-on ?

Un débat autour des thèmes climat, énergie, matériaux pour l'énergie, a été organisé par la commission Énergie & Environnement de la SFP, en partenariat avec la Société Chimique de France (SCF), le 19 janvier 2019 à Paris à l'ENS, à l'issue de l'Assemblée Générale de la SFP. Ce débat, précédé d'un exposé d'ouverture donné par Jean Jouzel (Académie des sciences), a consisté en trois tables rondes successives. Ce fut très réussi, tant en termes de fréquentation que par la qualité des interventions et des discussions. Le programme détaillé, ainsi que les liens d'accès aux supports de toutes les présentations, ont été mis en ligne sur le site de la SFP www.sfpnet.fr/climat-energie-environnement-ou-va-t-on.

Chacune des trois sessions a consisté en trois ou quatre présentations synthétiques d'une quinzaine de minutes. Elles ont toutes été suivies par un moment d'échange avec le public. Les discussions ont été riches et les questions posées par la salle ont démontré la curiosité et le désir de s'informer des participants. Quelques exemples représentatifs des sujets abordés dans ces échanges sont listés ci-dessous, après un rappel des titres des exposés et des noms des intervenants.

- **Première table ronde sur le climat, modérée par François-Marie Bréon, LSCE**
  (i) Les risques et les incertitudes liés au changement climatique (François-Marie Bréon, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)).
  (ii) La géo-ingénierie peut-elle sauver le climat ? (Olivier Boucher, Institut Pierre-Simon Laplace).
  (iii) Cycle du carbone dans un climat perturbé (Philippe Peylin, LSCE).
  Parmi les questions posées : Comment travaille le GIEC et, en particulier, comment et par qui les prises de position sont-elles décidées ? Les sources d'incertitude dans les modèles ; la géo-ingénierie et ses promesses ; la capture et la séquestration du carbone.

- **Deuxième table ronde sur l'énergie, modérée par Gérard Bonhomme, SFP**
  (i) L'évolution des besoins en énergie pour l'Europe (Colette Lewiner, Capgemini).
  (ii) Intermittences des renouvelables : état des lieux, perspectives et défis (Daniel Suchet, IPVF et École polytechnique).
  (iii) "Power-to-Gas to power" : solution au stockage de masse ou impasse ? (Georges Sapy, Association Sauvons le Climat).
  (iv) Les aspects économiques et les couts cachés des ressources énergétiques (Jacques Percebois, Université de Montpellier).
  Parmi les thèmes de la discussion : questions autour du bon niveau de gestion de l'approvisionnement énergétique (local *versus* national) ; *quid* de la possibilité et des promesses de l'autoconsommation à partir des énergies renouvelables ? Diverses questions autour de l'intermittence et du problème du stockage de l'électricité.

- **Troisième table ronde sur les matériaux, modérée par Stanislas Pommeret, SCF et SFP**
  (i) Le stockage chimique et électrochimique (Damien Dambournet, Laboratoire Phoenix, Sorbonne Université).
  (ii) Énergie bio-inspirée (Ally Aukauloo, ICMMO, Université de Paris-Saclay).
  (iii) La biomasse (Xavier Montagne, Direction générale de la recherche et de l'innovation).
  (iv) Les ressources minérales (José Halloy, LIED, Université Paris-Diderot).
  Parmi les questions posées : Comment estime-t-on les ressources disponibles (différence entre ressources et réserves) ? Quel est le taux de retour en énergie des biocarburants ? Discussion autour des problèmes (en termes de ressources minérales notamment) liés à la massification de technologies diluées.

Gérard Bonhomme
Président de la commission Énergie & Environnement de la SFP

Des sociétés savantes unies dans un contexte qui change

Ce courrier est un écho au très intéressant éditorial de Catherine Langlais, présidente de la Société Française de Physique (SFP), publié dans le numéro 58 de *Reflets de la physique* en juin 2018 sous le titre : *Rapprocher les sociétés savantes : un impératif !* Cette vigoureuse injonction nous semble particulièrement pertinente, aujourd'hui où tant de mutations sociétales se dessinent dans le paysage de l'enseignement et de la recherche, à la fois si vite et si insensiblement. Nous pensons aux programmes des lycées où la physique recule, au retard des universités françaises dénoncé par Serge Haroche auprès du président de la République en mars 2019 et au cœur des réflexions suscitées par l'élaboration de la loi pluriannuelle de la recherche. Dans ce contexte politique en recomposition, il nous semble que les sociétés savantes (qu'on pourrait bien appeler s*ociétés scientifiques*) ont actuellement un rôle particulier à jouer comme force de proposition, tant auprès des pouvoirs publics que dans les milieux de l'enseignement, de la recherche et de l'entreprise.

Dans le domaine des sciences physiques, on ne peut qu'être frappé par la modestie des forces de la SFP, comparées à celles des associations analogues en Allemagne ou au Royaume-Uni. Nous voudrions simplement rappeler ici quelques initiatives prises précédemment par la SFP pour augmenter la visibilité des sciences physiques en France.

Étienne Guyon, au début des années 2000, a tenté la création du G2P (*Groupement Pour la Physique*) rassemblant une douzaine de sociétés savantes dans les domaines de la physique et des sciences de l'ingénieur. Ce G2P n'a pas perduré au-delà de quelques années, sans doute parce que d'emblée trop large et trop divers dans ses composantes, peut-être aussi parce que la volonté d'une action collective ne s'était pas suffisamment manifestée. Toutefois c'est bien au G2P que l'on doit l'élégante brochure *Les métiers de la Physique*, conçue et réalisée en 2005 pour l'Année Mondiale de la Physique, tirée à plusieurs fois 10 000 exemplaires et distribuée pendant des années dans tous les lycées de France.

Une autre initiative du même type a été prise en 2009 avec la création de la F2S (*Fédération Française de Sociétés Scientifiques*), rassemblant seulement trois sociétés savantes, mais très motivées : la SFP, la SFO (*Société Française d'Optique*) et la SEE (*Société d'Électronique, d'Électricité et des Technologies de l'Information et des Communications*), bientôt rejointes par la SFV (*Société Française du Vide*). La F2S n'a certes pas bouleversé la vie associative. Elle a eu au moins le mérite de créer des contacts pour l'orientation professionnelle des jeunes (voir *Ma voie scientifique* sur le site internet de l'ONISEP, qui y présente depuis six ans le très riche *Blog des sciences* de la F2S). En outre, la F2S assure la pérennité du prix Édouard Branly, porté à bout de bras depuis 1990 par Étienne Guyon. Ce prix constitue un utile complément à ceux de la SFP. Aujourd'hui, l'équipe de Costel Subran a pris le pari de redonner vie à cette association, reprenant le projet d'élargir la Fédération à d'autres sociétés savantes dans les domaines des sciences exactes. Une chronique régulière de la F2S est rédigée pour créer un pont entre les sociétés partenaires à travers la *newsletter* illustrée.

La F2S a pour ambition de rapprocher les secteurs du public et du privé. Elle organise chaque année des journées *Science et Progrès,* rassemblant ingénieurs et chercheurs des milieux académiques et industriels. Le colloque de la F2S de janvier 2018 a attiré plus d'une centaine de personnes à l'ENS autour des *Technologies Quantiques*. Celui de janvier 2019, autour de *Technologies du futur, au-delà de l'électronique,* a développé un programme exploratoire très ambitieux. Le 7 janvier 2020, la F2S vient de célébrer à l'ENS les 60 ans du laser avec des lauréats du prix Nobel et a réuni des scientifiques et des industriels autour du thème *Les nouveaux lasers : des microlasers aux lasers extrêmes*.

Les rapprochements qui se développent actuellement entre sociétés scientifiques nous paraissent d'excellentes sources d'inspiration pour les unes et les autres. Une voie d'avenir est d'activer ces liens, avec l'objectif de contribuer ensemble au développement des connaissances et aux innovations dont notre société a besoin.

Michèle Leduc, directrice de recherche émérite à l'ENS,
ancienne présidente de la SFP (2007-2009) et de la F2S (2009-2013)

Étienne Guyon, professeur honoraire à l'ESPCI,
ancien président de la SFP (2002-2003)

Costel Subran, ancien vice-président de la SFO et du CNOP,
président de la F2S (2018-2022) et du Comité National Lumière & Société

Réponse au courrier des lecteurs « Remarques et compléments sur le numéro de *Reflets de la physique* sur l'électricité nucléaire », paru dans le numéro 61, page 53

La lettre d'Élisabeth Huffer, Jean-Marie Loiseaux et Hervé Nifenecker considère que ce numéro 60 consacré à l'énergie nucléaire serait « *manifestement orienté vers le Non [au nucléaire]* ».

S'il est vrai que l'impartialité parfaite n'existe pas, s'il est exact que c'est avec ses propres lunettes que l'on interprète ce que l'on lit, il n'en reste pas moins que la critique envoyée appelle quelques réponses.

Sur les illustrations : sauf erreur, j'ai compté 39 illustrations dans ce numéro 60. Sur ce nombre, il est vrai que 11 illustrations sont franchement antinucléaires (et sont toujours mises en regard avec des illustrations tout aussi franchement pronucléaires). Il reste une série d'images, que l'on pourrait qualifier de « neutres », et qui toutes montrent des installations nucléaires en parfait état, l'on pourrait tout autant les qualifier de « pro ». On est loin, je pense, de suggérer une « *valse hésitation entre le Oui et le Non* »...

Le reste de cette lettre tient en une défense et illustration de l'intérêt de l'énergie nucléaire vue comme « *une voie de sortie à l'extrêmement périlleuse menace climatique* ». Première remarque : il semble bien que les auteurs de cette critique n'aient pas lu le chapitre introductif de ce n°60, ni même le reste, ils n'ont probablement cherché que ce qui à leur avis ne leur « *parait pas digne d'un article de revue de la SFP* ». Mais le propos de ce n°60 était d'abord, comme son nom l'indique, de faire le point sur des « questions ouvertes, concernant l'histoire, la gestion des déchets, le risque d'accident, l'imbrication entre le civil et le militaire... ». Toutes questions qui ne sont pas encore aujourd'hui résolues de façon consensuelle. Et non de se concentrer sur un seul aspect du nucléaire civil – qui d'ailleurs n'a pas été mis en place pour des raisons climatiques...

D'un autre côté, il est difficile d'accepter cette accusation de partialité au regard des communications concernant « Quel futur pour le nucléaire français ? ». On y pose bien la question du nucléaire dans la lutte contre le réchauffement climatique. Mais sans y répondre de façon aussi tranchée que les « dignes » représentants de l'objectivité scientifique. Ce qui est normal, puisque la question implique autant la politique que la simple technologie. Et aussi, puisqu'encore une fois ce numéro consiste à éclairer des points de controverse non résolus, sans chercher à prendre parti.

Et pour couronner le tout, les auteurs en appellent à un article (datant de 2012) présenté comme « *une estimation des risques [qui] ne peut être faite de façon absolue, mais en comparaison avec des énergies de substitution* ». À croire qu'ils ont lu aussi mal l'article en question qu'ils n'ont lu ce n°60 (j'ai lu les deux...), puisque cet article de *Forbes Magazine* ne concernait en aucun cas les « risques », mais les « décès directs ou induits liés au carbone ». Pour paraphraser les auteurs de la critique qui nous est faite : présenter ce tableau ne me parait pas digne de la déontologie la plus élémentaire dont devraient faire preuve des membres aussi éminents de la SFP... Aurions-nous dû parler des conséquences létales, sociales ou environnementales à long terme de Tchernobyl ou Fukushima ? Ce n'était ni le lieu, ni le propos de ce numéro.

Alors oui, sectarisme pour sectarisme, ce numéro peut être vu comme « pro » par les « antis », aussi bien que « anti » par les « pros ». Chacun y verra midi à sa propre montre... Mais il peut aussi être vu comme une mise à plat – certainement incomplète – pour celles et ceux qui se posent la question du « pour » ou du « contre », et leur donnera peut-être envie de creuser la question. Ce numéro aura eu le mérite d'exister, en laissant s'exprimer des opinions différentes, cherchant à clarifier – ou du moins expliciter – certains aspects d'une controverse qui n'est pas près de s'éteindre.

Jean-Marie Brom
Membre du Comité de rédaction de *Reflets de la physique*

Le temps des neurones. Les horloges du cerveau

Dean Buonomano (EDP Sciences, 2018, 280 p., 22 €)
Traduction de l'anglais par Michel Le Bellac

Pour le physicien, la répétition d'un phénomène périodique, tels l'aller-retour d'un balancier d'horloge ou les oscillations d'un cristal de quartz, permet de mesurer l'écoulement du temps. Pour le cerveau des êtres vivants, et en particulier des humains, la situation est bien plus complexe. L'auteur de cet ouvrage, chercheur au Département de Neurobiologie et Psychologie à UCLA (Université de Californie, Los Angeles), consacre ses travaux à l'étude de la façon dont le cerveau marque le temps.

Nous avons tous une perception du temps, nous emmagasinons des souvenirs, notre mémoire nous permet de prévoir et de nous préparer à ce qui va advenir. Si le temps de l'horloge règle nos vies, le sentiment subjectif de l'écoulement du temps est une construction mentale qui nous fait « ressentir » cet écoulement. C'est également une machine qui nous sert à nous projeter mentalement dans le futur car, nous rappelle l'auteur, notre cerveau nous a permis de comprendre *qu'en semant des graines aujourd'hui nous pourrions assurer notre survie demain*.

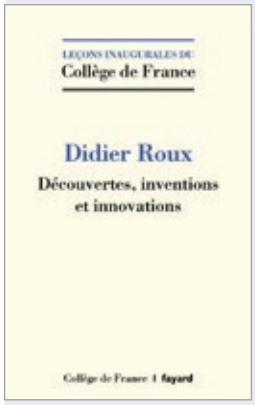
Certes, nous possédons une horloge circadienne qui régit notre physiologie. L'auteur relate les recherches sur la mouche drosophile, qui ont permis d'élucider les boucles de rétroaction de transcription/traduction de notre matériel génétique qui régissent cette horloge interne. Néanmoins, l'expérience de personnes emprisonnées sans contact extérieur pendant de longues périodes prouve que cette horloge peut dysfonctionner. De nombreuses expériences lors d'événements traumatiques montrent combien notre perception de l'écoulement du temps peut être subjective. L'auteur s'interroge alors sur la « dynamique neuronale ». Le réseau de neurones connectés par des synapses qui régit nos cerveaux a une activité électrique complexe et, comme pour tout système dynamique composé d'éléments multiples couplés, le *chaos déterministe* est *a priori* la règle. L'auteur s'interroge sur un mystère fascinant car *nous ne comprenons pas*, écrit-il, *comment les circuits du cortex résolvent le problème de la dynamique chaotique*.

La deuxième partie du livre est consacrée à la nature physique et mentale du temps. Après avoir exposé en termes simples la relativité d'Einstein qui oblige à repenser des concepts tels que la simultanéité d'évènements séparés dans l'espace ou l'absence d'universalité de l'écoulement du temps, l'auteur s'interroge sur la spatialisation en neurosciences. L'ouvrage s'achève avec des réflexions sur la conscience, lien entre le passé et le futur.

Le physicien que je suis aurait sans doute souhaité que l'auteur insiste davantage sur la contradiction entre la réversibilité des phénomènes physiques – le film d'une collision de boules de billards est tout aussi réaliste projeté en marche arrière qu'en marche avant – et l'irréversibilité de l'évolution qui nous entoure. La croissance de l'entropie fournit une flèche du temps dont la physique microscopique est dépourvue.

Au total, il s'agit d'un ouvrage de réflexions passionnantes, très clairement exposées, en termes toujours simples, sans qu'il soit nécessaire de nous imposer des descriptions complexes sur notre système neuronal. La traduction en français est tout à fait remarquable.

Édouard Brézin
Professeur émérite à l'École normale supérieure



Découvertes, inventions et innovations

Didier Roux – Leçon inaugurale du Collège de France
Collège de France / Fayard (56 p., 2017, 12 €)

Didier Roux se saisit de sa leçon inaugurale pour mettre en lumière le lien étroit entre innovation et recherche, quand la recherche fondamentale répond aux grands enjeux contemporains.

Dans le modèle « schumpétérien » de l'économie, l'innovation est un moteur essentiel de la croissance. Cependant, l'histoire est jalonnée d'exemples de convergence entre découvertes, inventions technologiques et innovations. Qu'il s'agisse des travaux pionniers de Charles Babbage et d'Ada Lovelace en informatique au XIXe siècle ou de la découverte des microémulsions et de leur utilisation dans le contexte des crises pétrolières, on a assisté à de fertiles allers et retours entre recherche fondamentale et recherche appliquée, les approches scientifique et technologique s'enrichissant mutuellement.

Didier Roux est physicochimiste. Ancien directeur de la R&D à Saint-Gobain, il est membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies. Il a été professeur invité au Collège de France sur la chaire annuelle d'Innovation technologique Liliane Bettencourt (2016-2017).

Big bang. Comprendre l'univers depuis ici et maintenant

Jean-Philippe Uzan (Flammarion, 2018, 304 p., 21 €)
Prix Ciel & Espace du livre d'astronomie 2019

Ce livre est une revue des différentes questions cosmologiques actuelles, tant observationnelles que théoriques, voire spéculatives, que J.P. Uzan raconte avec beaucoup de recul. Au départ de son travail, il prend soin de distinguer deux sortes de cosmologies : celle à laquelle il met une majuscule traite de l'ensemble de l'Univers et existe depuis toujours ; l'autre, avec un petit c, est la cosmologie scientifique d'aujourd'hui, qui n'a accès qu'à la partie observable de l'Univers. Cette distinction lui permet ensuite de parler des deux sans risque de confusion, en évitant surtout que les aspects les plus spéculatifs n'autorisent une vision relativiste des théories (c'est-à-dire leur renvoi à de simples consensus dans le milieu scientifique, ou de mode dans le milieu culturel).

L'auteur montre en quoi la cosmologie est une science particulière, en ceci que l'on se contente de ce que l'on observe « ici et maintenant » (sur un unique cône de lumière), et que l'on doit toujours tenir compte du biais que représente cette particularité par rapports aux sciences de laboratoire : nous observons l'Univers de l'intérieur et non de l'extérieur. Bien que l'interprétation des faits dépende du cadre théorique, l'auteur prend soin également de distinguer entre faits d'observation et modèles, ces derniers seuls imposant aujourd'hui à l'Univers une origine, un « Big bang », qui n'est en fait qu'une « singularité dans la description », le physicien n'ayant accès qu'à un état condensé de l'Univers.

Cela n'empêche pas l'auteur de décrire de façon approfondie ce qui se passe pendant les premières minutes de l'Univers selon la chronologie du modèle pour la nucléosynthèse primordiale, par extrapolation de l'époque de la recombinaison à laquelle donne accès le rayonnement fossile (CMB).

Après un parcours historique qui prend en compte la découverte progressive des structures de l'Univers jusqu'à la construction du modèle standard grâce à la physique atomique et nucléaire, puis la mécanique quantique, Jean-Philippe Uzan décrit soigneusement la spécificité de la cosmologie dont l'objet est unique et dont les observations font accéder à un passé qui est fonction de la distance ; ce retard et cette distance ne peuvent être déterminés qu'à travers un modèle théorique qui est encore aujourd'hui celui de la Relativité Générale d'Einstein, les théories alternatives ne relevant jusqu'à présent que de la spéculation ; elles seront abordées dans le dernier chapitre.

L'auteur montre clairement l'enchainement des difficultés qui conduisent à l'adoption de la matière noire pour rendre compte de la dynamique des galaxies, de l'inflation pour rendre compte de l'homogénéité du CMB, et de l'énergie noire requise par l'accélération actuelle de l'expansion.

Le huitième chapitre explique comment tester la robustesse des hypothèses à travers la comparaison des modèles possibles, comparaison qui s'effectue dans le cadre des probabilités bayésiennes, multiplie une probabilité *a priori* liée à la crédibilité du modèle théorique selon des critères de simplicité (accord avec le reste de la physique, simplicité et cohérence, faible nombre de paramètres libres) par un facteur provenant de l'accord avec les observations. On montre ainsi que ce n'est pas cet accord qui prédomine toujours car il y a une nécessité de cohérence et de structuration de la théorie, d'élégance qui ne doit jamais cependant s'imposer seule, même si quelques-uns auraient tendance à le faire. J.P. Uzan s'interroge donc sur les hypothèses fondamentales du modèle standard actuel, tel le principe copernicien présupposant l'homogénéité de l'Univers. Divers tests de ce principe seront possibles dans l'avenir, à partir de la comparaison de plusieurs cônes de lumière successifs issus de notre point d'observation unique.

Ce livre est agréable à lire sans que les difficultés soient évitées. Il est écrit dans un style enlevé qui en fait un ouvrage passionnant, plongeant le lecteur au cœur des problématiques cosmologiques contemporaines et futures.

Christiane Vilain
Laboratoire SPHERE, Université Paris Diderot

MOOC 2020 : **La physique, vive[z] l'expérience**

Un MOOC *(Massive Open Online Course)* est un cours en ligne gratuit et ouvert à tous.

Pour s'inscrire à ce MOOC sur la plateforme France Université Numérique (FUN) :
www.fun-mooc.fr/

De quoi parle ce MOOC ?

- Cinq défis scientifiques (l'invisibilité, la vision 3D, la lévitation, le moteur écologique, la communication à la vitesse de la lumière), permettant d'aborder de façon expérimentale et ludique l'optique, la mécanique, le magnétisme, l'électricité et la thermodynamique. (Voir la chaine *YouTube* du MOOC).

Pour qui ?

- Lycéens, étudiants, enseignants, et toute personne intéressée par la science.

Par qui ?

- Ce MOOC est conçu et réalisé par des enseignants de l'Université Paris 13.

L'insoutenable gravité de l'Univers

Gabriel Chardin

(Le Pommier, collection Essais et documents, 2018, 464 p., 25 €)

Ce livre parait alors que trois expériences (Gbar, AEgIS et ALPHA-g) sont en cours au CERN pour mesurer l'effet de la gravitation terrestre sur des particules d'antimatière.

La force de gravitation a beau être la force la plus immédiate à nos sens, a beau avoir été élégamment apprivoisée par Einstein dans sa théorie centenaire et néanmoins générale de la relativité où paradoxalement elle a disparu en tant que force, le concept d'interaction gravitationnelle demeure encore une énigme du point de vue du formalisme quantique. De là nait le questionnement suivant : les concepts à la base de la théorie de la relativité et de la théorie quantique ne seraient-ils pas partiellement incompatibles ? C'est avant tout par cet aspect des choses, en les reprenant une à une, que Gabriel Chardin s'attèle à une description exhaustive des avancées théoriques qui ont conduit au corpus actuel de connaissances de la physique contemporaine. À mon sens, c'est une des forces de son ouvrage que de réexpliciter de façon pédagogique relativité restreinte et générale, trous noirs, trous de ver, théories des cordes – ou des membranes –, gravité quantique à boucles, notions de thermodynamique et de théorie de l'information... En termes de contenu, nous parlons là de quatre-vingt-cinq pour cent de l'ouvrage !

Vous me demanderez alors à quoi les quinze pour cent restants sont-ils consacrés ? Rien de moins qu'à régler leurs comptes aux concepts de matière et d'énergie sombres que les mesures les plus récentes issues de la mission Planck réussissent pourtant à quantifier avec une précision diabolique (voir l'article, pp. 4-10), mais que le modèle cosmologique standard peine encore à expliquer dans leurs natures profondes ! Eh oui ! Si depuis pas loin de quatre-vingt-cinq ans la matière sombre est invoquée pour justifier des vitesses trop élevées dans des amas au regard de la masse *lumineuse* observée, on ne sait finalement pas grand-chose de cette masse *dynamique* d'origine inconnue mais de nature non baryonique qui serait, elle, des centaines de fois plus grande que l'observée. De même, les cosmologistes en sont réduits à invoquer l'existence d'une énergie sombre associée à une force répulsive pour expliquer l'expansion accélérée de l'Univers..., énergie de plus en plus dominante dans notre Univers jusqu'à ce que les galaxies se retrouvent isolées les unes des autres au milieu d'un espace qui se sera presque vidé.

Ouvrage bigrement ambitieux que celui de Gabriel Chardin, pour qui la solution a peut-être pour nom... l'antimatière. Si les chercheurs traquent cette dernière depuis des décennies, personne ne sait – et c'est un doux euphémisme – ce qu'elle est advenue après le Big bang. La muse de l'auteur se dissimulerait-elle dans les vides intergalactiques occupant la plus large fraction de l'Univers ? Et si, au lieu de graviter, l'antimatière antigravitait ? Dans cet Univers contenant autant de matière que d'antimatière, appelé de Dirac-Milne, on pourrait alors avoir presque autant de masse négative que de positive, et alors *exit matière et énergie sombres ! Vous me direz : pure spéculation ! Oui et non !* Le propos est développé de bout en bout de manière scientifique, s'appuie sur trois expériences menées actuellement au CERN et dédiées au comportement intime de l'antimatière. L'auteur est cependant le premier à revendiquer s'en remettre au verdict des tests expérimentaux.

Pour conclure, je mettrais en avant l'érudition et la qualité de vulgarisation dont a su faire preuve Gabriel Chardin tout au long de cet ouvrage stimulant ! À mettre entre toutes les mains, définitivement !

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

Pour quoi ?

- Découvrir ou redécouvrir les richesses de la physique et, pourquoi pas, réaliser vous-mêmes vos expériences et les partager avec la communauté du MOOC.
- Rencontrer des chercheurs qui vous présenteront les applications présentes et futures des thèmes abordés.

Quand ?

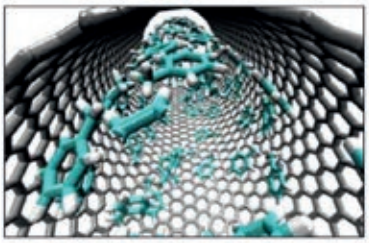
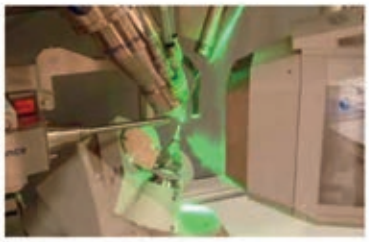
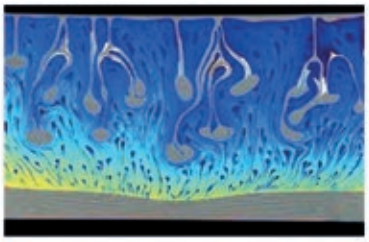
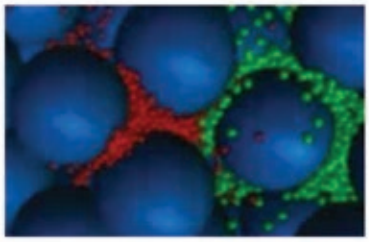
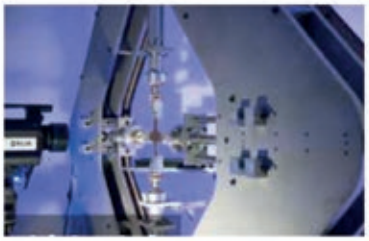
- Inscriptions du 29 novembre 2019 au 16 mars 2020.
- Dates du cours : 23 mars au 1er juillet 2020 (durée : 7 semaines, effort estimé : 2 heures par semaine).

Vive[z] l'expérience

JMC 17

JOURNÉES de la MATIÈRE CONDENSÉE

RENNES
du 24 au 28 Août
2020

Conférences plénières :

Prix SFP
Philipp Werner, prix SFP-SPS
Xavier Marie, Grand prix J. Ricard
Marcelo Rozenberg, Grand prix E. du Chatelet
Anna Minguzzi prix L. Ancel

Marie-Paule Besland
Guillaume Cassabois
Annie Colin
Olivier Dauchot
Gilles Patriarche
Frederic Pincet
Guido Pupillo
Marie-Ingrid Richard
Pierre Seneor

Présidents du comité d'organisation
Eric Collet et Isabelle Cantat

Présidence de la Division Matière Condensée de la SFP
Olivier Sandre et Michele Casula

Évènement organisé par

Société Française de Physique

UNIVERSITÉ DE RENNES 1
Campus de Beaulieu - Bât 2 A
263 av du Général Leclerc - Rennes

Renseignements et inscription :
https://jmc17.sciences.org/

IPR Institut de Physique de Rennes
UNIVERSITÉ DE RENNES 1
cnrs